

## РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ВЫЯВЛЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ РАЗУПЛОТНЕННЫХ ЗОН В ПОДРАБОТАННОМ МАССИВЕ ПО ДАННЫМ ВЫСОКОТОЧНЫХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

С.Г. Бычков, Горный институт УрО РАН

Г.В. Простолупов, Горный институт УрО РАН

А.А. Симанов, Горный институт УрО РАН

В.В. Хохлова, Горный институт УрО РАН

Г.П. Щербинина, Горный институт УрО РАН

---

### Для цитирования:

Бычков С.Г., Простолупов Г.В., Симанов А.А., Хохлова В.В., Щербинина Г.П. Разработка критериев выявления техногенных разуплотненных зон в подработанном массиве по данным высокоточных гравиметрических наблюдений // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2022. – № 1. – С. 47–55. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2022.1.4>

---

При поддержке регионального гранта РФФИ в 2019–2021 гг. проводились исследования с целью получения информации о развитии негативных инженерно-геологических процессов в массиве, обусловленных освоением недр. Разработана методика высокоточных мониторинговых гравиметрических наблюдений, позволяющая определять изменение поля во времени. Создана физико-геологическая модель гравиметрического мониторинга, представляющая собой однородную геологическую среду с изолированной областью, в которой произошли изменения плотности пород. Для целей гравиметрического мониторинга адаптирована методика обработки и интерпретации динамических аномалий силы тяжести, основанная на синтезе качественных и количественных методов извлечения геологической информации из гравиметрических данных.

Результатом интерпретации являются область распространения, вероятный интервал глубин разуплотнения горных пород, а также величина изменения плотности пород, характеризующая интенсивность процесса разуплотнения. Приводятся примеры опробования разрабатываемой технологии разделения разуплотненных зон на природные и техногенные на Верхнекамском месторождении калийных солей с целью повышения безопасности его эксплуатации. Показано, что по результатам мониторинговых гравиметрических наблюдений можно прогнозировать участки опасных геологических процессов и осуществлять контроль за оседаниями земной поверхности.

**Ключевые слова:** гравиметрия, мониторинг, соли, техногенные деформации, оседания, безопасность.

### Введение

Данные исследования являлись продолжением работ по ранее поддержанным проектам РФФИ [5, 21]. В процессе выполнения проектов создана технология проведения и интерпретации мониторинговых гравиметрических наблюдений, которая позволяет перейти на новый качественный уровень получения информации о распределении и развитии во времени плотностных неоднородностей геологического разреза, что существенно повышает безопасность эксплуатации месторождения.

По результатам повторных гравиметрических наблюдений рассчитывается динамическая аномалия силы тяжести, определяемая как разность между последующими и предыдущими значениями силы тяжести. Динамические аномалии не искажены влиянием рельефа местности и не отражают неизменные плотностные неоднородности геологического разреза. Поскольку все неизменные составляющие гравитационного поля в равной степени присутствуют в любой паре наблюдений, динамическая аномалия отражает только конкретный горнотехнический или быстротекущий геологический процесс, происходящий в определенном интервале времени [3, 5].

Для создания и опробования технологии проведения, обработки и интерпретации мониторинговых гравиметрических наблюдений в 2016 г. над затопленными шахтными полями на территории г. Березники был создан гравиметрический полигон [7–8, 13–14, 16]. Разработана методика высокоточных полевых работ с измерением как гравитационного поля, так и высот пунктов [20]. Рассмотрены помехи мониторинга [2], созданы методы обработки данных [17–19].

Созданы геологическая модель объекта гравиметрического мониторинга, представляющая собой изолированную область, где произошли изменения плотности пород в однородной геологической среде [5], и динамическая модель мониторинга, позволяющая увязать процесс изменения поля и оседания земной поверхности [1, 15].

