

**МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«УРАЛЬСКАЯ ГОРНАЯ ШКОЛА– РЕГИОНАМ»**

13–22 апреля 2015 года

ГЕОМЕХАНИКА. МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ДЕЛО

УДК 621.1

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИРООРИЕНТИРОВАНИЯ
ЗА СМЕЩЕНИЯМИ В ГОРНОМ МАССИВЕ**

АЛЯБЬЕВА О. Д., БАДУЛИН А. П.

Уральский государственный горный университет

В настоящее время в Уральском регионе и частично на северо-востоке России внедрена совместная отработка месторождений полезных ископаемых. С поверхности до глубины 300–450 м месторождения обрабатываются открытым способом, в нижние горизонты – подземным способом. В этой связи происходит перераспределение напряжений в горном массиве, и могут быть подвижки тех или иных участков, и особенно в местах производства горных работ.

Наблюдения за смещениями горных пород могут осуществляться различными способами, которые широко представлены в специальных инструкциях и методических пособиях [1, 2, 3, 4, 5].

В данной работе предлагается в подземных выработках, находящихся в прибортовой области горного массива, на первом этапе производства наблюдений воспользоваться *гироскопическим ориентированием направлений*. Его достоинство состоит в том, что измерения азимутов гирокомпасами практически не зависят от условий погоды, времени года и суток, геодезической обеспеченности района работ и его физико-географических особенностей (до широты 70°). Работа гирокомпаса не подвержена действию радиопомех и магнитных аномалий.

Указанные выше преимущества определения направления линии с помощью гирокомпаса предоставляют возможность его использования для получения смещений горного массива.

Для изучения смещения пункта с помощью гироориентирования направлений была взята сторона I-II. На пункте I устанавливают гироскопический прибор МВТ-2 №85 и приводят его в рабочее положение. На пункте II размещают отвес. На направлении I-II измеряют гироазимуты (выполнено 11 пусков) (таблица 1). Затем на пункте II принудительно смещают отвес перпендикулярно линии визирования на 1 см и 2 см. Проводилось по 2 пуска (Г₁' и Г₂') прибора на каждое смещение отвеса (таблица 2).

Таблица 1 – Оценка точности гироориентирования по отклонениям от среднего

| В коридоре здания сторона I-II40м | | | | |
|-----------------------------------|-----------------|---------------------------------|---|--|
| Г _i | Г _{ср} | Г _i –Г _{ср} | (Г _i –Г _{ср}) ² | для вычислений |
| 77 19 38 | 77°19'46",1 | –8,1 | 66,61 | $\mu_{\Gamma} = \pm \sqrt{\frac{\sum (\Gamma_i - \Gamma_{ср})^2}{K_{\Gamma} - 1}}$ |
| 77 19 49 | | +2,9 | 8,41 | |
| 77 19 31 | | –15,1 | 228,01 | |

| | | | | |
|-------------|--|-------|--------|---|
| 77 19 56 | | +9,9 | 98,01 | $\mu_{\Gamma} = \pm \sqrt{\frac{908,91}{11-1}} = \pm 9,5''$ |
| 77 20 05 | | +18,9 | 357,21 | |
| 77 19 44 | | -2,1 | 4,41 | |
| 77 19 37 | | -9,1 | 82,81 | |
| 77 19 49 | | +2,9 | 8,41 | |
| 77 19 44 | | -2,1 | 4,41 | |
| 77 19 52 | | +5,9 | 34,81 | |
| 77 19 42 | | -4,1 | 16,81 | |
| 850°37 27'' | | | 908,91 | |

Γ_j, Γ_{cp} – единичное и среднее значение гироскопического азимута; K_{Γ} – число определений азимута.

Таблица 2 – Результаты гиросориентирования направления с учетом смещения пункта визирования

| Смещение пункта визирования на 1 см | | | |
|-------------------------------------|----------------|---------------|---|
| Γ_j' | Γ_{cp}' | Γ_{cp} | $\Gamma_{cp}' - \Gamma_{cp} = \Delta\Gamma$ |
| 77°20 37'' | 77°20 41'' | 77°19 46,1'' | +54,9'' |
| 77°20 45'' | | | |

| Смещение пункта визирования на 2 см | | | |
|-------------------------------------|----------------|---------------|---|
| Γ_j' | Γ_{cp}' | Γ_{cp} | $\Gamma_{cp}' - \Gamma_{cp} = \Delta\Gamma$ |
| 77°2106 | 77°2112,5 | 77°19 46,1 | +86,4 |
| 77°2119'' | | | |

Пересчёт угловых смещений в линейные производится по формуле:

$$l = \frac{L\Delta\Gamma}{\rho}, \quad (3)$$

где L – длина стороны визирования; $\Delta\Gamma$ – разница между средними значениями гиросориентирования направлений со смещением пункта визирования Γ_{cp}' и без смещения пункта визирования Γ_{cp} ; $\Delta\Gamma = \Gamma_{cp}' - \Gamma_{cp}$.

$$\rho = \text{const} = 206265; \quad l = \frac{40000 \cdot 54,9}{206265} = 11 \text{ мм}, \quad l = \frac{40000 \cdot 86,4}{206265} = 17 \text{ мм}.$$

Данные величины отличаются от истинного смещения пункта визирования соответственно на 1 и 3 мм.

Точность определения величины смещения пункта визирования с помощью гиросориентирования направления составляет 1–3 мм, в угловой мере 5'', 15''.

Исследования, проведённые по определению смещения пунктов визирования, дают возможность применения гиросориентирования, направления для наблюдений за деформациями горного массива.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тер-Степанян Г.И. Геодезические методы изучения динамики оползней. М.: Недра, 1972. 130 с.
2. Брайт П.И. Геодезические методы измерения деформации оснований и сооружений. М.: Недра, 1965.
3. Брайт П.И. Геодезические методы измерения смещений на оползнях. М.: Недра, 1965. 115 с.
4. Методические указания по наблюдениям за деформациями и бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости. Л.: ВНИМИ, 1987. 118 с.
5. Временные методические указания по управлению устойчивостью бортов карьеров цветной металлургии. Москва: МЦМ СССР, 1989. – 127 с.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ГЕОМЕХАНИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ВНУТРЕННИХ ОТВАЛОВ

БАННИКОВ А.Е., ГОЛУБКО Б.П.

Уральский государственный горный университет

Одной из основных задач маркшейдерской службы в соответствии со ст. 24 Закона РФ «О недрах» является разработка и осуществление мероприятий по безопасному ведению горных работ [1]. Такой комплекс работ включает в себя изучение геомеханических процессов на исследуемом участке, анализ происходящих процессов и их прогноз. На открытых горных работах геомониторинг представляет собой наблюдение за сдвижением горных пород, составляющих борт отвала в потенциально опасных местах в районе нахождения горнотехнического оборудования. Методы наблюдений за бортами карьеров и отвалов описаны в различных нормативных документах: «Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов...», РД 07-603-03, РД 07-226-98, – в них описаны типичные случаи и способы наблюдений. На практике по различным причинам не всегда возможно осуществить в полной мере регламентированный инструкцией комплекс работ по наблюдению за сдвижением массива горных пород.

