

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петротектонические основы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / под ред. Н.М. Джиноридзе. – СПб; Соликамск, 2000. – 400 с
2. Мешбей В.И. Методика многократных перекрытий в сейсморазведке. – М.: Недра, 1985. – 264 с.: ил.
3. Нейдель И.С., Поджаглиолми Э. Геофизическое обоснование и методика сейсмостратиграфического моделирования и интерпретации // Сейсмическая стратиграфия. Использование при поисках и разведке нефти и газа / под ред. Ч. Пейтона. – М., 1982. – Ч. 2. – С. 645-692.
4. Санфилов И.А., Ильичев Ю.В. Результаты изучения зоны выклинивания продуктивных отложений способами динамического анализа // Разведочная геофизика: отечеств. производств. опыт: экспресс-информ. / ВИЭМС. – М., 1988. – вып. 6. – С. 14-20.
5. Shoenberger M., Levin F.K. Reflected and transmitted filter functions for simple subsurface geometries // Geophysics. – 1976. – V.41, № 6. – P. 1305-1317. DOI: 10.1190/1.1440681.
6. Бат М. Спектральный анализ в геофизике: пер. с англ. – М.: Недра, 1980. – 535 с.: ил.
7. Санфилов И.А., Бабкин А.И., Ярославцев А.Г., Прийма Г.Ю., Фаткин К.Б. Сейсморазведочные исследования условий разработки калийной залежи // Геофизика. – 2011. – № 5. – С. 53-58.
8. Барях А.А., Санфилов И.А., Федосеев А.К., Бабкин А.И., Цаюков А.А. Сейсмо-геомеханический прогноз состояния водозащитной толщи на калийных рудниках // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 6. – С. 10-22. DOI: 10.15372/FTPRPI20170602.

УДК 550.312

DOI:10.7242/echo.2020.2.12

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МОНИТОРИНГОВЫХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КАРСТОВЫХ ПРОЦЕССОВ

А.А. Симанов

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Карст является одним из наиболее сложных и трудно прогнозируемых геологических процессов, представляющих опасность для жизнедеятельности урбанизированных территорий. Процесс сопровождается образованием специфических форм рельефа, подземных пространств (каверны, полости, системы полостей) и обуславливает развитие деформационных явлений различного характера (обрушения, провалы, оседания).

Вместо констатации фактов провалов и обрушений, что практикуется в настоящее время при изучении карстовых явлений, предлагается применять методику мониторинговых гравиметрических исследований, которая позволит получать сведения о геологическом строении массива, об участках с интенсивным развитием карстово-суффозионных процессов, о наличии полостей на начальном этапе их развития. Это позволит сориентировать инженерные работы по обеспечению сохранности и безопасной жизнедеятельности.

Представлены результаты гравиметрических работ, проводимых с целью изучения последствий разработки Верхнекамского калийного месторождения. Показано, что современные методы обработки и интерпретации высокоточных мониторинговых исследований существенно повышают возможности прогнозирования негативных инженерно-геологических явлений. Приведены примеры гравиметрических исследований на аварийных участках рудников.

Ключевые слова: гравиразведка, мониторинг, аномалия гравитационного поля, динамическая гравитационная аномалия, обратные задачи геофизики.

Проблема изучения горного массива, расположенного над естественными или техногенными полостями в геологическом пространстве, существует уже давно. К естественным полостям относятся пещеры доступные для проникновения. К техногенным – горные выработки шахтного производства, а также подземные коммуникационные сети на урбанизированных территориях. От сохранности массива горных пород над этими полостями часто зависит безопасность жизнедеятельности населения, сохранность самого рудника или природного объекта. Изучение территории с поверхности посредством геофизических наблюдений даёт хорошие результаты как с точки зрения выявления ослабленных или потенциально опасных зон (при однократно проведенной

съемке), так и в плане прогноза развития аномальных зон в пространстве с течением времени (в случае регулярных повторных наблюдений).

