

**МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ И
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СМЕЩЕНИЙ
ГОРНОГО МАССИВА МЕТОДОМ ФИЗИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ RTK-МОНИТОРИНГА**

Сафарова Мафтуна Давроновна

Навоийский государственный горно-технологический университет

(Докторант специальности 04.00.10 – Геотехнология

(открытая, подземная и строительная))

e-mail: maftunasafarova2806@gmail.com

Аннотация. В работе изложена методика проведения измерений смещений горного массива с использованием разработанной RTK-геодезической системы, а также методика экспериментальных исследований, основанная на физическом моделировании взрывного разрушения в сочетании с высокоточным геодезическим мониторингом. Методика измерений включает восемь этапов — от подготовки RTK-модуля до камеральной обработки — и обеспечивает автоматическую регистрацию координат контрольных маркеров, передачу данных в облачную базу и визуализацию в веб-интерфейсе RTK Tracker. Экспериментальные исследования выполнены на геометрически подобных физических моделях из пескобетонной смеси, спроектированных в среде КОМПАС-3D с контролем параметров бурения и заряжания. Подтверждена возможность количественной регистрации трёхмерных векторов смещения с сантиметровой точностью. Получены экспериментальные данные о ширине развала,

смещении массы и контуре забоя, а также подтверждена применимость закона затухания смещений с коэффициентом $n = 1,2-2,5$.

Ключевые слова. физическое моделирование, RTK Tracker, контрольные маркеры, вектор смещения, пескобетонная модель, геометрическое подобие, буровзрывные работы, экспорт данных, закон затухания, фрагментация массива.

Введение. Методика проведения измерений смещений горного массива разработана с целью получения достоверных количественных характеристик перемещения рудной массы при ведении БВР. В основе методики лежит принцип высокоточного определения пространственных координат контрольных геодезических маркеров до и после взрывного воздействия с последующим вычислением векторов смещения. Разработанная RTK-система обеспечивает непрерывный сбор координат, их передачу в облачную базу данных и визуализацию в веб-интерфейсе в режиме, близком к реальному времени (рис. 1). Настоящий тезис посвящён изложению методики проведения измерений и методики экспериментальных исследований, объединяющей физическое моделирование взрывного разрушения и геодезический RTK-мониторинг, а также полученным экспериментальным результатам.

Основная часть. Как показано на рис. 1, система позволяет отображать положение маркеров на спутниковой карте с высокой детализацией и представлена панель управления, обеспечивающая выполнение измерений, анализ данных и экспорт результатов. Методика проведения измерений включает восемь основных этапов, представленных в табл. 1: подготовку RTK-модуля, антенны, аккумулятора и ноутбука/смартфона; подключение ESP32 и GNSS-модуля LG290P; подключение к Wi-Fi или мобильному интернету; получение RTK-поправок через NTRIP; запуск веб-интерфейса RTK

Tracker; выполнение измерений точек или контура; экспорт результатов; камеральную обработку. Как следует из табл. 1, процесс начинается с подготовки оборудования и завершается камеральной обработкой



данных, а особенностью методики является автоматизация большинства этапов, включая передачу и хранение данных в облачной среде.

Рис. 1. Веб-интерфейс RTK Tracker на спутниковой карте и панель управления системой RTK Tracker

Таблица 1

Этапы проведения измерений с использованием RTK-комплекса

Этап	Содержание работ	Результат
1	Подготовка RTK-модуля, антенны, аккумулятора и ноутбука/смартфона	Система готова к включению
2	Подключение ESP32 и GNSS-модуля LG290P	Приём координат от GNSS-модуля
3	Подключение к Wi-Fi или	Передача данных в облачную

	мобильному интернету	базу
4	Получение RTK-поправок через NTRIP	Повышение точности позиционирования
5	Запуск веб-интерфейса RTK Tracker	Отображение положения на карте
6	Выполнение измерений точек или контура	Формирование массива координат
7	Экспорт результатов	Получение файлов CSV, GeoJSON, GPX
8	Камеральная обработка	Анализ координат, расстояний, площади и смещений

На первом этапе осуществляется подготовка аппаратного комплекса, включающего GNSS-антенну, RTK-приёмник, микроконтроллер ESP32 и источник питания; подключение устройства к ноутбуку. После включения выполняется подключение к сети Wi-Fi или мобильному интернету, инициализация соединения с сервером Firebase и установление соединения с NTRIP-сервером для получения RTK-коррекций. Получение корректирующих данных RTCM обеспечивает переход системы в режим RTK Fix, при котором достигается сантиметровая точность позиционирования.