В данной статье объектом исследования является внутренний отвал ОАО «Ураласбест». Технология внутреннего отвалообразования изначально усложняет проведение стандартных методик мониторинга геомеханических процессов: для наблюдений доступна только верхняя рабочая площадка, технология отвалообразования не представляет возможным заложение долговременных реперов непосредственно в рабочей зоне отвала. Каждый такой отвал представляет собой уникальный случай, для которого маркшейдерская служба вынуждена адаптировать стандартные методики к реалиям технологического процесса отвалообразования, изначальным условиям динамики процесса отсыпки и изменяющимся в связи с этим видам измерений и их аналитической интерпретации. Работы по мониторингу за внутренним отвалом на ОАО «Ураласбест» сотрудники кафедры маркшейдерского дела УГГУ проводят с 2004 г. За это время было предложено и внедрено расширение наблюдательной станции продольными линиями, были попытки использовать площадные схемы высотных отметок – «условную поверхность», созданную по всем реперам в области наблюдения, – и манипуляции с полученными условными поверхностями. Такая методика не оправдала себя из-за слишком частой утраты прибортовых реперов и, соответственно, неадекватной интерполяции высотных отметок в схемах с условными поверхностями исследуемого участка отвала и оперирования с ними. В 2014 г. была опробована методика, подразумевающая составление «площадных схем вертикальных скоростей смещения», оперирование такими схемами, анализ геомеханических процессов по результатам сопоставления таких схем по временным интервалам проведения наблюдений и соотнесение полученных данных с методическими, приведенными в инструкции по наблюдению за устойчивостью бортов карьеров и отвалов [2] (рисунок 1).

В то время как за период проведения мониторинговых работ на исследуемом отвале за 2004–2013 гг. были выявлены значительные точечные деформации в рабочей зоне, которые характеризуют только процесс интенсивного оседания отвального массива, по результатам наблюдений 2013–2014 гг. [3] были выявлены значительные оседания всей рабочей зоны отвала в границах наблюдательной станции. Возрастание скорости оседания отвального массива возможно свидетельствует о развитии оползневых явлений. Однако характерных для оползней оконтуривающих трещин на момент проведения последней серии наблюдений не зафиксировано. В связи с изменением динамики оседания рабочей зоны отвала, выявленным в результате наблюдений, маркшейдерской службе предприятия рекомендовано усилить визуальный контроль верхней площадки (90 м от верхней бровки), предупредить возникновение оконтуривающих трещин, а при выявлении проследить за их развитием во времени. При появлении оконтуривающих трещин необходимо сократить интервалы инструментальных наблюдений.

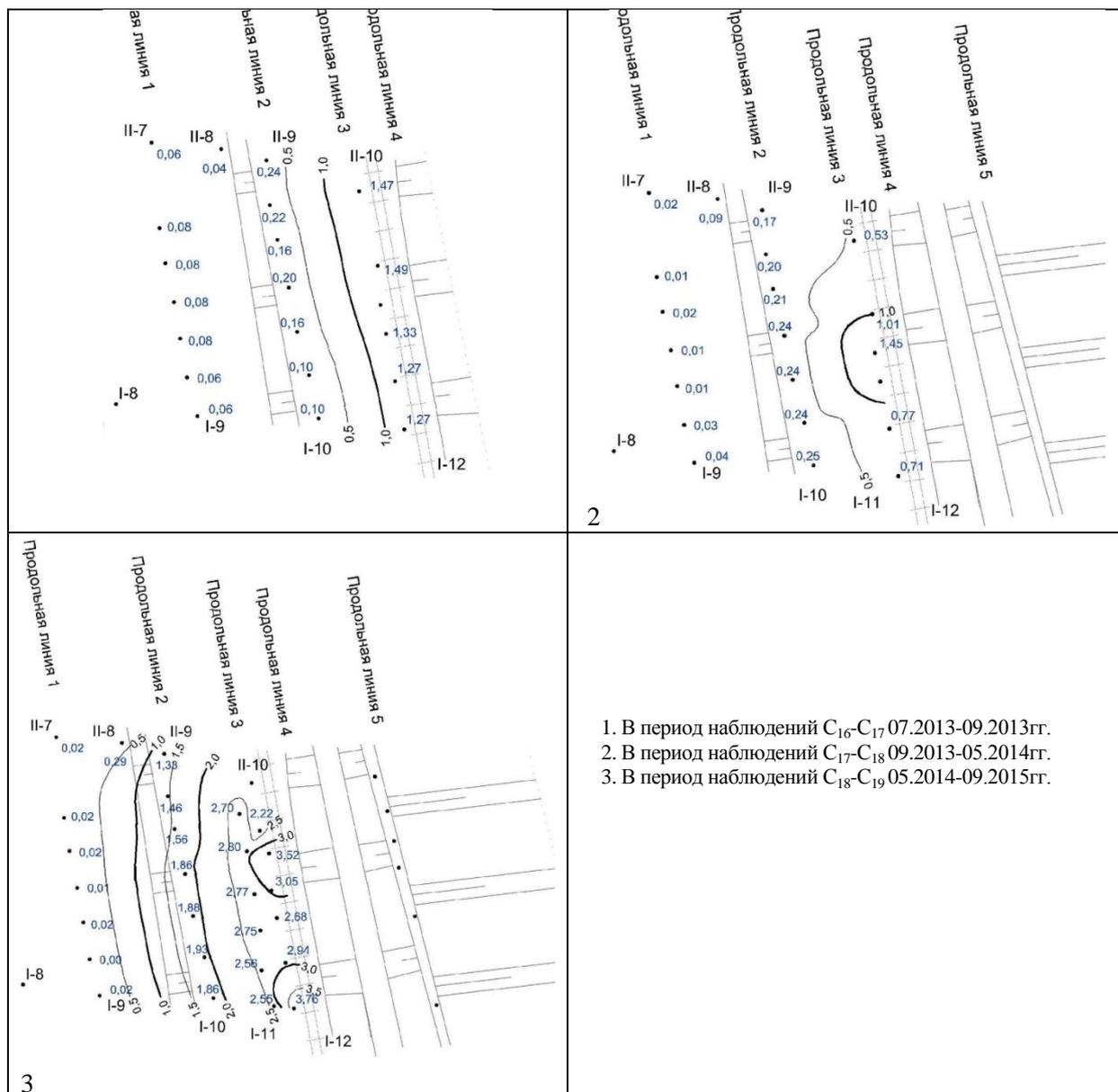


Рисунок 1– Площадные схемы вертикальных скоростей смещения

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. РД 07-603-03. Инструкция по производству маркшейдерских работ.
2. Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. Л.: ВНИМИ, 1971. 188с.
3. Наблюдения за устойчивостью откоса отвала при складировании пород вскрыши в выработанное пространство карьера 1-2 при высоте отвала 190м и глубине затопления карьера 80 м: отчет о НИР. Екатеринбург: УГГУ, 2014. 40с.