Основываясь на модели гравиметрического мониторинга, разработана методика интерпретации данных путем совместного применения качественных и количественных методов интерпретации [5, 9, 25]. На начальной стадии путем топографической трансформации поля в системе Vector [4] строится изображение геологической среды. Результаты векторного сканирования используются для уточнения геологических гипотез и задания априорных ограничений при последующем решении обратной задачи гравirazведки. Решение обратных задач осуществляется монтажным методом с использованием гарантированного подхода к оценке качества решения обратной задачи и с построением функции локализации источников поля.

Модель среды, используемая при этом методе решения задачи (изолированный объект в однородной среде), полностью удовлетворяет геологической модели гравиметрического мониторинга, поскольку влияние неизменных плотностных неоднородностей в массиве, обусловленных геологическим строением, отсутствует в динамических аномалиях силы тяжести. Результатом интерпретации динамических аномалий является вероятный интервал глубин изменения массы (объема) горных пород, произошедший между двумя парами измерений поля.

В результате обобщения опыта проведения мониторинговых гравиметрических наблюдений на Верхнекамском месторождении калийных солей установлено, что по результатам мониторинговых гравиметрических наблюдений можно прогнозировать участки опасных геологических процессов и осуществлять контроль за оседаниями земной поверхности [10–12, 22–24]. Провалы земной поверхности и участки повышенных оседаний, обусловленные затоплением рудников, отчетливо фиксируются в гравитационном поле. По сочетанию отрицательных локальных аномалий силы тяжести, которые интерпретируются как природные ослабленные зоны, с отрицательными дина-

мическими аномалиями, связанными с продолжением процесса разуплотнения, по данным высокоточного гравиметрического мониторинга можно успешно прогнозировать участки опасных геологических процессов.

**Динамическая модель гравиметрического мониторинга**

Поскольку динамические аномалии не отражают статические плотностные неоднородности геологического разреза, модель гравиметрического мониторинга представляет собой изолированную область, где произошли изменения плотности пород, в однородной геологической среде.

Динамическая модель гравиметрического мониторинга представлена на рис. 1. Если в период времени T1–T2 (рис. 1, а, б) произошли изменения плотностного строения горного массива, например, образовалась карстовая полость или произошел процесс разуплотнения пород вследствие затопления горных выработок, то данный процесс отразится отрицательными динамическими аномалиями силы тяжести (рис. 1, в). Последующее оседание земной поверх-

ности над зоной разуплотнения в период времени T2–T3 (рис. 1, в), приводят к уплотнению пород, что будет зафиксировано положительной динамической аномалией силы тяжести (рис. 1, д).

Учитывая, что современная гравиметрическая и геодезическая аппаратура позволяет зафиксировать аномалии силы тяжести с точностью  $\pm 0,005-0,007$  мГал, по гравиметрическим данным можно определить начало процесса разуплотнения пород, выявляя зоны последующих возможных оседаний и провалов земной поверхности.

**Опытные работы на гравиметрическом полигоне в г. Березники**

Для создания и опробования технологии проведения, обработки и интерпретации мониторинговых гравиметрических наблюдений в 2016 г. над затопленными шахтными полями на территории г. Березники был создан гравиметрический полигон (рис. 2).

Полигон состоит из 102 пунктов, работы на нем выполнялись на закрепленных металлических знаках