На контролируемом участке карьера формируется сеть геодезических маркеров, размещаемых на уступах, бортах карьера, в зоне предполагаемого перемещения рудной массы или в контрольных

точках массива. До проведения взрывных работ фиксируются координаты каждого маркера:

$$P_i(t_0) = (x_i(t_0), y_i(t_0), z_i(t_0)). \quad (1)$$

Измерения выполняются серией наблюдений с последующим усреднением, что снижает влияние случайных погрешностей; координаты автоматически отображаются в веб-интерфейсе RTK Tracker (рис. 1) и сохраняются в базе данных. После завершения БВР и стабилизации массива выполняется повторное измерение координат:

$$P_i(t_1) = (x_i(t_1), y_i(t_1), z_i(t_1)). \quad (2)$$

Вектор смещения определяется как разность координат:

$$\Delta P_i = P_i(t_1) - P_i(t_0). \quad (3)$$

Пример визуализации результатов измерений контура приведён на рис. 2: зафиксировано 29 точек, маршрут 108,99 м, суммарная длина 109,40 м, площадь 772,7 м². Дополнительно определяются горизонтальное и вертикальное смещение и направление перемещения, что позволяет получить полный трёхмерный анализ движения массива. Контроль достоверности результатов осуществляется на основе условия $d_i \geq k\sigma_d$ (формула 3.33), где $k = 3-5$, $\sigma_d \approx 1,5-3$ см; таким образом, минимально фиксируемое смещение составляет порядка 5–10 см, что значительно ниже типичных смещений при БВР.



Рис. 2. Результаты испытания: 29 точек, маршрут 108.99 м, суммарная длина 109.40 м, площадь 772.7 м²

Разработанная система обеспечивает автоматическую запись координат и их экспорт в различные форматы: GeoJSON — для ГИС-систем, CSV — для Excel и Python, GPX — для GPS-устройств, O'lchov CSV — специализированный формат измерений. Обработка данных выполняется с использованием табличных редакторов. Система может функционировать на мобильных устройствах через браузер, что позволяет проводить измерения непосредственно в полевых условиях без стационарного компьютера. Система обеспечивает полный цикл работы с данными — от измерения до анализа и экспорта.

Экспериментальные исследования направлены на установление закономерностей взрывного разрушения горного массива и количественную оценку параметров смещения его элементов на основе интеграции физического моделирования и высокоточного геодезического мониторинга. Исследование методологически обосновано функциональной цепочкой: Геометрия → Энергия взрыва → Разрушение → Смещение → Измерение (RTK) → Анализ, при которой эксперимент выступает связующим звеном между физическими процессами разрушения и их цифровым описанием.

Проектирование экспериментальной модели выполнялось в среде КОМПАС-3D.

Геометрия модели задаёт начальные условия напряжённого состояния массива:

$$\sigma(r, t) = f(Q, r, a, b, E, \rho). \quad (4)$$

Физическая модель изготавливалась из пескобетонной смеси; дозирование компонентов выполнялось с точностью до 1 г, что обеспечило однородность структуры. Формирование блока осуществлялось послойно: нижний слой — песчаная подушка (~2 см, 250 г); основной массив — ~10,3 кг пескобетона; итоговая высота блока — ~13 см. Высота определена из условия подобия:

$$h_{\text{модель}} = k_l \cdot h_{\text{натура}}, \quad k_l \approx 1:100\text{--}1:150, \quad (5)$$

где $h_{\text{модель}}$ — высота физической модели; $h_{\text{натура}}$ — высота реального уступа; k_l — коэффициент геометрического подобия. Для имитации природной цементации верхний слой обрабатывался раствором жидкого стекла (50 мл воды + 50 мл жидкого стекла), что позволило увеличить прочность поверхности и приблизить модель к реальному массиву. Контроль геометрии выполнялся инструментально; измеренный угол откоса соответствует проектному: $\alpha = 35\text{--}45^\circ$. Данный параметр напрямую влияет на направление смещения — угол направления смещения маркера α_i относительно оси X определяется формулой.

