

# ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ НЕДР

УДК 550.831

DOI:10.7242/echo.2025.1.5

## ОТРАЖЕНИЕ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ ПРОЦЕССА ЛИКВИДАЦИИ АВАРИИ НА СОЛИКАМСКОМ РУДНИКЕ

С.Г. Бычков, В.В. Хохлова  
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация.** Приведены результаты гравиметрических исследований на одном из участков Верхнекамского месторождения калийных солей с целью получения информации о развитии негативных инженерно-геологических процессов в горном массиве, вызванных разработкой недр. Показано, что повторные гравиметрические наблюдения позволяют контролировать как геологические процессы разуплотнения пород, приводящие к провалам земной поверхности, так и результаты изменения плотности горного массива при ликвидации аварии.

**Ключевые слова:** гравиметрический мониторинг, аномалии силы тяжести, соли, Верхнекамское месторождение, провалы земной поверхности.

Осенью 2014 года в шахты рудника Соликамского рудоуправления на Верхнекамском месторождении калийных солей проникли подземные воды, а на поверхности произошел провал грунта диаметром до 40 м. Размеры провала увеличивались, достигнув максимального размера воронки до 200 м к 2018 г.

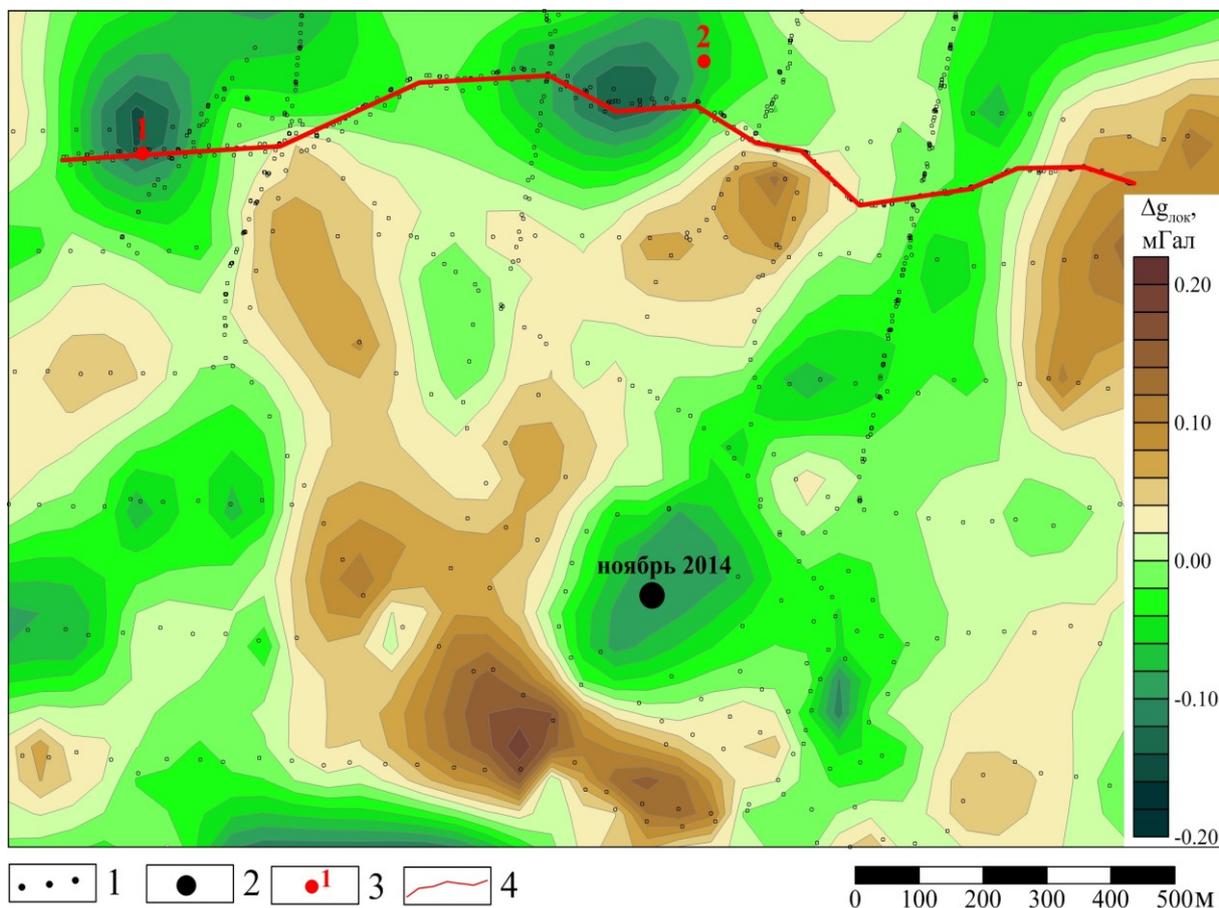
Для ликвидации аварии проведен ряд мероприятий, призванных замедлить процессы разрушения породного массива и приостановить проникновение воды в горные выработки:

- по периметру провала пробурено кольцо водопонижающих скважин с целью откачки грунтовых вод,
- осуществляется закладка выработанных шахтных полей,
- выполнено бурение инъекционных скважин, в которые подается смеси глины и цемента для ликвидации трещин и укрепления грунта,
- производится засыпка провала глинистыми материалами,
- ведется макшейдерский и геофизический мониторинг состояния земной поверхности и горного массива вокруг провала.

На данном участке и к северу от него ежегодно выполнялись гравиметрические работы. Среднеквадратическая погрешность определения аномалий силы тяжести в редукции Буге в разные годы не превышала  $\pm 0.020$  мГал. В качестве исходного пункта, относительно которого проводились наблюдения, использовался гравиметрический пункт, расположенный вне контура соляной залежи месторождения, значения силы тяжести на котором не изменялись.

На карте локальных аномалий силы тяжести, построенной по данным гравиметрических наблюдений 2016 г., провал земной поверхности, произошедшие в 2014 г. четко оконтуриваются изометричной зоной пониженных значений гравитационного поля (рис. 1). Диаметр локальной отрицательной аномалии около 300 м, амплитуда до  $-0.1$  мГал. Можно констатировать, что провал земной поверхности произошел в природной разуплотненной зоне. Возможно, данная зона разуплотнения связана с обрушением кровли горных выработок и сейсмическим событием, произошедшим в 1995 г., и обусловленным зоной разуплотнения в надсоляной толще [7].

Необходимо отметить, что севернее провала в районе скважин 1 и 2 также выделяются аналогичные отрицательные аномалии силы тяжести. Разумеется, не каждая отрицательная аномалия может считаться опасной. Отнесение зоны, в которой наблюдается аномалия, к потенциально опасной или не опасной может быть выполнено по результатам повторных гравиметрических наблюдений, фиксирующих перераспределение плотности горного массива.