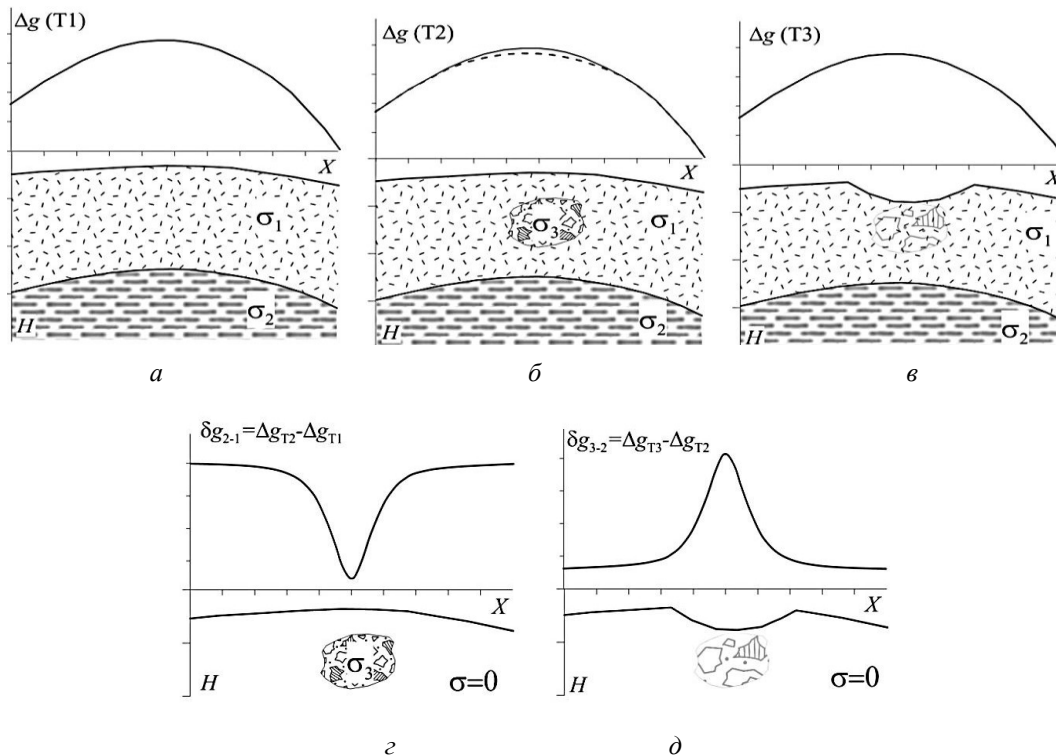


Рис. 1. Динамическая модель гравиметрического мониторинга



Рис. 2. Расположение гравиметрического полигона на карте г. Березники (черными точками показаны пункты гравиметрических наблюдений)

(дюбелях забитых в асфальт) гравиметрами AUTOGRAV CG-5. В каждом цикле измерений не только определялись значения силы тяжести, но и фиксировались изменения высот пунктов. Плано-высотная привязка гравиметрических пунктов осуществляется с использованием спутниковых GNSS-технологий.

Во всех циклах наблюдений сравнивались между собой аномалии в редукции Буге, т.е. учитывалось изменение высоты гравиметрических пунктов. Результаты пятилетних гравиметрических наблюдений на полигоне представлены на рис. 3. Как видно из рисунка, амплитуда, размеры и местоположение динамических аномалий существенным образом меняются в различных циклах мониторинга.

В период 2019–2020 гг. произошла инверсия знака динамических аномалий. В юго-западной части площади, где за период 2018–2019 гг. происходили наибольшие оседания земной поверхности, отрицательные динамические аномалии сменились положительными. По нашему мнению, положительные динамические аномалии на участках повышенных оседаний объясняются компенсацией значений аномалий увеличением плотности пород, обусловленной оседанием земной поверхности. Например, в 2018 г. наиболее интенсивные динамические аномалии силы тяжести проявлялись на юге участка, в 2018–2019 гг. здесь произошли повышенные оседания земной поверхности, что подтвердило сделанный нами ранее [5] прогноз оседаний.