Для изучения и прогнозирования негативных инженерно-геологических явлений широко используются геофизические методы, немаловажную роль в комплексе которых играют гравиметрические исследования [1, 8]. Актуальностью решаемой проблемы является развитие теории интерпретации геопотенциальных полей в трехмерном пространстве, которая, прежде всего, включает анализ мониторинговых гравиметрических наблюдений, разделения по глубине источников аномалий в трехмерном пространстве, решение обратных задач с целью получения единой плотностной картины недр, определение глубинной приуроченности областей интенсивного развития карста.

Области с интенсивным развитием карстовых процессов в горном массиве отчетливо фиксируются в динамическом гравитационном поле. Существующие методы интерпретации аномалий силы тяжести позволяют выделить эти зоны в пространстве. Однако их глубинная приуроченность, количественные параметры определяются крайне неустойчиво и неоднозначно. Методика мониторинговых наблюдений, проведенных в различные участки времени, позволяет локализовать области интенсивного развития карстовых процессов, которая существенно повышает разрешающую способность и достоверность выделения аномалий, при этом снизится неоднозначность решения обратных задач гравиметрии в линейной и нелинейной постановке.

С целью выявления вариаций силы тяжести, связанных с техногенным воздействием на геологическую среду, на ВКМКС проводятся повторные и мониторинговые гравиметрические наблюдения [8].

Геологическая модель гравиметрического мониторинга карстового процесса представляет собой изолированную область, где произошли изменения плотности пород, в однородной геологической среде (рис. 1) [3]. Экстремальные величины гравитационных эффектов в зависимости от глубины зоны разуплотнения (H) и ее размеров (R) приведены изолиниями на рис. 1б, оцифрованными в миллигалах. Следует отметить, что данные эффекты вычислены при изменении плотности геологического объекта на 0.01 г/см^3 , которая очень мала и находится в пределах точности денситометрии. Учитывая, что современная гравиметрическая и геодезическая аппаратура позволяет зафиксировать аномалии силы тяжести с точностью $\pm 0.005 - 0.007 \text{ мГал}$, по гравиметрическим данным можно определить начало процесса разуплотнения пород, выявляя зоны последующих возможных оседаний и провалов земной поверхности.

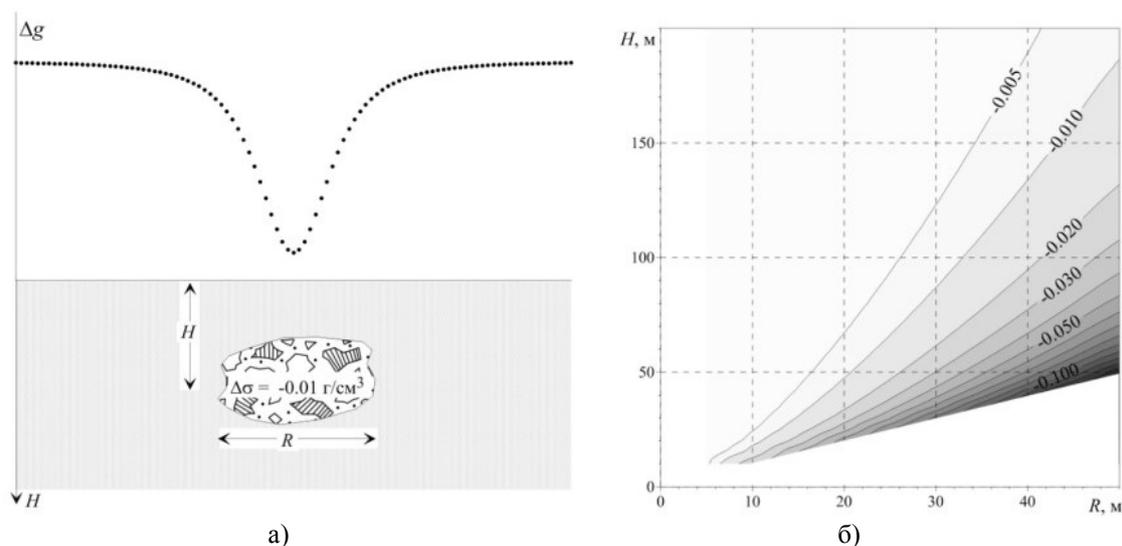


Рис. 1. Геологическая модель гравиметрического мониторинга (а) и гравитационные эффекты модели (б)