**Рис. 1.** Карта локальных аномалий силы тяжести:

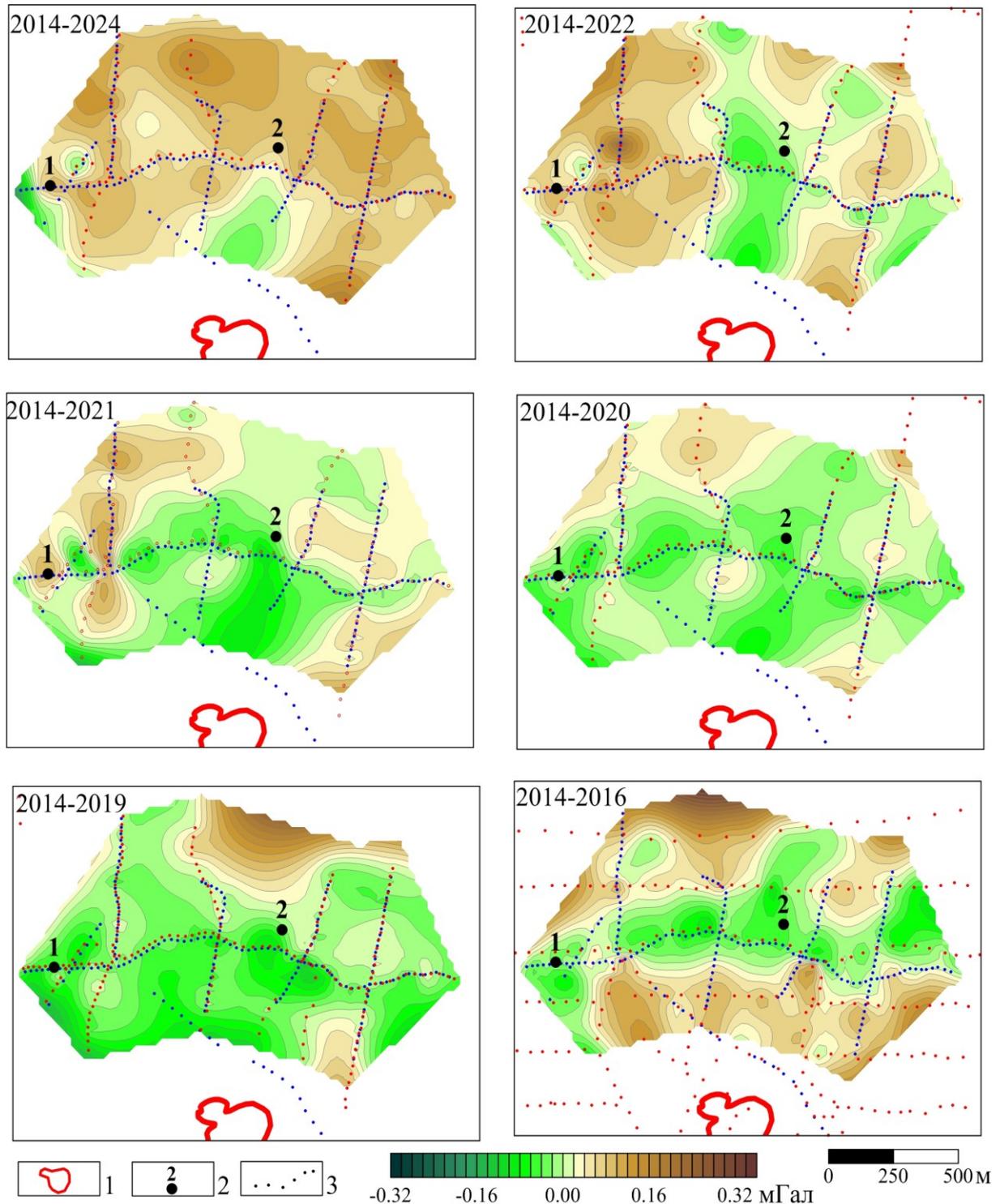
- 1 – пункты гравиметрических наблюдений разных лет, 2 – провал земной поверхности и его дата;  
3 – солеразведочные скважины, 4 – профиль повторных наблюдений

Мониторинговые наблюдения поля силы тяжести выявляют динамику процессов деформации породных масс и позволяют осуществить прогноз опасных и катастрофических ситуаций [2]. Многолетними гравиметрическими работами на Верхнекамском месторождении установлено, что провалы земной поверхности приурочены, как правило, к пониженным значениям гравитационного поля, т.е. к природным разуплотненным зонам, в которых продолжается процесс разуплотнения горных пород, выявляемый по мониторинговым наблюдениям отрицательными динамическими аномалиями [1, 3, 4, 5].

Анализ изменения значений гравитационного поля во времени позволяет контролировать как геологические процессы разуплотнения пород, приводящие к провалам земной поверхности, так и результаты изменения плотности горного массива при ликвидации аварии [6].

Карты вариаций гравитационного поля относительно наблюдений 2014 г. севернее провала приведены на рис. 2. Как видно из рисунка, наибольшие уменьшения значений

поля происходили до 2019-20 гг. Увеличивалась амплитуда локальных отрицательных аномалий поля, отражающих процессы разуплотнения пород. К 2022-24 гг. знак динамических аномалий меняется, т.е. процесс разуплотнения пород постепенно прекращается. К 2024 г. уменьшается амплитуда локальных отрицательных аномалий в районе скважин 1 и 2. Очевидно, что здесь происходит процесс уплотнения пород.