СОЗДАНИЕ МЕТОДИКИ СБОРА И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОБИЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ НА РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ МАГАДАНСКОЙ ОБЛАСТИ

ГОЛУБКО Б. П., МИХНО А. А.

Уральский государственный горный университет

Разработка россыпных месторождений открытым способом охватывает большие площади (за счёт неглубокого залегания и сложной лентообразной формы), которые требуют маркшейдерского обеспечения. Применение системы мобильного лазерного сканирования (СМЛС) в значительной степени повышает экономическую эффективность маркшейдерских работ на россыпных месторождениях полезных ископаемых.

Сущность работы лазерного сканера аналогична работе электронного тахеометра, однако в его основе лежит принцип тотальной съёмки объекта, а не отдельных характерных его точек. Результатом измерений лазерного сканера является трёхмерное изображение исследуемого объекта, состоящее из облака точек [1].

Система мобильного лазерного сканирования устанавливается на автомобиль, за счёт чего увеличивается производительность сбора данных. Позиционирование осуществляется интегрированным в систему ГНСС (Глобальная навигационная спутниковая система) приёмником и базовой станцией *RTK (RealTimeKinematic)* (рис.1).

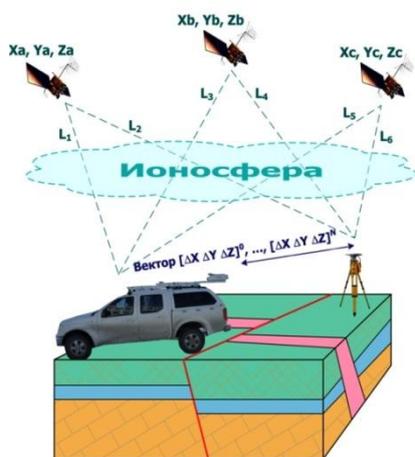


Рисунок2–Позиционирование
СМЛС

Для решения таких приоритетных задач, как контроль за правильным и безопасным ведением горных работ; проведение маркшейдерских съёмок; определение объёмов выполнения горных работ, складов и отвалов, с 2013 года маркшейдерской службой ООО «Статус» применяется СМЛС *Dynascan* [2].

Разработке алгоритмов и программных продуктов обработки данных наземного лазерного сканирования посвящено большое количество публикаций. Существенный вклад в развитие технологии наземного лазерного сканирования внесли зарубежные ученые: доктора, инженеры W. Boehler, L. Gruending, H. Ingensand, D. Lichti, I. Milev, J. Norton, J. Riegl, A. Ulrich; отечественные учёные: д-р техн. наук И.Г. Журкин, канд. техн. наук Е.М. Медведев, канд. техн. наук А.П. Михайлов, канд. техн. наук А. И. Науменко. Несмотря на это, в настоящее время нет запатентованной технологии

выполнения работ по мобильной лазерной съёмке с целью построения трёхмерных моделей местности, создания горно-графической документации и расчета выполненных горных работ. Авторами были выполнены производственные работы по мобильной лазерной съёмке различных объектов и территорий общей площадью в несколько десятков квадратных километров, на основе чего разработана технология выполнения маркшейдерской съёмки, создания горно-графической документации и расчета выполненных горных работ по данным мобильного лазерного сканирования, представленная на рисунке 2 [3].

В результате внедрения СМЛС *MDL Dynascan* в процесс маркшейдерского обеспечения ООО «Статус» были получены следующие результаты.

Экономический эффект. Несмотря на кажущуюся на первый взгляд высокую рыночную стоимость СМЛС (~ 5–7 млн руб., цена зависит от комплектации), практика его использования показывает, что все затраты окупаются в среднесрочном периоде (1–2 года). В основном, это происходит за счёт сокращения штата маркшейдерской службы и исключения из штата горнорабочих, занятых на маркшейдерских работах.



Рисунок 2 – Блок-схема технологии построения трёхмерных моделей местности, создания горно-графической документации и расчета выполненных горных работ по данным мобильного лазерного сканирования

Работа СМЛС позволила сократить штат маркшейдерской службы предприятия с 8 до 4 человек.

Производственный эффект:

- работа СМЛС позволила практически полностью исключить человеческий фактор, оказывающий влияние на точность измерений при проведении маркшейдерской съёмки;
- в значительной мере сократилось время на камеральную обработку данных, тем самым ускорив процесс передачи ситуации горных работ в соответствующие службы;
- использование СМЛС позволило исключить преднамеренное искажение исходных полевых данных со стороны участковых маркшейдеров, усилив контроль над ведением горных работ.

На основании вышеизложенного можно заключить, что использование СМЛС в работе маркшейдерской службы горного предприятия обладает рядом преимуществ, таких как сокращение численности штата сотрудников, ускорение обращения горно-графической документации, повышение точности расчета объёмов выполненных работ, повышение безопасности ведения горных работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Наземное лазерное сканирование. Середович В.А. [и др.]. Новосибирск: СГГА, 2009.
2. Официальный сайт компании MDL. URL: www.mdl-laser.com
3. Набиуллин Р.Н., Михно А.А. Эксплуатация системы мобильного лазерного сканирования Dynascan(RT3005G): рабочая инструкция. П. Ягодное: ООО «Статус», 2013.
4. Формирование объемной цифровой модели поверхности борта карьера методом лазерного сканирования / В. А. Середович [и др.] // Физико-технич. пробл. разраб. полез. ископ. Горная информатика. Новосибирск: СОРАН, 2007. № 5. С. 102–112.
5. 3D Modeling and metric analysis architectural heritage: photogrammetry and laser scanning / M. Caprioli [et al.] // Procs 6th Conference on Optical Measurement Techniques. Zurich, Switzerland, 2003. pp. 206–213.

КРИТЕРИЙ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

ГОРДЕЕВ В.А., ИЛЬЯСОВ Б.Т.

Уральский государственный горный университет

Длительное пластическое деформирование горных пород под действием напряжений, меньших, чем мгновенная прочность, называется *ползучестью*. Ползучесть горных пород, не содержащих глинистые включения, является следствием распространения микро- и макротрещин при температурах менее 100–150°C и нормальных напряжениях, значительно меньших прочности на одноосное сжатие [1, 2], то есть практически всегда в условиях ведения горных работ. Подобные проявления ползучести горных пород, которым не свойственна истинная ползучесть, называют также *квазиползучестью*.

Образование локальных разрушений горных пород при квазиползучем деформировании можно представить как снижение прочности отдельных участков до величин действующих напряжений. Снижение прочности со временем под влиянием касательных или растягивающих напряжений можно назвать *функцией длительной прочности*. Изучение современных представлений о ползучести горных пород позволило сделать следующие выводы.