Основываясь на геологической модели гравиметрического мониторинга, разработана методика интерпретации динамических аномалий силы тяжести, на основании которой создана технология количественной интерпретации выделенных динамических аномалий гравитационного поля. Данная технология решается путем выполнения многократного решения обратной задачи монтажным методом с использованием гарантированного подхода к оценке качества решения обратной задачи и с построением функции локализации источников поля [2, 7, 9]. 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 количественной интерпретации динамических аномалий является вероятный интервал глубин изменения массы (объема) горных пород, произошедший между двумя парами измерений поля.

На одном из потенциально опасных участков на территории г. Березники в 2016 г. были начаты работы, где выполнено семь циклов мониторинговых гравиметрических работ. Здесь создан гравиметрический полигон, состоящий из 102 пунктов [4], работы на котором выполняются на закрепленных металлических знаках (дюбелях, забитых в асфальт) гравиметрами AUTOGRAV CG-5.

На первом этапе проводили гравиметрические и геодезические наблюдения между гравиметрическим пунктом 1 разряда и опорным гравиметрическим пунктом 3 класса, который расположен вне зоны влияния инженерно-геологических, горнотехнических и геодинамических процессов.

На втором этапе проводили гравиметрические и геодезические измерения на пунктах временной опорной сети. Определение силы тяжести на всех опорных пунктах рассчитывалось по результатам 2-3 независимых рейсов двумя гравиметрами. Создание временной опорной сети позволило сократить длительность гравиметрических рейсов и тем самым повысить точность наблюдений на пунктах мониторинговых наблюдений.

Третий этап заключался в гравиметрических и геодезических наблюдениях на рядовых пунктах мониторинговых наблюдений. На каждом гравиметрическом пункте выполнялось по три цикла наблюдений продолжительностью от 30 до 60 секунд каждый. Измерения на пунктах рядовой сети производились по однократной методике со 100% повторением двумя гравиметрами. Среднеквадратическая погрешность определения силы тяжести составляла при этом 0,005-0,007 мГал, точность определения высот на закрепленных пунктах 1-2 см.

Полевая обработка получаемых результатов измерений заключалась с следующим: ежедневный анализ показаний гравиметров в каждом отдельном рейсе; анализ характера сползания нуль-пункта; отбраковка значений по результатам анализа результатов обработки и принятие решения о необходимости повторения измерений на пункте; оценка величин поправок значений силы тяжести на данном пункте по данным геодезических наблюдений (сохранность планового и высотного положения точки наблюдения); сопоставление показаний гравиметра при повторных и контрольных измерениях.

На рис. 2 приведены карты изменения силы тяжести за разные годы измерений на фоне городской застройки. Анализируя карты динамических аномалий в разные периоды времени прежде всего можно отметить, что амплитуда, размеры и местоположение динамических аномалий существенным образом меняются в различных циклах мониторинга.

Можно констатировать увеличение скорости изменения силы тяжести: если в первый период (2016-2017 гг.) амплитуда отрицательной аномалий составляла -0.04 мГал (рис. 2 а), то за последний год (2018-2019 гг.) амплитуда увеличилась до -0.10 мГал (рис. 2 в). Количественная интерпретация динамических аномалий [5] показала, что ис-

точник изменения поля находится на глубине порядка 20-40 м, плотность его изменилась на -0.1 г/см^3 . Увеличение амплитуды динамической аномалии свидетельствует об ускорении процесса разуплотнения пород надсоляной толщи, расположенной над затопленными шахтными полями, что в дальнейшем может привести к провалам земной поверхности на данной территории.