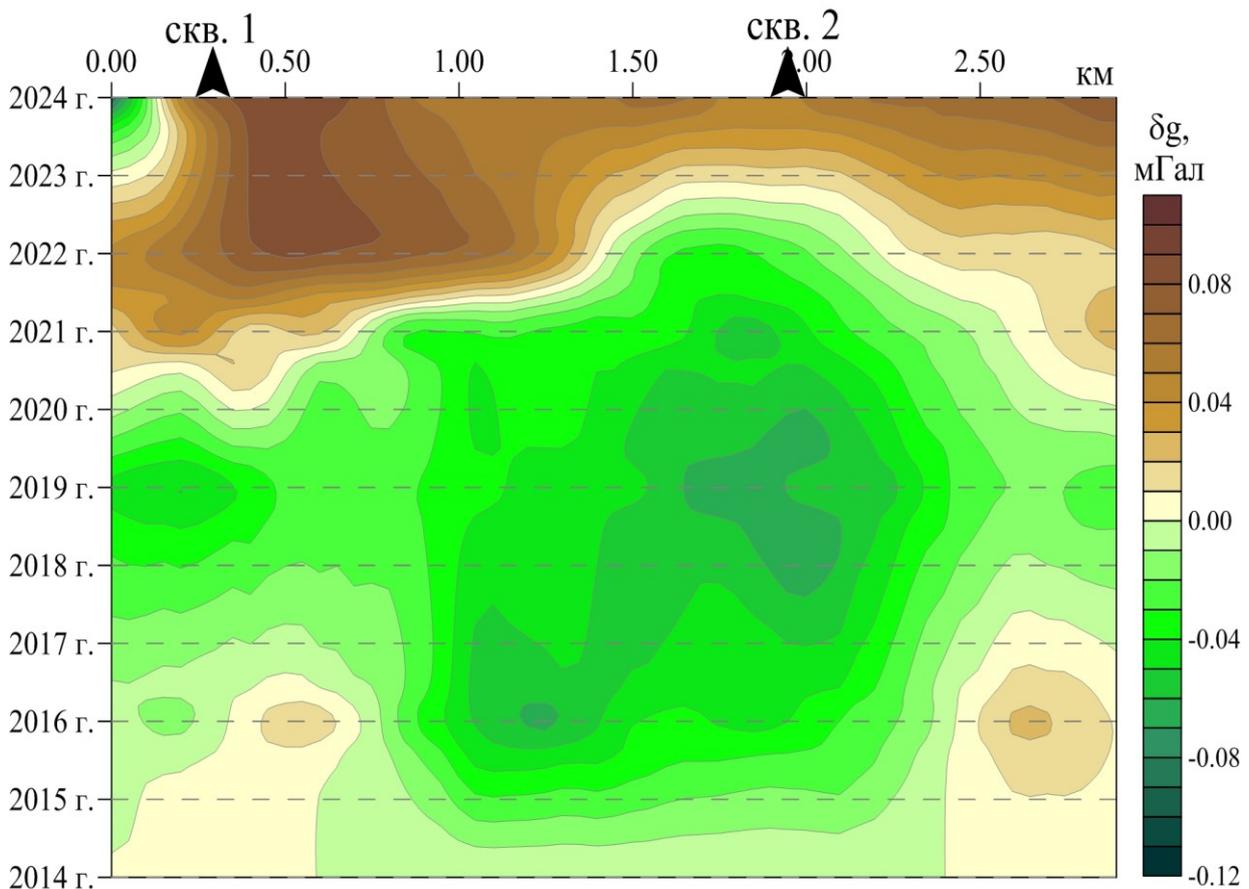
**Рис. 2.** Карты изменений гравитационного поля относительно 2014 г.:

- 1 – провал земной поверхности, 2 – солеразведочные скважины;
- 3 – пункты гравиметрических наблюдений соответствующих лет

Наиболее наглядно процесс перераспределения плотности пород можно иллюстрировать на карте вариаций гравитационного поля по профилю, проходящему через скважины 1 и 2 длиной около 3 км находящемуся за пределами огороженной опасной зоны вокруг провала. Гравиметрические работы на данном профиле проводились во всех циклах наблюдений. По данному профилю наиболее удобно проследить связь изменений поля с природными и техногенными изменениями плотностей горного массива.