При воздействии касательных или растягивающих напряжений величиной выше некоторого предела в течение длительного времени прочность горных пород снижается, стремясь к некоторой конечной величине, называемой *пределом долговременной (длительной) прочности горных пород* [3]. Скорость снижения прочности зависит от соотношения напряжение/начальная прочность [4]. Кроме этого, длительная прочность является функцией некоторых других параметров, влияние которых на сегодняшний день изучено недостаточно.

С учётом этих данных на основе критерия прочности Кулона нами разработан критерий длительной прочности горных пород следующего вида:

$$f_s = C_\infty + (C_0 - C_\infty) \left(1 - \frac{\tau}{f_{s0}}\right)^{bLT} + \sigma \left[\operatorname{tg} \varphi_\infty + (\operatorname{tg} \varphi_0 - \operatorname{tg} \varphi_\infty) \left(1 - \frac{\tau}{f_{s0}}\right)^{bLT} \right], \quad (1)$$

где C_0 и $\operatorname{tg} \varphi_0$ – начальные сцепление и коэффициент трения; C_∞ и $\operatorname{tg} \varphi_\infty$ – предельные значения параметров сдвиговой долговременной прочности горных пород; τ – касательное напряжение; σ – нормальное напряжение; LT – время; b – неизвестная переменная, определяемая опытным путём.

Можно заметить, что при стремлении времени к бесконечности предел функции длительной прочности будет равен

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f_s = C_\infty + \sigma \operatorname{tg} \varphi_\infty,$$

а в нулевой момент времени функция прочности принимает значение

$$f_s(0) = C_0 + \sigma \operatorname{tg} \varphi_0.$$

Выражение для расчета длительной прочности на разрыв выглядит аналогично.

Критерий длительной прочности разработан для внедрения в программный код метода конечно-дискретных элементов для создания инструмента расчета длительного деформирования горных пород. При пошаговом расчете длительных деформаций происходит изменение напряженно-деформированного состояния массива, а из формулы (1) видно, что с изменением напряжений изменяется и скорость снижения прочности.

Длительная прочность при изменении напряжений находится согласно выражению

$$\begin{cases} f_s = C_\infty + (C_0 - C_\infty)\left(1 - \frac{\tau}{f_{s0}}\right)^{bLT} + \sigma \left[\text{tg } \varphi_\infty + (\text{tg}_0 - \text{tg}_\infty)\left(1 - \frac{\tau}{f_{s0}}\right)^{bLT} \right], & \text{при } t < t_1 \\ f_s = C_\infty + (C_0 - C_\infty)\left(1 - \frac{\tau}{f_{s0}}\right)^{b(LT+\Delta LT)} + \sigma \left[\text{tg}_\infty + (\text{tg}_0 - \text{tg}_\infty)\left(1 - \frac{\tau}{f_{s0}}\right)^{b(LT+\Delta LT)} \right], & \text{при } t \geq t_1 \end{cases}, \quad (2)$$

в котором величину $LT + \Delta LT$ можно назвать эквивалентным временем и определить так:

$$LT + \Delta LT = \ln\left(\frac{C - C_\infty}{C_0 - C_\infty}\right) / \left[b \ln\left(1 - \frac{\tau}{C_0 + \sigma \text{tg } \varphi_0}\right) \right].$$

Смысл эквивалентного времени – время до достижения определенного значения сцепления C и коэффициента внутреннего трения $\text{tg } \varphi$ при текущих напряжениях. То есть Δt – это разница во времени, необходимом для достижения одинаковых значений характеристик прочности C и $\text{tg } \varphi$ при различных напряжениях.

Длительность разрушения при постоянных напряжениях можно определить, преобразовав выражение (1):

$$LT_{f0} = \ln\left(\frac{\tau - f_{s\infty}}{f_{s0} - f_{s\infty}}\right) / \left[b \ln\left(1 - \frac{\tau}{f_{s0}}\right) \right].$$

Тогда время до разрушения, считая от текущего момента, можно определить, вычтя эквивалентное время:

$$LT_f = LT_{f0} - (LT + \Delta LT).$$

На рисунке 1, а изображены графики снижения прочности на сдвиг со временем, рассчитанные по формуле (1) при $C_0 = 7,0$ МПа, $C_\infty = 4,9$ МПа, $\text{tg}_0 = 0,60$, $\text{tg}_\infty = 0,48$. Переменная b принята равной 1 сут^{-1} . Нормальное напряжение принято равным 5 МПа.

На рисунке 1, б представлен пример графика снижения прочности на сдвиг при изменении отношения напряжений к кратковременной прочности с величины $\tau/f_{s0} = 0,95$ до $\tau/f_{s0} = 0,70$, полученный расчетом в соответствии с выражением (2).

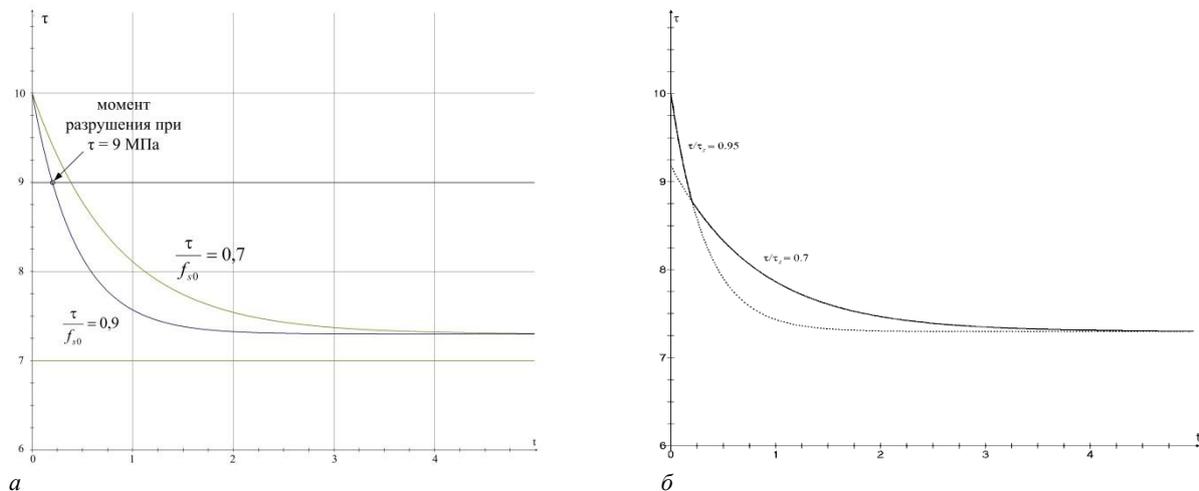


Рисунок 1 – Графики длительной прочности:
а– при различных касательных напряжениях; б – при изменении величины касательных напряжений

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pusch R. Mechanisms and consequences of creep in the nearfield rock of a KBS-3 repository /Pusch R., Hökmark H. Stockholm: SKB, 1992.
2. Scholz C. Static fatigue of quartz // J. Geophys. Res. 1972. № 77 (11).pp. 2104–2114.
3. Ильин А. И., Гальперин А. М., Стрельцов В. И. Управление долговременной устойчивостью откосов на карьерах. М.: Недра, 1985. 248 с.
4. Glamheden R. Creep in jointed rock masses. State of knowledge [Study report] / Glamheden R., Hökmark H. Stockholm: SKB, 2010. 44 p.

ПРИМЕНЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ GNSS-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ПРИКАРЬЕРНЫХ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД

МЕЛЬНИК Д.Е., ШМОНИН А.Б.

Уральский государственный горный университет

Разработка месторождений полезных ископаемых сопряжена с мощным техногенным воздействием на окружающий горный массив. При эксплуатации месторождения вследствие образования карьерной выемки, перемещения горной массы из карьера в отвалы и других факторов происходит нарушение первоначального напряженно-деформированного состояния породного массива и формирование его вторичного напряженно-деформированного состояния. Изменения, как правило, затрагивают не только прибортовой массив, но и проявляются на достаточно обширных территориях, прилегающих к месторождению.

Для оценки геодинамической активности массива горных пород и земной поверхности, непосредственно прилегающих к карьерам Гусевогорского месторождения, принадлежащих ОАО «ЕВРАЗ КГОК», в период с 2010 по 2014 гг. ИГД УрО РАН были выполнены серии GPS/ГЛОНАСС измерений спутниковыми GNSS-приёмниками по реперам геодинамического полигона и пунктам маркшейдерско-геодезической сети.

По разностям координат, полученных для реперов и пунктов сети в разных сериях измерений, определялись направление и величина векторов смещений, т.е. горизонтальные составляющие деформации поверхности прикарьерного массива пород.

Эти исследования выявили два вида современных геодинамических движений – *трендовые* (криповые) и *циклические*. Трендовые движения происходят в виде взаимных подвижек соседних структурных блоков массива горных пород с относительно постоянными скоростью и направлением в течение продолжительного промежутка времени, сопоставимого со сроком службы карьера. Циклические движения носят полигармонический характер и слагаются из многочисленных знакопеременных движений с разными частотами и амплитудами перемещения в циклах.

Анализ показал, что векторы собственных движений треугольных элементов (три смежных пункта сети образуют треугольник) группируются в кластеры (зоны), границы которых во многом совпадают с тектоническими структурами Гусевогорского месторождения. При этом границы кластеров позволяют выделить большие блоки массива горных пород с разными направлениями и амплитудами трендовых геодинамических движений.

Каждый крупный кластер приурочен к границам соответствующих карьеров, хотя имеются и исключения – северный борт главного карьера, а также перешеек между восточным бортом западного и западным бортом северного карьера. Один из кластеров приурочен к магистральному тектоническому нарушению в западном борту западного карьера.

Данные кластеры сохраняют свои границы при смене направления действия трендовых геодинамических движений, произошедших в период времени 2011–2014 гг. Однако знакопеременный характер трендовых и циклических деформаций, зафиксированный в ходе выполнения данной работы, даёт основания предполагать, что подобные миграции зон концентрации деформации с переполусовкой их по направлению действия случаются регулярно. В результате происходит «расшатывание» массива горных пород и потеря устойчивости бортов карьеров в областях концентрации деформаций, т.е. в зонах высокоградиентных деформаций.

О ВОПРОСЕ СЕРТИФИКАЦИИ МАРКШЕЙДЕРСКОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

МУСАЛЛЯМОВА Ю.Х., ГОЛУБКО Б.П.
Уральский государственный горный университет

Программное обеспечение – комплекс компьютерных программ, которые обеспечивают нормальную работу самого компьютера, обработку данных и их передачу другим устройствам обработки данных.

В силу специфики работы компьютерной техники выделяют две основные категории программного обеспечения:

– системные программы (управляют взаимодействием компонентов самого компьютера);

– прикладные программы (предназначены для решения внешних задач).

Компьютерные программы разрабатываются программистами, а потом тестируются и отлаживаются другими IT-специалистами, прежде чем они станут доступны для пользователей и начнётся их массовая эксплуатация (а в определённых случаях и сопровождение, для осуществления которого необходимо получить сертификат на программное обеспечение и его сопровождение).

В настоящее время актуальным является вопрос о сертификации программного обеспечения.

Сертификация – процедура подтверждения соответствия, посредством которой независимая от изготовителя (продавца, исполнителя) и потребителя (покупателя) организация удостоверяет в письменной форме, что продукция соответствует установленным требованиям.

Результатом выполнения процедуры сертификации является так называемый *сертификат соответствия* – документ, выданный по правилам системы сертификации для подтверждения соответствия сертифицированной продукции установленным требованиям.

Общие правовые основы сертификации продукции и услуг в Российской Федерации установлены Законом «О сертификации продукции и услуг», где определены права и ответственность в области сертификации органов государственного управления, а также изготовителей (продавцов, исполнителей) и других участников сертификации. В этом законе, в частности, указано, что сертификация проводится в целях:

– создания условий для деятельности предприятий, учреждений, организаций и предпринимателей на едином товарном рынке Российской Федерации, а также для участия в международном экономическом, научно-техническом сотрудничестве и международной торговле;

– содействия потребителям в компетентном выборе продукции;

– защиты потребителя от недобросовестности изготовителя (продавца, исполнителя);

– контроля безопасности продукции для окружающей среды, жизни, здоровья и имущества;

– подтверждения показателей качества продукции, заявленных изготовителем.

Также в законе определены два вида сертификации: *обязательная* и *добровольная*.

Обязательной сертификации подлежит продукция, включенная в отраслевые перечни, определяемые соответствующими нормативными документами. В соответствии с законодательством обязательной сертификации подлежит используемое программное обеспечение и базы данных программно-аппаратных комплексов, обеспечивающие защиту государственных информационных ресурсов и конфиденциальность информации, составляющей государственную тайну.

В данной статье хотелось бы обратить внимание на вопрос о программном обеспечении для решения маркшейдерских задач. Измеренные данные при открытой или подземной съёмке маркшейдер может обрабатывать при помощи прикладных программ (например, AutoCAD, Credo_DAT). С помощью этих программ он решает множество задач:

- импорт и обработка измеренных данных на ПК;
- уравнивание плановых (линейно-угловых) и высотных (систем и ходов геометрического, тригонометрического нивелирования) геодезических сетей разных форм;
- обработка тахеометрической съёмки с формированием топографических объектов и их атрибутов по данным полевого кодирования;
- проектирование опорных геодезических сетей, выбор оптимальной схемы сети, необходимых и достаточных измерений, подбор точности измерений;
- оформление в компоновщике чертежей и печать графических документов и планшетов;
- подсчёт объёмов горной массы и др.