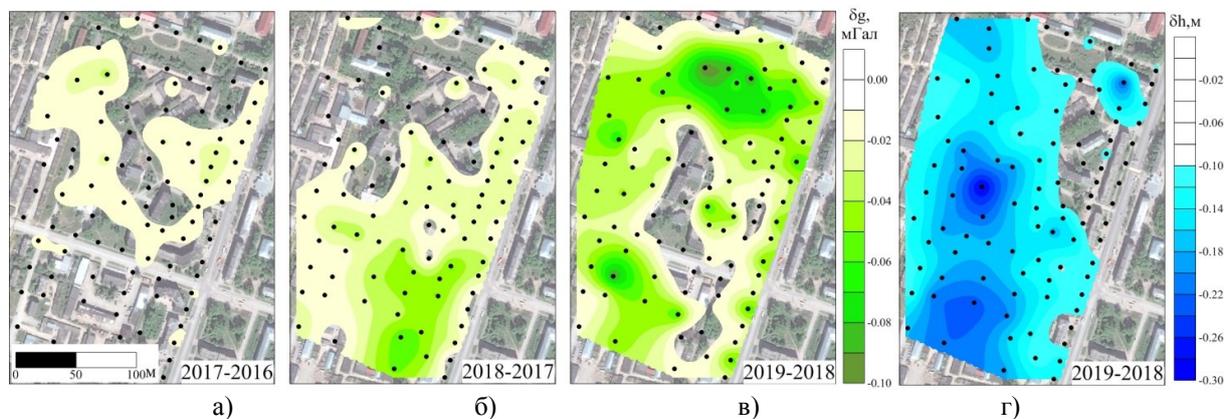


Рис. 2. Карты динамических аномалий: а) сентябрь 2016 г. – сентябрь 2017 г., б) сентябрь 2017 г. – ноябрь 2018 г., в) ноябрь 2018 г. – сентябрь 2019 г., г) оседания земной поверхности в период с ноября 2018 г. по сентябрь 2019 г. (черными точками показаны пункты гравиметрических наблюдений)

Изменение формы динамических аномалий в пространстве, по нашему мнению, связано с процессом непрерывного оседания земной поверхности. Участки повышенных оседаний сопровождаются уменьшением величины динамической аномалии, что объясняется компенсацией значений аномалий увеличением плотности пород, обусловленной оседанием, и уменьшением высот пунктов. Например, в 2018 г. наиболее интенсивные динамические аномалии силы тяжести проявлялись на юге участка (рис. 2 в), в 2018-2019 гг. здесь произошли повышенные оседания земной поверхности до 30 см (рис. 2 г), что подтвердило сделанный нами ранее [4, 6] прогноз оседаний. Одновременно с оседанием в этой части участка произошло «затухание» динамической аномалии (рис. 2 в). За период 2018-2019 гг. наиболее интенсивные динамические аномалии сместились на юг и запад участка (рис. 2 в). Вероятно, здесь в 2020 г. следует ожидать повышенные оседания земной поверхности.

Эксперименты показали, что с помощью указанного комплекса успешно решается задача картирования карстовых полостей и разрывных нарушений, а также появляется возможность определить временные трансформации модели и оценить степень опасности состояния водозащитной толщи для эксплуатации месторождений. Изменения плотности пород в горном массиве, происходящие под влиянием горно-геологических условий, отчетливо фиксируются в гравитационном поле.

Разработанная технология проведения и интерпретации мониторинговых гравиметрических наблюдений позволяет перейти на новый качественный уровень получения информации о распределении и развитии во времени плотностных неоднородностей геологического разреза, что существенно повышает безопасность проведения горных работ. Гравиметрия должна применяться как опережающий метод, позволяющий на предварительном этапе уточнить геолого-тектоническую обстановку в пределах шахтных полей, выделить зоны повышенного риска.