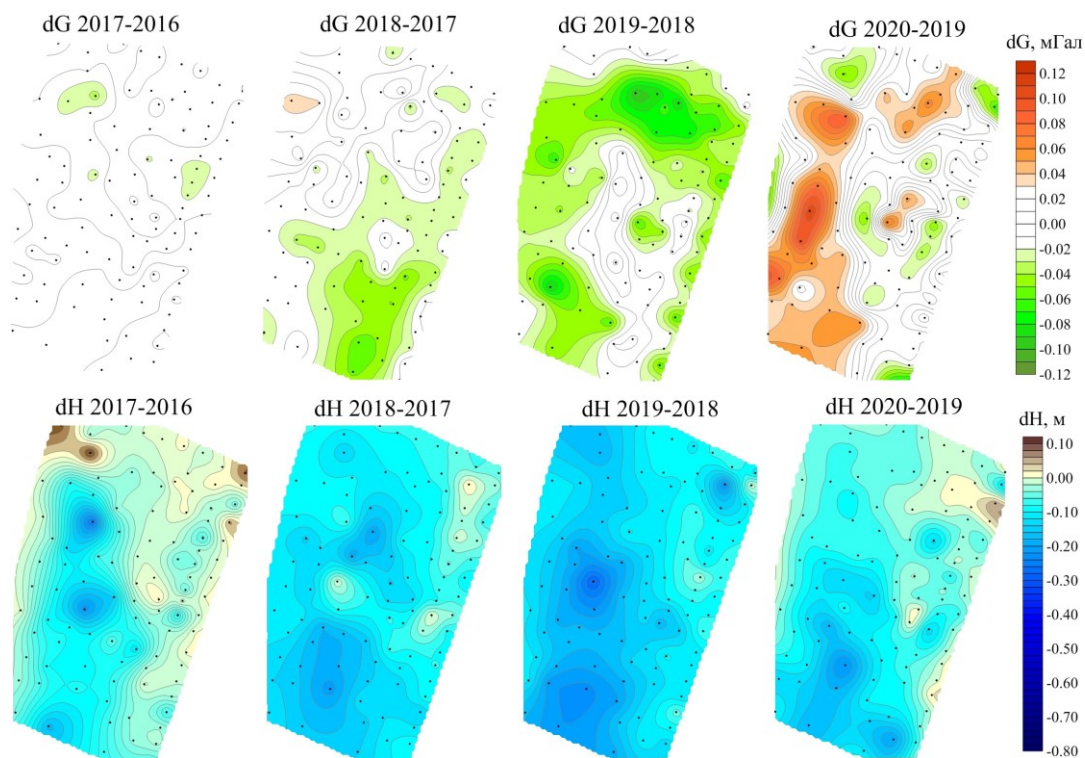


Рис. 3. Ежегодные изменения аномалий силы тяжести и высот пунктов на гравиметрическом полигоне (цифрами на картах показан период в годах)

Одновременно с оседанием в этой части участка произошло «затухание» динамической аномалии. Инверсия динамических аномалий в период 2019–2020 гг. свидетельствует о прекращении процесса разуплотнения пород или начале нового цикла «разуплотнение – оседание».

#### Изучение динамики развития разуплотненных зон в подработанном массиве горных пород

На одном из участков Верхнекамского месторождения калийных солей на подработанной подземными горными работами территории развилась область интенсивного оседания земной поверхности. Через три года после завершения отработки продуктивных пластов в зоне максимального оседания, где уровень грунтовых вод стал выше земной поверхности, сформировалось техногенное озеро. Современная длина озера 1,2 км, ширина южной части 0,7 км, северной – 0,4 км. Обширная область оседания подработанных пород сформирована в пределах крутого (более 4°) склона соляного поднятия.

Современное плотностное состояние подработанного массива, как результат изменений на всех стадиях развития территории – геологической и техногенной, отражается в гравитационном поле. Процесс эволюции плотностного строения в результате эксплуатации месторождения можно проследить на основе мониторинговых гравиметрических наблюдений [1, 10, 12].

В районе техногенного озера гравиметрическая съемка масштаба 1:10 000 с плотностью пунктов наблюдения 100×100 м проводилась в зимний период в 2016, 2018 и 2021 годах (в 2016 г. съемка проведена только в центральной части участка). Детальные гравиметрические наблюдения позволили получить картину плотностного строения подработанного массива, выявить участки повышенной и пониженной плотности пород.

