

## ОСОБЕННОСТИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ В ГОРНОЙ МЕСТНОСТИ

С.Г. Бычков

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация.** Выполнение гравиметрических исследований в условиях расчлененного рельефа местности связано с рядом определенных трудностей как на этапе проведения полевых работ, так и при обработке и интерпретации полученных данных. При интерпретации гравиметрических данных в условиях расчлененного рельефа местности необходимо тщательно учитывать плотность промежуточного слоя. Трансформации поля, разделение его на составляющие и выделение локальных аномалий осуществляется с данными, пересчитанными на горизонтальную плоскость. Для количественной интерпретации данных и построения геолого-геофизических моделей среды необходимо использовать данные, измеренные на рельефе, а сам рельеф включать в исходную геологическую модель.

**Ключевые слова:** гравиразведка, расчлененный рельеф, трансформация, интерпретация.

Выполнение гравиметрических исследований в условиях расчлененного рельефа местности связано с рядом определенных трудностей как на этапе проведения полевых работ, так и при обработке и интерпретации полученных данных [1, 6]. Сложные ортогидрографические условия в большинстве случаев не позволяют выполнить кондиционную площадную съемку, что затрудняет интерпретацию данных. Необходимость тщательного вычисления поправок за влияние рельефа местности и выбор плотности промежуточного слоя вносят сложности при обработке полевых материалов. Кроме того, в горных районах аномалии от искомым геологических объектов (особенно залегающих на незначительных глубинах, сравнимых с перепадом высот рельефа), искажены за счет изменения расстояния от источника поля до пунктов наблюдений. Особенно разновысотность гравиметрических пунктов необходимо учитывать при трансформациях поля с использованием скользящих окон, которые предусматривают горизонтальность поверхности наблюдений.

Некоторые особенности интерпретации гравиметрических данных в условиях расчлененного рельефа местности рассмотрим на примере гравиметрической съемки, выполненной в горной местности с множеством саев и промоин, с резкими перепадами высот около 600 м (рис. 1).

Полевые работы выполнялись высокоточными компьютеризированными гравиметрами AUTOGRAV CG-6. Для проведения топографо-геодезической съемки использовались GPS-приемники «Trimble R8». Среднеквадратическая погрешность определения аномалии силы тяжести составила  $\pm 0.029$  мГал.

При обработке полевых гравиметрических данных в качестве параметра поправки за промежуточный слой входит плотность этого слоя – толщи горных пород от поверхности Земли до уровня приведения. Рекомендуется плотность пород промежуточного слоя выбирать таким образом, чтобы вычисленные аномалии силы тяжести наименее коррелировали с рельефом местности [2].

Плотность промежуточного слоя, наиболее близкая к истинной плотности пород слагающих рельеф, определялась методом Неттлетона. Для каждого профиля строилось семейство кривых аномалий Буге с различной плотностью промежуточного слоя и из них выбрана та, которая меньше всего коррелирует с рельефом. На основании анализа графиков аномалий определена средняя («истинная») плотность промежуточного слоя.

Для примера на рис. 2 представлены графики аномалий Буге по одному из профилей, вычисленные с плотностями в диапазоне от  $2.0 \text{ г/см}^3$  до  $3.0 \text{ г/см}^3$ .