В более широком рассмотрении результаты работ являются примером широкой апробации методики опережающего исследования, направленной на прогнозирование разрушительных последствий карстово-суффозионных процессов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ 17-45-590302 p_a.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андреев О.П., Кобылкин Д.Н., Ахмедсафин С.К., Кирсанов С.А., Безматерных Е.Ф., Кривицкий Г.Е. Гравиметрический контроль разработки газовых и газоконденсатных месторождений: Состояние, проблемы, перспективы. – М.: Недра. 2012. – 371 с.: ил.
2. Бычков С.Г., Долгалъ А.С., Костицын В.И., Мичурин А.В., Симанов А.А. Объемное моделирование геологических объектов по гравитационному полю на основе синтеза качественных и количественных методов интерпретации // Геофизика. – 2015. – № 5. – С. 47-54.
3. Бычков С.Г., Мичурин А.В., Симанов А.А. Гравиметрический мониторинг рудников Верхнекамского месторождения калийных солей // Геофизика. – 2017. – № 5. – С. 10-16.
4. Бычков С.Г., Мичурин А.В., Симанов А.А. Интерпретация результатов гравиметрического мониторинга на аварийных участках рудников Верхнекамского месторождения калийных солей // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: сб. науч. тр. Вып. 1 (46) / ГИ УрО РАН [и др.]. – Пермь, 2019. – С. 59-63.
5. Бычков С.Г., Мичурин А.В., Симанов А.А. Бычков С.Г. Результаты гравиметрического мониторинга аварийных участков рудников Верхнекамского месторождения калийных солей // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 45-й сес. Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского / Казан. фед. ун-т. – Казань, 2018. – С. 130-131.
6. Мичурин А.В. Обработка и комплексная интерпретация результатов гравиметрического мониторинга на одном из потенциально опасных участков в г.Березники // Горное эхо. – 2019. – № 3 (76). – С. 37-41. DOI: 10.7242/echo.2019.3.10.
7. Мичурин А.В., Пугин А.В., Симанов А.А. Возможности гарантированного подхода при решении трехмерных обратных задач гравиразведки // Геоинформатика. – 2014. – №1. – С. 42-50.
8. Новоселицкий В.М., Бычков С.Г., Щербинина Г.П., Простолупов Г.В., Яковлев С.И. Гравиметрические исследования изменений плотностной характеристики геологической среды под воздействием горных работ // Горный журнал. – 2008. – №10. – С. 37-41.
9. Bychkov S.G., Dolgal A.S., Simanov A.A. Synthesis of qualitative and quantitative methods of extraction of geological information out of gravimetric data // Eurasian mining. – 2013. – № 2. – P. 12-15.

УДК 550.837

DOI:10.7242/echo.2020.2.13

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МЭР
ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ**

А.А. Тайницкий

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация. В рамках данной статьи приведены результаты практического применения метода минимизации эмпирического риска (МЭР) на примере данных ВЭЗ вдоль профиля, выполненного в Красновишерском районе Пермского края. Данные измерений значительно осложнены помехами, обусловленными плохими условиями заземления. Полученная в результате количественной интерпретации модель геоэлектрического разреза хорошо согласуется с представлениями о разрезе по данным бурения.

Ключевые слова: электроразведка, вертикальное электрическое зондирование, интенсивные помехи, метод минимизации эмпирического риска.

Введение

Интерпретация геофизических данных, осложненных помехой, является сложной и трудоемкой задачей. Традиционные подходы к решению обратной задачи (ОЗ) в условиях интенсивных помех оказываются малоэффективными. В данном случае речь идет об алгоритмах подбора, суть которых заключается в последовательном уточнении начального приближения к вектору параметров разреза, который обеспечивает минимум среднеквадратического расхождения экспериментальных и теоретических значений поля [3, 5]. Отличительной особенностью метода минимизации эмпирического риска (МЭР) является способность к подавлению знакопеременных помех, закон распределения