Перед взрывом выполнялись подготовка модели и разметка контрольных точек; маркеры размещались вдоль линии откоса, в центральной зоне и в зоне предполагаемого максимального воздействия. Для каждой точки фиксировались координаты до взрыва:

$$P_i(t_0) = (x_i, y_i, z_i) \quad (6)$$

и после взрыва, что позволяет определить вектор смещения

$$\Delta P_i = P_i(t_1) - P_i(t_0) \quad (7)$$

и модуль смещения. Сверление шпуров выполнялось по проектной схеме. Глубина шпуров $H = 100$ мм, фактическое значение $H_{\text{факт}} = 100,1$ мм, погрешность $\delta = 0,1$ %, что подтверждает высокую точность эксперимента. Заряжание выполнялось вручную при глубине установки заряда $\sim 80\text{--}90$ % глубины скважины, одинаковом положении зарядов и идентичных условиях инициирования.

Распределение напряжений при заряжании описывается зависимостью

$$\sigma(r, t, z) = f(Q, r, a, b, E, \rho), \quad (8)$$

где $\sigma(r, t, z)$ — напряжения в массиве, МПа; Q — масса заряда, кг; r — расстояние от заряда до точки, м; a, b — параметры сетки шпуров, м; E — модуль упругости, МПа; ρ — плотность материала, кг/м³.

Наблюдения показали последовательное срабатывание зарядов, направленное движение массы и формирование зоны фрагментации. Движение частиц описывается как

$$u(r, t) = f(A, r, \sigma_c, E, \rho), \quad (9)$$

где A — энергия взрыва; σ_c — предел прочности породы, МПа; E — модуль упругости, МПа; ρ — плотность. После взрыва фиксировалось состояние модели. По результатам инструментальной фиксации получены экспериментальные данные: ширина развала — 33–41 см; смещение массы — 3–14 см; контур забоя — 30–31,5 см. Смещения подчиняются закону затухания с коэффициентом $n = 1,2\text{--}2,5$, что означает максимальные смещения в зоне заряда, быстрое уменьшение с расстоянием и локализацию энергии.

Ключевым научным результатом является то, что предложенная методика позволяет рассматривать взрывной процесс не только как физическое явление разрушения, но и как измеряемую и математически описываемую систему перемещений горного массива. В отличие от традиционных подходов, ограниченных качественным изучением дробления, метод РТК обеспечивает высокоточные (мм–см) измерения перемещений, фиксирует пространственные (3D) векторы, формируя набор данных, пригодный для статистического и математического анализа, и позволяет выполнять пострасчётную интеграцию с геомеханическими моделями.

Закключение. Разработана методика проведения измерений смещений горного массива, основанная на определении координат контрольных маркеров до и после взрывного воздействия и позволяющая рассчитывать компоненты смещения по осям X , Y , Z , полный модуль перемещения, горизонтальную составляющую и направление вектора движения массива. Экспериментально подтверждена возможность применения РТК-подхода в сочетании с физическим моделированием взрывного разрушения: обеспечены геометрическое подобие модели, контроль глубины шпуров, положения зарядов и фиксация контрольных маркеров, что позволило получить воспроизводимые данные о характере разрушения и перемещения взорванной массы. Установлено, что применение РТК-геодезической системы в сочетании с физическим моделированием позволяет количественно зафиксировать трёхмерные векторы смещения элементов массива с сантиметровой точностью, обеспечивая переход от качественной оценки развала к формированию достоверной экспериментальной базы для калибровки геомеханических моделей и оптимизации параметров БВР.

Список литературы

1. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. – Vienna: Springer, 2008. – 516 p.
2. Quectel Wireless Solutions. LG290P GNSS Module Datasheet. – Rev. 1.3. – Shanghai, 2024. – 62 p.
3. Espressif Systems. ESP32 Technical Reference Manual. – Rev. 5.3. – Shanghai, 2024. – 723 p.
4. RTCM Special Committee 104. RTCM Standard 10403.3: Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services. – Arlington: RTCM, 2016.