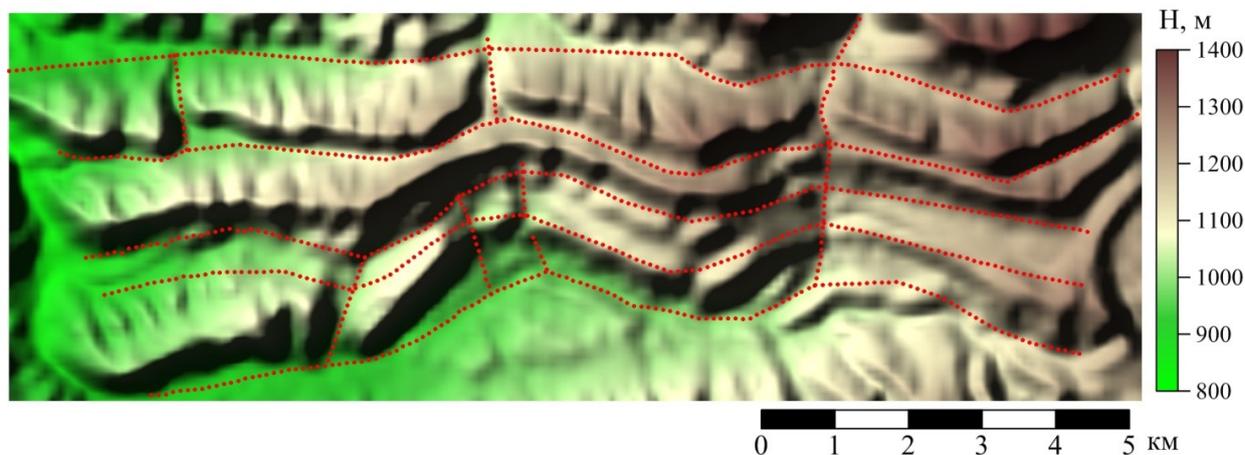


Рис. 1. Рельеф участка (красными точками показаны пункты наблюдений)

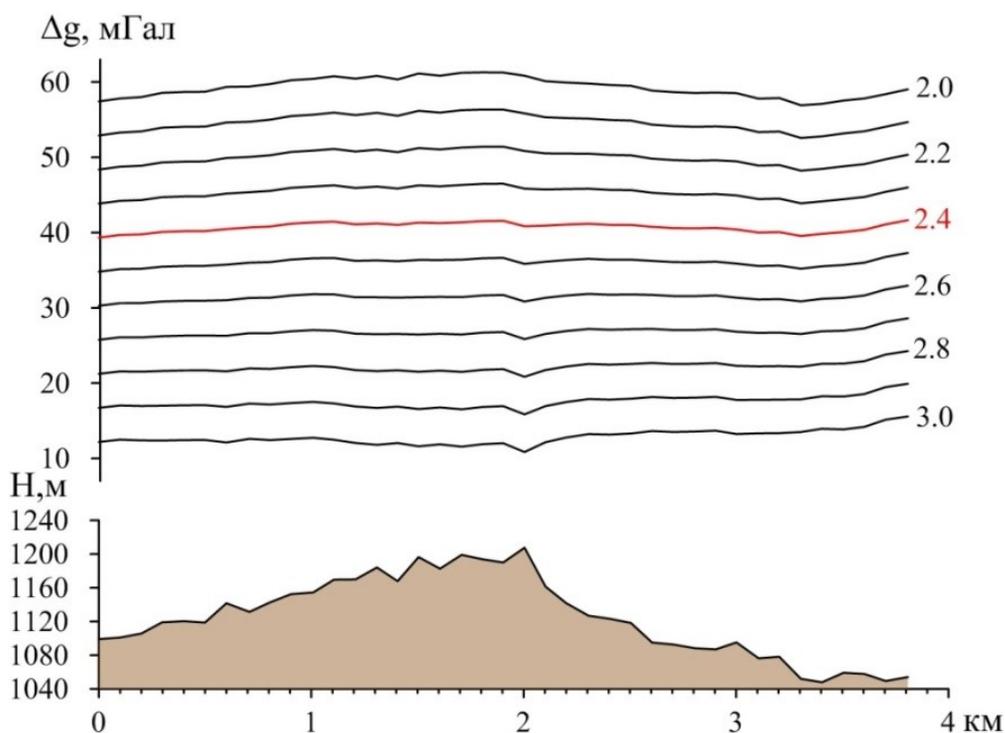


Рис. 2. Подбор плотности промежуточного слоя методом Неттлетона (параметр кривых аномалий силы тяжести – значение плотности в  $\text{г/см}^3$ )

Анализ графиков показал, что наименьшую коррелируемость с рельефом имеет график аномалий, вычисленный с плотностью  $2.40 \text{ г/см}^3$  с введенной поправкой за влияние рельефа. Поле, вычисленное с этой плотностью промежуточного слоя, использовано в дальнейшей интерпретации.