Для маркшейдера одним из самых важных вопросов является анализ точности результатов измерений, поэтому необходимо производить проверку программного обеспечения, что в настоящее время не применяется. Необходимо знать точное значение средней квадратической погрешности измерений, точности, с которой подсчитан объём горной массы. Необходимо заниматься исследованием, проверкой и сертификацией прикладных маркшейдерских программ. Необходим комплекс мероприятий по проверке маркшейдерского ПО, а также одним из самых важных вопросов является выбор организации, которая будет осуществлять данное исследование и выдавать сертификат соответствия. Например, создание структурного подразделения в Ростехнадзоре, в котором специалисты в области маркшейдерского дела осуществляли бы проверку программного обеспечения, и прежде чем программа будет использована, производитель должен будет получить сертификат соответствия. Самым примитивным способом проверки любого программного обеспечения является метод сравнения полученных результатов с помощью программы и расчетом через геометрические фигуры, математические формулы.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КРИТЕРИЕВ ПРОЧНОСТИ

МУСАЛЛЯМОВА Ю.Х., ЖАБКО А.В.

Уральский государственный горный университет

Одной из основных проблем технических наук, а также инженерной практики является оценка прочности материалов. Окончательного разрешения данная проблема не получила до сих пор, а дискуссии по этому вопросу продолжают не одну сотню лет. Создание строгой теории прочности, объясняющей физическую картину разрушения и его причины, вряд ли представляется возможным, прежде всего в связи со сложностью учёта и описания неоднородности и анизотропии реального материала. Поэтому на практике часто используются так называемые *технические критерии разрушения* или прочности. *Критерий прочности* представляет собой развернутую запись предельного условия прочности в виде явно или неявно заданной зависимости напряжённого состояния материала и его механических свойств. По способу получения критерии прочности можно разделить на две большие группы: *аналитические* и *эмпирические*. Известны аналитические критерии прочности – Треска (Сен-Венана), П.П. Баландина, Л.Я. Парчевского, А.Н. Шашенко и др. К наиболее популярным эмпирическим относятся критерии О. Мора, З.Т. Бенявского, Хоека-Брауна и другие.

Рассмотрим один из широко распространенных эмпирических критериев прочности – *критерий Хоека-Брауна*, который для массива пород может быть представлен в виде [1]:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{сж} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{сж}} + s \right)^a, \quad (1)$$

где σ_1, σ_3 – главные напряжения; m_b – константа Хоека-Брауна для породного массива; $\sigma_{сж}$ – предел прочности горных пород на одноосное сжатие; s, a – постоянные, учитывающие генезис и состояние (сплошность) породного массива.

Как известно, предел прочности на одноосное сжатие может быть выражен через сцепление и угол внутреннего трения зависимостью:

$$\sigma_{сж} = 2C \operatorname{tg} \omega = 2C \operatorname{tg} (\pi/4 + \varphi/2), \quad (2)$$

где φ – угол внутреннего трения; C – сцепление горных пород.

Таким образом, используя выражение (2) для ненарушенного (не трещиноватого) массива, критерий (1) можно записать в следующем виде [1]:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + 2C \operatorname{tg} \omega \sqrt{1 + \frac{m_1 \sigma_3}{2C \operatorname{tg} \omega}}, \quad (3)$$

где $4 \leq m_1 \leq 33$ – постоянная.

Рассмотрим аналитические критерии П.П. Баландина и Л. Я. Парчевского–А.Н. Шашенко [1]. В качестве механических характеристик в оба критерия входят пределы прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ и растяжение σ_p , а эквивалентное напряжение выражается через их отношение $\psi = \sigma_p / \sigma_{сж}$. Используя выражение (2) для идеально хрупких материалов ($\psi = 0$), критерий П.П. Баландина можно представить в виде:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + 2C \operatorname{tg} \omega \sqrt{\frac{(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{2C \operatorname{tg} \omega}}. \quad (4)$$

Аналогично критерий Л.Я. Парчевского–А.Н. Шашенко будет иметь вид:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + 2C \operatorname{tg} \omega \sqrt{\frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2C \operatorname{tg} \omega}}. \quad (5)$$

Для идеально пластичных материалов ($\psi = 1$) оба критерия совпадают и имеют вид:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{\text{сж}} = 2C \operatorname{tg} \omega. \quad (6)$$

В работах [2, 3] Жабко А.В. получил и проанализировал критерий прочности:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + 2C \sqrt{1 + \frac{\operatorname{tg} \varphi \sigma_1}{C}}. \quad (7)$$

Для идеально пластичных пород критерий (7) совпадает с критерием Треска (Сен-Венана), а для несвязных пород имеет вид: $\sigma_1 = [1 + \sin \varphi] \sigma_3$.

На рисунке 1 для наглядности представлены критерии прочности (4, 5, 6, 7).

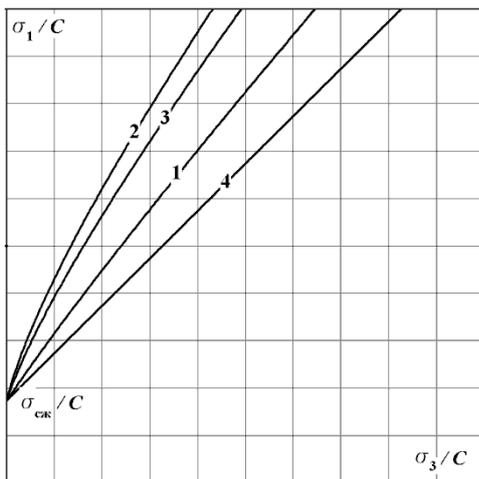


Рисунок 1 – Сравнение критериев прочности:
1 – критерий Жабко (7); 2 – Баландина (4); 3 – Парчевского–Шашенко (5); 4 – критерий (6)

Несмотря на то, что критерий (3) является эмпирическим, критерии (4, 5) получены при алгебраическом преобразовании энергии формоизменения, а критерий (7) – моделированием разрушения однородного вертикального откоса, они имеют идентичную структуру. Их общую зависимость можно представить в виде:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + 2C \sqrt{f(\sigma_1, \sigma_3)}, \quad (8)$$

где $f(\sigma_1, \sigma_3)$ – линейная функция главных напряжений.

Заметим, что подкоренное выражение (8) представляет собой квадрат тангенса угла наклона критической площадки скольжения к направлению минимального напряжения σ_3 . Таким образом, угол наклона критической площадки скольжения не является постоянной величиной, а зависит от уровня напряженного состояния.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шашенко А.Н., Ковров А.С. Оценка устойчивости естественных и искусственных породных откосов // Геотехническая механика. № 91. С. 43–54.
2. Жабко А.В. Напряженное состояние земной коры // Изв. УГГУ. 2014. Вып. 3(35). С. 57–60.
3. Жабко А.В. Условие прочности горных пород // Изв. УГГУ. 2014. Вып. 4(36). С. 24–28.

**ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ
ВЫСОКОТОЧНОГО СПУТНИКОВОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ
ДЛЯ МАРКШЕЙДЕРСКОГО КОНТРОЛЯ
ОСЕДАНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
НА НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ**

Шмонин В.И.¹, Шмонин А.Б.²

¹Иркутский государственный технический университет

²Уральский государственный горный университет

Практика маркшейдерских наблюдений за деформациями земной поверхности на нефтегазовых месторождениях показывает, что для определения вертикальных деформаций (оседаний) земной поверхности используется высокоточное геометрическое нивелирование II класса, а горизонтальные деформации определяются по результатам спутниковых GNSS измерений.

До недавнего времени спутниковые GNSS-приёмники имели точность определения высот точек в 2–3 раза меньшую, чем точность определения плановых координат тех же точек, поэтому спутниковое нивелирование могло быть по точности сопоставимо с геометрическим нивелированием III класса.

Сейчас появились спутниковые GNSS-приёмники нового поколения (например *TrimbleR8*, *TrimbleR10*, *JAVADTriumph-1*), у которых точность определений в режиме высокоточной статики составляет $M_L = \pm(3\text{мм}+0,1\text{мм/км})$ для плановых координат и $M_H = \pm(3,5\text{мм}+0,4\text{мм/км})$ для высот точек. Это в сравнении с лучшими GNSS-приёмниками предыдущего поколения соответственно в 2 раза точнее в определении плановых координат и в 1,5 раза точнее в определении высот точек.

Для геодинимических полигонов, создаваемых на нефтегазовых месторождениях для мониторинга деформаций земной поверхности, характерны большая протяжённость линий нивелирования (от 2–3 до 10 км и более) и труднопроходимая местность, поэтому геометрическое нивелирование по профильным линиям является очень трудоёмким и может быть выполнено только в благоприятные периоды года и суток в условиях благоприятной погоды. Высокоточное спутниковое нивелирование GNSS-приёмниками возможно выполнять практически в любое время года и суток и при любой погоде, но необходимо, чтобы по точности оно было сопоставимо с геометрическим нивелированием.

Для сравнения возможностей высокоточного нивелирования современными GNSS-приёмниками выполним сравнительные расчёты точности по профильной линии реперов длиной 10 км между опорными реперами. Расстояния между рабочими реперами в этой линии равно 0,5 км. Примем, что на опорных реперах в начале и конце профильной линии установлены спутниковые GNSS-приёмники-базы, а GNSS-приёмник-ровер выполняет измерения на рабочих реперах линии. Результаты расчётов средней квадратической ошибки (СКО) определения высоты рабочих реперов GNSS-приёмником-ровером приведены в таблице 1.

Чтобы выполнить аналогичные расчёты для геометрического нивелирования II класса, найдём согласно [1] СКО определения превышений на станции:

$$m_h = (\mu_{\text{пред}} \sqrt{2l_{\text{км}}})/k_3,$$

где m_h – СКО определения превышения на станции, $l_{\text{км}}$ – расстояние от нивелира до рейки (рекомендуемое по инструкции [2]), км, $\mu_{\text{пред}}$ – коэффициент предельной погрешности для данного класса нивелирования (из инструкции [2]), k_3 – переходный коэффициент от предельной погрешности к СКО.

Принимая согласно инструкции [2] для нивелирования II класса значения $\mu_{\text{пред}} = 5$ мм, $l_{\text{км}} = 0,065$ км, $k_3 = 2$, получим $m_h = 0,9$ мм.

Найдём СКО высотных отметок рабочих реперов (m_H) для геометрического нивелирования согласно [1]:

$$m_H = m_h \sqrt{F},$$

где $F = K(N - K)/N$, K – число станций нивелирования от начального опорного репера до определяемого K -го рабочего репера, N – число всех станций нивелирования между начальным и конечным опорными реперами.

Примем, что на километр нивелирного хода II класса будет приходиться в среднем 10 станций (принимая $2l_{км} = 0,1$ км), тогда на весь ход длиной в 10 км общее число станций $N = 100$.

Выбирая число станций нивелирования K от начального опорного репера до интересующего нас рабочего репера, найдём ожидаемую СКО высотной отметки этого репера, принимая $m_h = 0,9$ мм. Расчёты СКО высотных отметок рабочих реперов профильной линии приведены в таблице 1. В ней же приведены разности СКО высот рабочих реперов, найденных для высокоточного спутникового нивелирования и геометрического нивелирования II класса.

Таблица 1 – Сравнение точности определения высот рабочих реперов высокоточным спутниковым и геометрическим нивелированием II класса

| | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Расстояние по профильной линии, км | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | 6,0 | 7,0 | 8,0 | 8,5 | 9,0 |
| GNSS-ровер, СКО, мм | 3,7 | 3,9 | 4,1 | 4,3 | 4,7 | 5,1 | 5,5 | 5,1 | 4,7 | 4,3 | 4,1 | 3,9 |
| K | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 85 | 90 |
| $N - K$ | 95 | 90 | 85 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 | 15 | 10 |
| Нивелирование II класса СКО, мм | 2,0 | 2,7 | 3,2 | 3,6 | 4,1 | 4,4 | 4,5 | 4,4 | 4,1 | 3,6 | 3,2 | 2,7 |
| Разность СКО, мм | 1,7 | 1,2 | 0,9 | 0,7 | 0,6 | 0,7 | 1,0 | 0,7 | 0,6 | 0,7 | 0,9 | 1,2 |

Из таблицы 1 видно, что ожидаемые СКО высотных отметок рабочих реперов для спутникового нивелирования немного выше, чем для нивелирования II класса. Начиная с расстояния 1,5 км от опорного репера, они различаются меньше чем на 1 мм, что несущественно для точности общего мониторинга оседаний земной поверхности на нефтегазовых месторождениях.

Выводы.

1. Высокоточное спутниковое нивелирование сопоставимо по точности с геометрическим нивелированием II класса, начиная с расстояний, примерно 1,5 км.
2. Для целей общего маркшейдерского мониторинга оседаний земной поверхности на нефтегазовых месторождениях возможна замена геометрического нивелирования II класса высокоточным спутниковым нивелированием.
3. Для высокоточного спутникового нивелирования необходимо применять спутниковые GNSS-приёмники нового поколения с повышенной точностью измерений.
4. Замена геометрического нивелирования II класса высокоточным спутниковым нивелированием значительно снизит трудоёмкость измерений при их сопоставимой точности, повысит оперативность мониторинга деформаций земной поверхности на нефтегазовых месторождениях за счёт малой трудоёмкости спутниковой технологии нивелирования, а также независимости спутниковых измерений от погодных условий, времени суток и года.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голубко Б.П., Гордеев В.А., Яковлев В.Н. Маркшейдерия. Ч.I. Маркшейдерские работы на карьерах и разрезах: учеб.ное пособие. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. 210 с.
2. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. М.: Недра, 1974. 160 с.