На карте локальных аномалий силы тяжести диапазон изменения значений поля в пределах участка составляет около 1 мГал. Локальные аномалии получены путем вычитания из наблюденного поля гравитационного эффекта кровли соляной толщи, залегающей на абсолютных глу-

бинах от 0 до -250 м. Данная плотностная граница вносит основной вклад в суммарное гравитационное поле. Учитывая, что более глубоко залегающие отложения создают плавные аномалии, которые при данных размерах площади будут являться региональным фоном, в разностном поле, полученном вычитанием из наблюдаемого поля гравитационного эффекта кровли солей, останется только влияние плотностных неоднородностей надсоляной толщи. Карта полученных локальных аномалий силы тяжести приведена на рис. 4, а.

Как видно из рис. 4, а, зона отрицательных аномалий, отражающая наиболее разуплотненные породы, расположена под техногенным озером и распространяется в субмеридиональном направлении. По результатам решения линейной обратной задачи определено, что плотность надсоляных пород в пределах этих аномалий понижена на 0,05–0,08 г/см<sup>3</sup>. Данные аномалии отражают природные разуплотненные зоны подработанной толщи от подошвы продуктивной толщи (кровли ненарушенного массива) до земной поверхности, в которых продолжаются процессы разуплотнения пород.

Восточнее озера выделяется субмеридиональная зона положительных локальных аномалий силы тяжести. Очевидно, что в этой части участка залегают более плотные породы в надсоляной толще.

Анализ изменения гравитационного поля в период 2016–2018 гг. и 2018–2021 гг. позволил выявить участки, где в настоящее время происходят изменения плотности, обуславливающие оседания земной поверхности и увеличение размеров техногенного озера. Поскольку все неизменные составляющие гравитационного поля присутствуют в любой паре наблюдений, динамическая аномалия отражает только конкретный геологический процесс, прошедший в соответствующий период времени. Увеличение амплитуды и размеров отрицательных динамических аномалий свидетельствует о продолжении процесса разуплотнения пород.

Сравнение динамических аномалий силы тяжести за период 2016–2018 гг. и 2018–2021 гг. приведено на рис. 4, б, в. Если к 2018 г. отрицательные динамические аномалии, отражающие процесс разуплотнения пород, отмечались преимущественно в южной части озера (рис. 4, б), то в период 2018–2021 гг. разуплотнение пород происходило практически во всей центральной части участка (рис. 4, в). Зона разуплотнения пород протягивается с севера на юг под техногенным озером и в целом совпадает с зоной изначально менее плотных пород, создающих локальные отрицательные аномалии (рис. 4, а). Увеличился также диапазон изменения поля: от 0,2 мГал в