Перепад высот рельефа на данной площади составляет более 600 м. Измеренные значения гравитационного поля в условиях резкорасчлененного рельефа неизбежно содержат искажения, обусловленные влиянием «геометрического фактора» – изменением расстояний между возмущающими объектами и пунктами наблюдений. Приведение потенциальных полей, измеренных в условиях горного рельефа местно-

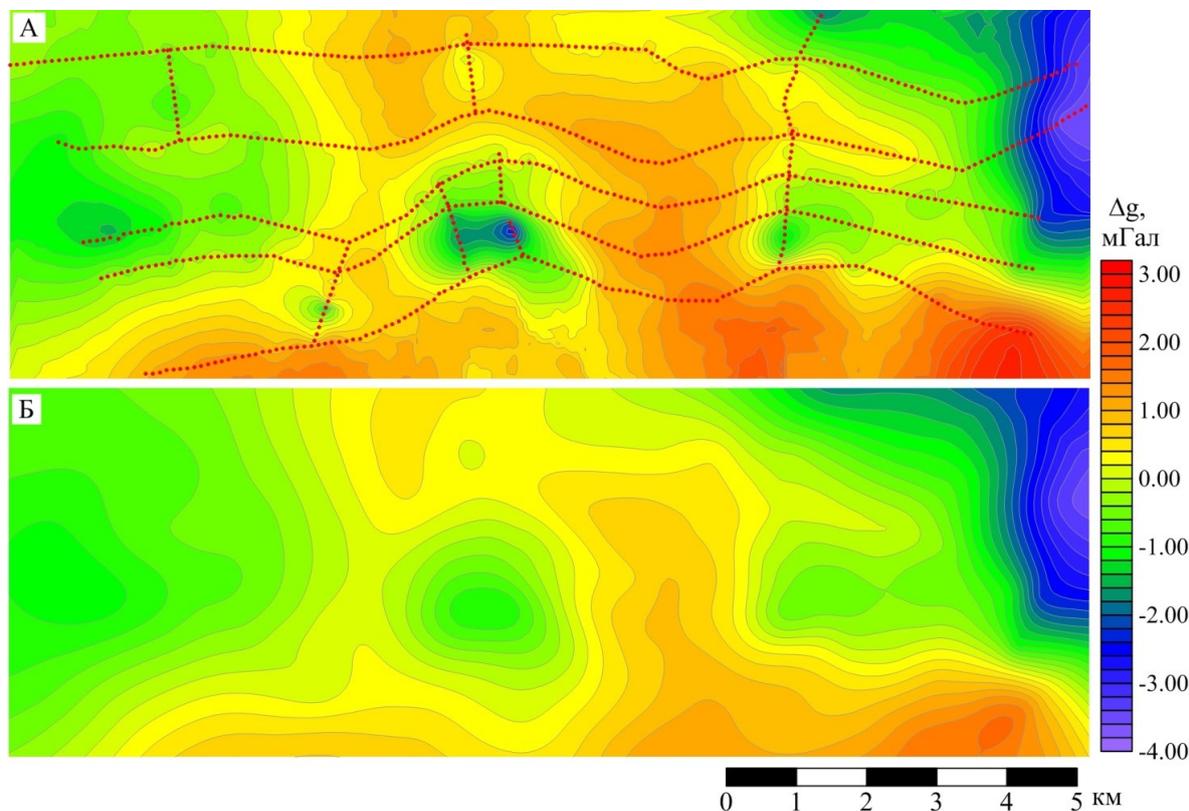
сти, к горизонтальной поверхности наблюдений во всех случаях является весьма полезным для последующей интерпретации материалов, так как приводит к упрощению морфологии поля и к устранению смещений эпицентров аномалий относительно возмущающих объектов.

Пересчет аномалий силы тяжести на горизонтальную плоскость произведен аппроксимационным способом, который является весьма эффективным инструментом решения целого ряда геолого-геофизических задач [3]. Суть способа заключается в представлении исходных данных функциями заданного класса с заданной степенью точности.

В процессе решения задачи исходное гравитационное поле, измеренное в произвольно расположенных точках на рельефе местности, аппроксимировано полем, обусловленным совокупностью сфер (точечных масс), расположенных ниже поверхности наблюдений. Аппроксимация измеренных аномалий силы тяжести осуществлялось суммарным полем масс на глубине 4 км, которые аппроксимировали региональную составляющую, и на глубине 50 м относительно рельефа местности (локальная составляющая поля). Точность подбора составила  $\pm 0.007$  мГал.

Восстановление значений поля на горизонтальной плоскости 1300 м осуществлено путем решения прямой задачи от аппроксимационной конструкции. Важным моментом является то, что при построении аппроксимационных моделей происходит подавление помех негармонического характера, обусловленных погрешностями измерений, мелкими приповерхностными неоднородностями геологической среды, погрешностями, возникающими в процессе формирования цифровых моделей поля.