МЕТОД ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

ЮСУПОВ А.А., ШМОНИН А.Б.

Уральский государственный горный университет

Важным направлением использования спутниковых радиолокационных снимков земной поверхности является измерение вертикальных смещений этой поверхности. Технология, позволяющая проводить такие измерения, называется *дифференциальной интерферометрией*. Потенциальная точность измерения смещений вдоль линии луча радиолокатора составляет доли используемой длины волны, что означает возможность фиксировать смещения земной поверхности до 1–2 мм.

Такая высокая точность стала возможной благодаря появлению нового поколения радиолокационных спутников с высоким разрешением снимков. К таким относится спутник *TerraSAR-X*, разработанный Немецким аэрокосмическим центром (*DLR*) и компанией *EADS Astrium GmbH*.

Этот спутник был запущен с космодрома Байконур и выведен на круговую солнечно-синхронную орбиту высотой 514 км с наклоном $97,44^\circ$. Спутник оснащён новым радаром с синтезированной апертурой, позволяющим выполнять радиолокационную съёмку земной поверхности с пространственным разрешением до 1 м, что делает спутниковую систему *TerraSAR-X* одним из наиболее совершенных инструментов дистанционного зондирования Земли. Радар выполняет съёмку земной поверхности в X-диапазоне длин волн (3,1 см) с изменяемой поляризацией излучения (HH, VH, HV, VV), в диапазоне съёмочных углов от 20° до 55° (рисунок 1). Размер радиолокационного снимка составляет 10×5 км при разрешении 1 м и 10×10 км при разрешении 2 м. Периодичность съёмки одного и того же участка земной поверхности – 11 суток, подцикл – 2,5 суток. Расчётный срок работы спутника на орбите – около 5 лет.

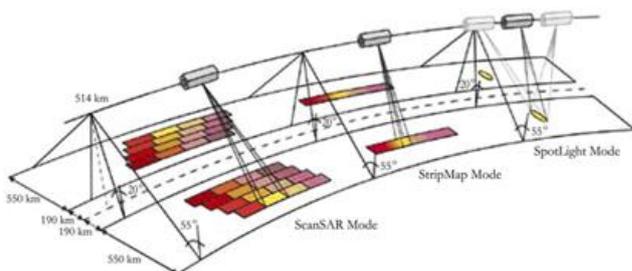


Рисунок 1 – Схема получения радиолокационных снимков земной поверхности спутником *TerraSAR X*

Областями применения данных дистанционного зондирования, полученных со спутника *TerraSAR X*, являются: создание цифровых моделей рельефа (ЦМР) и цифровых моделей местности (ЦММ) высокой точности (2–4 м по высоте); создание и обновление топографических и специальных карт, вплоть до масштаба 1:10000; объектов транспортной инфраструктуры (трубопроводы, железные дороги и т. д.); высокоточное

наблюдение за состоянием различных строений, инженерных сооружений и т.д.; всепогодный мониторинг последствий природных и антропогенных катастроф (половодья, землетрясения, цунами, оползни, техногенные аварии и т.д.); оценка сейсмической опасности, прогнозирование землетрясений, извержений вулканов.

Считается, что точность измерения вертикальных смещений рельефа может быть минимум на порядок выше точности измерения рельефа, поскольку при вычитании моделей рельефа некоторые постоянные ошибки компенсируются. Это вытекает из формулы определения разности интерферометрической фазы:

$$\Delta = \frac{4\pi}{\lambda} B \cos(\theta_0 - \alpha) \frac{z}{r_0 \sin \theta_0} - \frac{4\pi}{\lambda} \partial r_{\text{подв}},$$

где z – высота над опорной поверхностью, $\partial r_{\text{подв}}$ – проекция подвижки рельефа на направление съёмки, λ – длина волны радиолокатора. Отсюда видно, что для изменения фазы на 2π (т.е. для формирования одной интерференционной полосы) требуется либо изменение высоты рельефа z на величину порядка λ_0/B , либо подвижка рельефа на значительно меньшую величину $\lambda/2$. Иными словами, фазовая картина обладает высокой чувствительностью к изменению рельефа местности за период между съёмками. Это же соотношение указывает на связь разностной фазы и величины подвижки рельефа – подвижка на 1 см соответствует изменению фазы на $\lambda/4\pi$ рад.

В последние годы при мониторинге деформаций земной поверхности на ряде нефтегазовых месторождений проведены эксперименты по применению *метода дифференциальной космической радиолокационной интерферометрии* (метод РСА интерферометрии). Главными достоинствами этого метода мониторинга вертикальных деформаций земной поверхности является возможность охвата всей территории нефтегазового месторождения и относительно небольшие затраты на выполнение работ по сравнению с традиционными методами маркшейдерских наблюдений. Важным преимуществом спутниковых радиолокационных снимков земной поверхности является независимость их получения от наличия облачного покрова и времени суток.

В научно-исследовательском институте ВНИИГАЗ (Москва) совместно с ОАО «Компания «Совзонд» выполнен проект по мониторингу смещений земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов с помощью комплекса космических и геодезических методов. Здесь же проведена работа по мониторингу деформаций зданий и сооружений в городе Новый Уренгой методом интерферометрии постоянных уголкового отражателей по снимкам *TerraSAR-X*. Показана возможность обнаружения миллиметровых смещений за годовой период. Особенностью этого проекта являлось широкое использование уголкового отражателей с треугольными гранями из оцинкованной жести со стороной 60 см, обеспечивающих отношение сигнал/шум > 25 дБ и, по мнению авторов, миллиметровую точность измерения смещений подстилающей поверхности.

В Югорском НИИ информационных технологий (Ханты-Мансийск) методом дифференциальной интерферометрии с использованием опорных ЦМР высокого разрешения построены карты долговременных смещений (до 2 лет) на районы интенсивной нефтедобычи ХМАО и ЯНАО. Оценка точности производилась с использованием значений смещений, измеренных высокоточными наземными методами на пунктах геодинамических полигонов.

Выводы.

1. Появление современных радиолокационных спутников, оснащённых новыми радарными с синтезированной апертурой и позволяющих выполнять радиолокационную съёмку земной поверхности с режимом сверхвысокого разрешения (1–3 м), таких как *TerraSAR-X*, *TanDEM-X*, *CosmoSkiMed* 1–4, *Radarsat-2*, открывает новые возможности для применения метода дифференциальной интерферометрии для мониторинга деформаций земной поверхности.

2. Для достижения миллиметровой точности определения вертикальных смещений земной поверхности по радиолокационным снимкам рабочие реперы на геодинамических полигонах надо оборудовать специальными отражателями радиолокационного сигнала.

3. Данный метод является перспективным, но его применение сдерживается отсутствием надёжных методик, которые обеспечивали бы гарантированную точность определения вертикальных смещений земной поверхности в 1–2 мм.