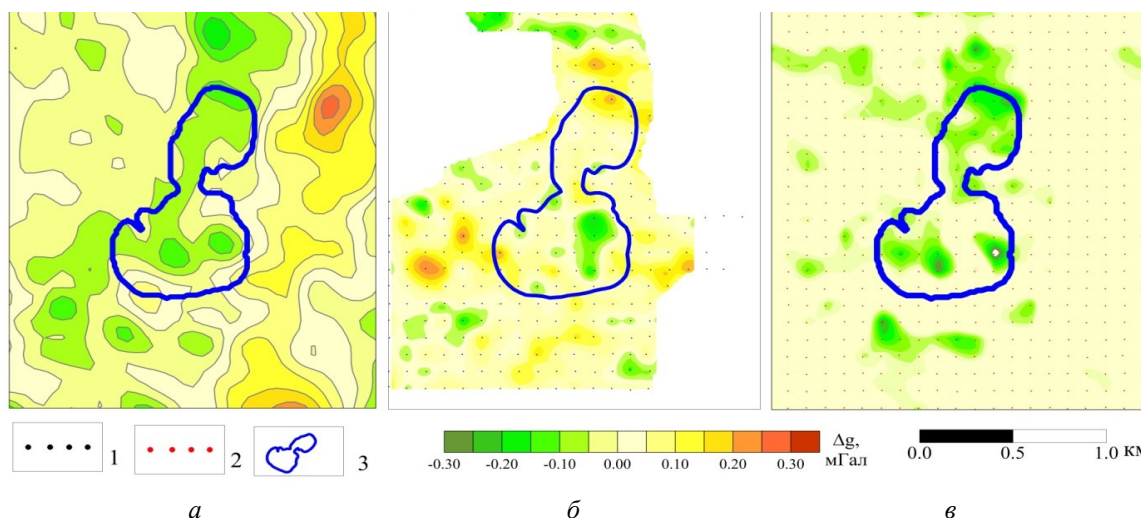


Рис. 4. Карта локальных (а) и динамических аномалий силы тяжести за период 2016–2018 гг. (б) и 2018–2021 гг. (в): 1 – пункты наблюдений, 2 – пункты наблюдений 2016 г., 3 – контур техногенного озера

2016–2018 гг. до 0,3 мГал в 2018–2021 гг. Наиболее интенсивные отрицательные динамические аномалии в настоящее время фиксируются в северной части озера.

Следует отметить смену знака динамической аномалии в южной части озера. В период 2016–2018 гг. здесь была наиболее интенсивная отрицательная динамическая аномалия, а за период 2018–2021 гг. динамическая аномалия стала положительной. По нашему мнению, инверсия динамических аномалий объясняется процессом оседания земной поверхности (углублением дна озера), поскольку оседание земной поверхности над зоной разуплотнения приводит к уплотнению пород, что фиксируется положительной динамической аномалией силы тяжести. Это свидетельствует о прекращении процесса разуплотнения пород или начале нового цикла «разуплотнение пород – оседание – уплотнение пород».

Данные повторных гравиметрических наблюдений свидетельствуют о продолжении процесса разуплотнения подработанного массива в данной зоне. Вероятно, здесь следует ожидать наиболее интенсивные оседания земной поверхности

и расширение озера на север и юг. Восточнее озера в зоне положительных локальных аномалий силы тяжести, где залегают более плотные породы, уменьшение значений поля не происходило.

### **Заключение**

Применение гравиметрического мониторинга на аварийных участках рудников Верхнекамского месторождения калийных солей показало его высокую эффективность. Установлено, что провалы земной поверхности и участки повышенных оседаний, обусловленные затоплением рудников, отчетливо фиксируются в гравитационном поле. По сочетанию отрицательных локальных аномалий силы тяжести, которые интерпретируются как природные ослабленные зоны, с отрицательными динамическими аномалиями, выявленными по мониторинговым гравиметрическим наблюдениям, которые связаны с продолжением процесса разуплотнения, можно успешно прогнозировать участки опасных геологических процессов и повысить безопасность эксплуатации Верхнекамского месторождения.