Из сравнения полученной карты (рис. 3 Б) с картой аномалий силы тяжести, построенной по данным гравиметрических измерений на рельефе местности (рис. 3 А), видно, что поле стало более гладким, исчезли мелкие аномалии, зафиксированные на одном-двух пунктах.

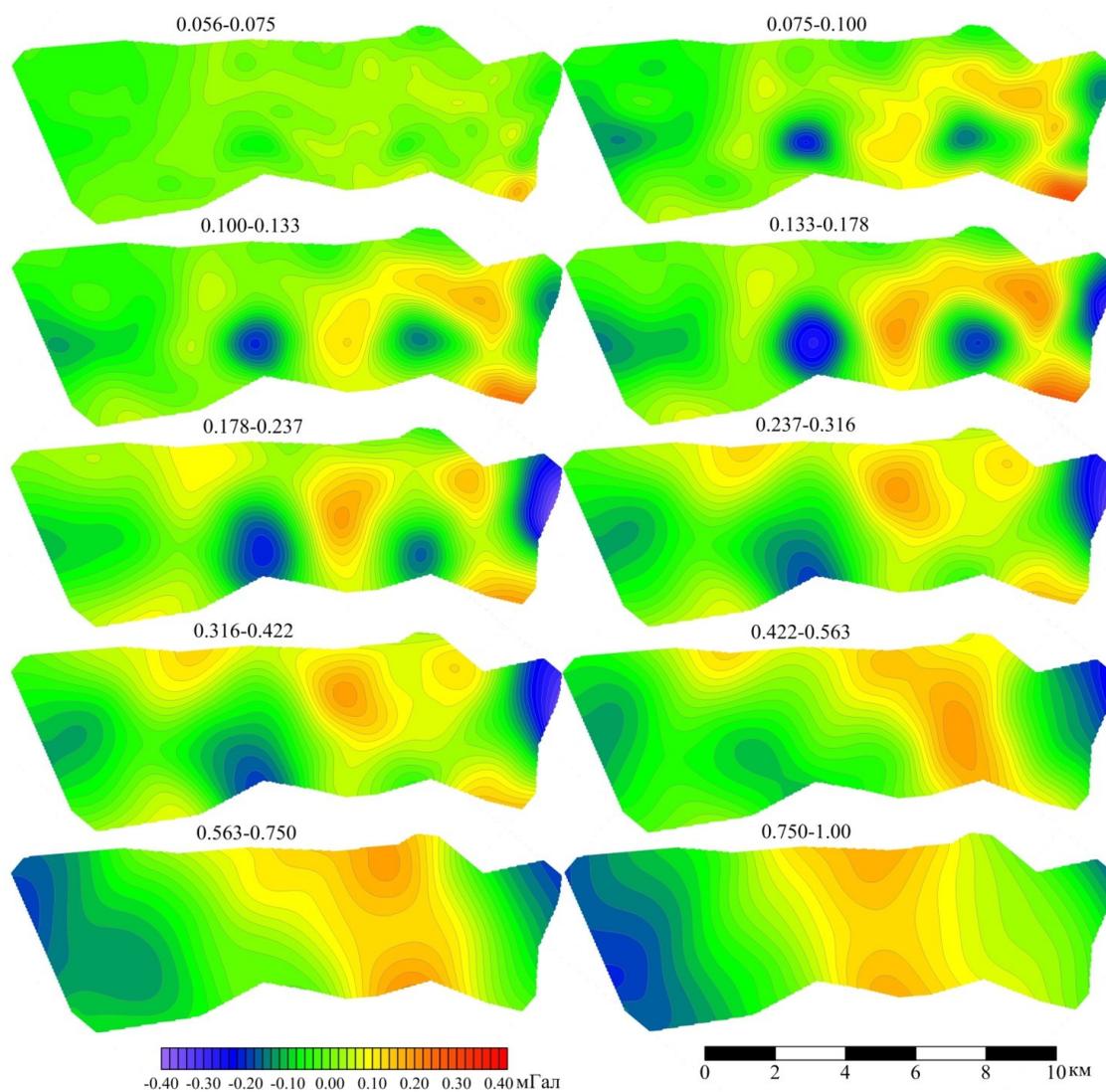


**Рис. 3.** Карты аномалий силы тяжести:  
А – измеренное на рельефе, Б – на горизонтальной плоскости 1300 м

С целью выделения и оконтуривания в пространстве локальных аномалий гравитационное поле, полученное на основании аппроксимационной конструкции, было обработано в системе Vector, которая позволяет вычислять распределение гравитационного поля в пространстве [4]. Для изучения плотностного строения породного массива построена трехмерная трансформанта, представленная на рис. 4 горизонтальными срезами при различных коэффициентах трансформации.