Для анализа изменения поля построена «карта» динамических аномалий силы тяжести, где по горизонтальной оси отложены расстояния по профилю, а по вертикальной – годы изменений гравитационного поля относительно значений, полученных в 2014 г. (рис. 3).

Как видно на рис. 3, в период 2014-17 годы (после образования провала) значения гравитационного поля уменьшались, т.е. происходили процессы разуплотнения массива горных пород. Наиболее интенсивные отрицательные динамические аномалии отмечаются в период с 2017 г. по 2021 г. во время расширения провала. После 2019 г. гравитационное поле стабилизировалось, интенсивность динамических аномалий стала существенно меньше, происходит смена знака аномалий на положительные. Очевидно, что принятые мероприятия по ликвидации аварии позволили ликвидировать зоны разуплотнения горного массива. В 2022-24 гг. динамические аномалии стали положительными. Можно констатировать, что закладка выработанных шахтных полей, бетонное кольцо, созданное инъекционными скважинами, и засыпка провала позволили локализовать аварийный участок.



**Рис. 3.** «Карта» динамических аномалий силы тяжести относительно значений поля в 2014 г.

Таким образом, можно констатировать, что провалы земной поверхности и изменения плотности горных пород природного и техногенного генезиса отчетливо фиксируются в гравитационном поле. На основании анализа локальных и динамических аномалий силы тяжести можно сделать следующие основные выводы.

1. Наиболее интенсивные оседания и провалы земной поверхности происходят на участках пониженной плотности горных пород, т.е. в природных разуплотненных зонах. Эти зоны отчетливо фиксируются локальными отрицательными аномалиями силы тяжести.

2. Продолжение процесса разуплотнения определяется по данным гравиметрического мониторинга отрицательными динамическими аномалиями силы тяжести. По плановому совпадению локальных отрицательных аномалий и отрицательных динамических аномалий силы тяжести можно прогнозировать участки опасных геологических процессов.

3. По данным повторных гравиметрических наблюдений можно осуществлять контроль процесса ликвидации аварий на месторождении.

Выявление природных и техногенных зон изменения плотности в подработанном массиве по данным гравиметрического мониторинга позволяет конкретизировать форму и место проявления техногенных деформаций в пространстве подработанной толщи и прогнозировать участки опасных геологических процессов, что повышает безопасность эксплуатации Верхнекамского месторождения.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России  
в рамках государственного задания  
(регистрационный номер НИОКТР 1022040500598-4-1.5.6)*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бычков С.Г. Выявление областей природного и техногенного разуплотнения подработанной толщи по гравиметрическим данным // Горное эхо, №1, 2020. С. 55-58. DOI 10.7242/echo.2020.1.12
2. Бычков С.Г. Гравиметрический мониторинг: возможности, задачи, перспективы // Стратегия и процессы освоения георесурсов. Сб. научн. трудов, вып. 15. Пермь, ГИ УрО РАН, 2017, с. 146-149.
3. Бычков С.Г. Результаты мониторинговых гравиметрических наблюдений на Верхнекамском месторождении калийных солей // Горное эхо, №4, 2021. С. 45-50. DOI 10.7242/echo.2021.4.10.
4. Бычков С.Г., Простолупов Г.В., Симанов А.А., Хохлова В.В., Щербинина Г.П. Выявление природных и техногенных разуплотненных зон в подработанном массиве по данным высокоточных гравиметрических наблюдений // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2023. № 2. Выпуск 58. С. 101-114. DOI: 10.31431/1816-5524-2023-2-58-101-114
5. Бычков С.Г., Симанов А.А., Хохлова В.В. Гравитационные поля аварийных участков рудников верхнекамского месторождения калийных солей // Горный журнал. 2023. №11. С. 32-36. DOI 10.17580/gzh.2023.11.05.
6. Бычков С.Г., Симанов А.А., Хохлова В.В. Гравиметрический контроль аварийных участков Верхнекамского месторождения солей // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Вып. 1 (51). 2025. Пермь: ГИ УрО РАН, ПГНИУ. С. 63-66.
7. Щербинина Г.П., Простолупов Г.В. Гравиметрическая ситуация в районе провала земной поверхности на втором Соликамском калийном руднике в ноябре 2014 года // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Пермь: ГИ УрО РАН, ПГНИУ. 2015. С. 230-232.