### **Библиографический список**

1. Бычков С.Г. Результаты мониторинговых гравиметрических наблюдений на Верхнекамском месторождении калийных солей // Горное эхо – 2021. – № 4. – С. 45–50.
2. Бычков С.Г. Возможная причина повышенной дисперсии отсчетов гравиметра // Горное эхо – 2019. – №2 (75). – С. 59–62.
3. Бычков С.Г. Выявление областей природного и техногенного разуплотнения подработанной толщи по гравиметрическим данным // Горное эхо. – 2020. – №1. – С. 55–58.
4. Бычков С.Г., Долгаль А.С., Щербинина Г.П., Простолупов Г.В. Томографическая интерпретация аномалий силы тяжести с использованием системы VECTOR // Вестник Пермского научного центра. – 2009. – №4. – С. 28–39.
5. Бычков С.Г., Мичурин А.В., Простолупов Г.В., Симанов А.А., Хохлова В.В. Разработка методологии изучения зон разуплотнения в водозащитной толще месторождений калийных солей наземной и наземно-подземной гравиметрией // Вестник ПФИЦ. – 2019. – №3. – С. 8–19.
6. Бычков С.Г., Мичурин А.В., Симанов А.А. Интерпретация результатов гравиметрического мониторинга карстовых процессов // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. – Екатеринбург: ИГФ УрО РАН. – 2019. – С. 66–71.
7. Бычков С.Г., Мичурин А.В., Симанов А.А., Хохлова В.В. Выявление природных и техногенных разуплотненных зон в подработанной толще по гравиметрическим данным // Инженерная и рудная геофизика. – 2020. – Пермь: EAGE. – DOI: 10.3997/2214-4609.202051031.
8. Бычков С.Г., Мичурин А.В., Симанов А.А., Хохлова В.В. Выявление техногенных изменений в водозащитной толще месторождения калийных солей по мониторинговым гравиметрическим наблюдениям // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. – Воронеж: «Научная книга». – 2020. – С. 49–51.
9. Бычков С.Г., Мичурин А.В., Симанов А.А., Хохлова В.В. Гравиметрические исследования состояния геосреды в районах интенсивного освоения недр // Горный журнал. – 2019. – №12. – С. 90–94.

10. Бычков С.Г., Простолупов Г.В., Щербинина Г.П. Выявление изменения плотностного состояния подработанной толщи по гравиметрическим данным // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики. – Пермь: ПГНИУ. – 2019. – Вып. 2(7). – С. 66–70.
11. Бычков С.Г., Простолупов Г.В., Щербинина Г.П. Выявление потенциально опасных участков на Верхнекамском месторождении калийных солей по гравиметрическим данным наблюдений // Геофизика. – 2021. – №5. – С. 29–35.
12. Бычков С.Г., Простолупов Г.В., Щербинина Г.П. Выявление техногенных изменений в подработанном массиве по гравиметрическим данным на Верхнекамском месторождении солей // Геофизика. – 2019. – №5. – С. 43–48.
13. Бычков С.Г., Симанов А.А. Результаты гравиметрического мониторинга аварийных участков рудников Верхнекамского месторождения калийных солей // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики. – Пермь: ПГНИУ. – 2020. – Вып. 3(8). – С. 57–62.
14. Бычков С.Г., Симанов А.А., Хохлова В.В. Выявление природных и техногенных разуплотненных зон в подработанном массиве по данным высокоточных гравиметрических наблюдений // Геофизика. – 2020. – №5. – С. 26–30.
15. Бычков С.Г., Симанов А.А., Хохлова В.В. Контроль процесса оседания земной поверхности по мониторинговым гравиметрическим наблюдениям // Инженерная и рудная геофизика 2021. – Геленджик: EAGE.
16. Бычков С.Г., Симанов А.А., Хохлова В.В. Результаты мониторинговых наблюдений на гравиметрическом полигоне в г. Березники // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. – Пермь: ПГНИУ. – 2021. – Вып. 4(41). – С. 153–157.
17. Простолупов Г.В. Методика обработки поля детальной гравиметрической съемки в зоне влияния солеотвала // Горное эхо. – 2019. – №3. – С. 41–43.
18. Простолупов Г.В. Определение характеристик количественного решения обратной задачи гравиметрии методом POLUS // Горное эхо. – 2020. – №3 (80). – С. 83–86.
19. Простолупов Г.В., Щербинина Г.П. Особенности обработки детальной гравиметрической съемки в зоне влияния масс солеотвала // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Воронеж: «Научная книга». – 2020. – С. 243–245.
20. Симанов А.А. Разработка методики мониторинговых гравиметрических исследований для изучения карстовых процессов // Горное эхо. – 2020. – №2 (79). – С. 62–66.
21. Симанов А.А., Хохлова В.В. Разработка методики мониторинговых гравиметрических исследований для изучения карстовых процессов // Вестник ПФИЦ. – 2021. – №3. – С. 34–41.
22. Щербинина Г.П. Изменение плотностного состояния подработанной толщи в период 2016-2018 гг. на участке техногенного озера СКРУ-2 // Горное эхо. – 2019. – №4(77). – С. 50–53.
23. Щербинина Г.П. Проявление франско-турнейских рифогенных массивов в плотностном строении верхней части разреза Соликамской впадины // Горное эхо. – 2020. – №3(80). – С. 98–100.
24. Щербинина Г.П., Простолупов Г.В. Реконструкция тектонических элементов по результатам комплексной интерпретации гравиметрических данных // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. – Воронеж: «Научная книга». – 2020. – С. 304–309.
25. Bychkov S., Dolgal A., Simanov A. Interpretation of Gravity Monitoring Data on Geotechnical Impact on the Geological Environment // Pure and Applied Geophysics. – 2021. – №178. – P.107–121.