Коэффициент трансформации является относительным размером окна сканирования поля и изменяется от 0 до 1. В общем случае увеличение коэффициента соответствует увеличению глубины сканирования поля. Составляющая поля связана с распределением плотности внутри рассматриваемого слоя, поэтому может использоваться с целью выделения и оконтуривания геологических объектов, расположенных в определенном интервале глубин.

Как видно из рисунка, в центральной части площади выделяются две интенсивные локальные отрицательные аномалии. Наиболее рельефно они прослеживаются на коэффициентах 0.075-0.237. Отрицательные аномалии на западе и востоке площади носят региональный характер и возможно связаны с влиянием сторонних масс, расположенных за пределами площади.

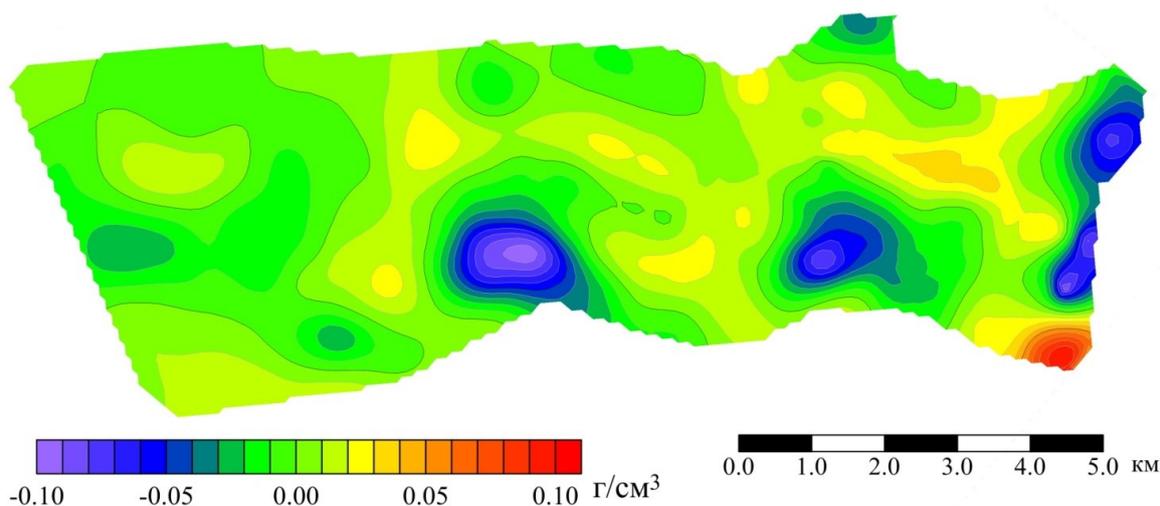


**Рис. 4.** Горизонтальные срезы 3D диаграммы поля (величины коэффициентов трансформации показаны на картах)

Трансформанты поля, полученные в системе Vector, имеют качественный характер. Для определения количественных характеристик горного массива, например характера распределения плотности пород, необходимо решить обратную задачу гравиразведки.

Для решения обратной линейной задачи использовалось поле, измеренное на рельефе. Вычисление плотности пород осуществлялось в слое, ограниченном рельефом местности и первой плотностной границей разреза, залегающей на глубине порядка 400 м. Решения обратной задачи осуществлялось методом локальных поправок [5].

Карта полученных значений аномальных плотностей приведена на рис. 5. Диапазон изменения относительных плотностей составляет до  $0.2 \text{ г/см}^3$ . В зонах отрицательных аномалий с горизонтальными размерами до 1.5 км, выделенных в системе Vector, отмечается наибольшее разуплотнение пород и большие градиенты изменения плотности.



**Рис. 5.** Плотностные неоднородности в слое между рельефом местности и первой плотностной границей

Таким образом, при интерпретации гравиметрических данных в условиях расчлененного рельефа местности необходимо тщательно учитывать плотность промежуточного слоя, иначе исходные аномалии силы тяжести будут отражать прежде всего не геологические неоднородности разреза, а рельеф местности. Поскольку теория трансформаций поля, разделение его на составляющие и выделение локальных аномалий построены на предположении о горизонтальности рельефа наблюдений, необходимо использовать данные, пересчитанные на горизонтальную плоскость. Для количественной интерпретации и построения геолого-геофизических моделей среды необходимо использовать данные, измеренные на рельефе, а сам рельеф включать в исходную геологическую модель.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке  
Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения  
по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29. декабря 2020 г.  
(рег. номер 122012000398-0).*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гордин В.М. Способы учета влияния рельефа местности при высокоточных гравиметрических измерениях: обзор. – М.: ВИЭМС, 1974. – 89 с. – (Сер. IX. Региональная, разведочная и промысловая геофизика: ВИЭМС. ОЦНТИ).
2. Гравиразведка: справ. геофизика / под ред. Е.А. Мудрецов, К.Е. Веселова. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Недра. 1990. – 607 с.: ил.

3. Долгаль А.С. Компьютерные технологии обработки и интерпретации данных гравиметрической и магнитной съемок в горной местности. – Абакан: Таймыркомприродресурсы, 2002. – 187 с.: ил.
4. Простолупов Г.В., Новоселицкий В.М., Конешов В.Н., Щербинина Г.П. Об интерпретации гравитационного и магнитного полей на основе трансформации горизонтальных градиентов в системе VECTOR // Физика Земли. – 2006. – № 6 – С. 90-96.
5. Пруткин И.Л. О решении трехмерной обратной задачи гравиметрии в классе контактных поверхностей методом локальных поправок // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1986. – № 1. – С. 67-77.
6. Хесин Б.Э. Рудная геофизика в горных областях. – М.: Недра, 1969. – 200 с.

УДК 550.343.64+622

DOI:10.7242/echo.2023.2.9

## О ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗА МИКРОСЕЙСМИЧНОСТИ НА РУДНИКЕ СКРУ-2 ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

Т.В. Злобина

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** В статье представлена методика прогнозирования максимально возможного уровня микросейсмической активности на руднике СКРУ-2 Верхнекамского месторождения калийных солей. Разработанный алгоритм включает в себя семь этапов, которые позволяют верифицировать и апробировать математическую модель. Результатом применения данного алгоритма является прогнозная карта на 2023 год для изучаемого рудника. На полученной карте выделены области с параметром  $E_{S_{max}}$  (максимальная плотность выделения сейсмической энергии) более 12 Дж/100 м<sup>2</sup>, которые являются геодинамически опасными зонами.

**Ключевые слова:** калийный рудник, сейсмологический мониторинг, техногенная сейсмичность, математическая модель, горнотехнические параметры отработки, пространственный анализ, прогноз.

### Введение

Вопрос прогнозирования сейсмической активности на рудниках и шахтах является актуальным для многих горнопромышленных районов мира [1, 2]. Так, для Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) в работах [3-5] описаны региональный и локальный прогнозы, которые основаны на регистрации сейсмических событий, а также на изучении оседаний земной поверхности. Как показала практика сейсмологических наблюдений на ВКМКС, зарегистрированная сейсмичность зависит от многих факторов. Впервые в работе [6] предложена математическая модель, описывающая влияние различных факторов на уровень техногенной сейсмичности месторождения, а также качественно оценено влияние таких факторов, как разработка нескольких пластов, влияние закладочных работ, возраст горных выработок, влияние удаленных землетрясений и взрывных работ. В статьях [7, 8] показана реализация данной математической модели и даны ее количественные параметры для выбранных влияющих факторов. Публикация [9] демонстрирует апробацию метода прогнозирования сейсмической активности для рудника СКРУ-2 Верхнекамского месторождения. Данный прогноз основан на выявленных ранее закономерностях, которые учитывают влияние нескольких основных горнотехнических факторов. Верификация данной методики была осуществлена только с помощью корреляционного анализа. Настоящая работа описывает сам алгоритм прогнозирования сейсмической активности, который включает не только корреляционный, но и регрессионный анализ. Предложенная методика описана для рудника Второго Соликамского рудоуправления – СКРУ-2.