DEVELOPMENT OF CRITERIA FOR THE IDENTIFICATION  
OF TECHNOGENIC DECOMPACTED ZONES  
IN THE UNDERMINED ARRAY ACCORDING TO  
HIGH-PRECISION GRAVIMETRIC OBSERVATIONS

S.G. Bychkov, G.V. Prostolupov, A.A. Simanov, V.V. Khokhlova, G.P. Shcherbinina

*Mining Institute UB RAS*

**For citation:**

*Bychkov S.G., Prostolupov G.V., Simanov A.A., Khokhlova V.V., Shcherbinina G.P.* Development of criteria for the identification of technogenic decompacted zones in the undermined array according to high-precision gravimetric observations // Perm Federal Research Center Journal. – 2022. – № 1. – P. 47–55. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2022.1.4>

In 2019–2021 studies were carried out in order to obtain information on the development of negative engineering-geological processes in the massif, due to the development of subsoil. A technique has been developed for high-precision monitoring gravimetric observations, which makes it possible to determine the change in the field over time. A physical geological model of gravimetric monitoring has been created, which is a homogeneous geological environment with an isolated area in which changes in rock density have occurred. For the purposes of gravimetric monitoring, a method for processing and interpreting dynamic gravity anomalies was adapted, based on the synthesis of qualitative and quantitative methods for extracting geological information from gravity data. The result of the interpretation is the area of distribution, the probable interval of depths of rock decompaction, as well as the magnitude of the change in rock density, which characterizes the intensity of the decompaction process. Examples are given of testing the developed technology for separating decompressed zones into natural and man-made zones at the Verkhnekamskoye potash deposit in order to increase the safety of its operation. It is shown that, based on the results of monitoring gravimetric observations, it is possible to predict areas of hazardous geological processes and to control the surface subsidence. The research was supported by a regional RFBR grant.

*Keywords: gravity, monitoring, salts, technogenic deformations, subsidence, safety.*

**Сведения об авторах**

*Бычков Сергей Габриэлевич*, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геопотенциальных полей, Горный институт УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ГИ УрО РАН»), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; e-mail: bsg@mi-perm.ru

*Простолупов Геннадий Валерьевич*, кандидат технических наук, научный сотрудник, «ГИ УрО РАН»; e-mail: gena-prost@yandex.ru

*Симанов Алексей Аркадьевич*, кандидат технических наук, научный сотрудник, «ГИ УрО РАН»; e-mail: simanov@mi-perm.ru

*Хохлова Валерия Васильевна*, младший научный сотрудник, «ГИ УрО РАН»; e-mail: valxov@gmail.com

*Щербинина Галина Прокопьевна*, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, «ГИ УрО РАН»; e-mail: galageol@yandex.ru

*Материал поступил в редакцию 03.02.2022 г.*