

Работы молодых ученых

УДК 550.8.013

ОПЫТНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ НА ТЕРРИТОРИИ ИСТОРИКО-ПРИРОДНОГО КОМПЛЕКСА «ЛЕДЯНАЯ ГОРА И КУНГУРСКАЯ ЛЕДЯНАЯ ПЕЩЕРА»

© 2014 А.В. Пугин, А.В. Мичурин, А.А. Симанов, В.В. Хохлова, П.Н. Новикова

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а;
e-mail: leks-p@mail.ru*

В статье представлены результаты наземно-подземных гравиметрических и магнитометрических работ по изучению природного комплекса «Ледяная гора и Кунгурская ледяная пещера». Приводится описание методики полевых работ. Даны первые результаты анализа наблюдаемых полей и их трансформант с элементами геологической интерпретации.

Ключевые слова: гравиразведка, магниторазведка, Кунгурская Ледяная пещера, Ледяная гора, карст.

ВВЕДЕНИЕ

Карстующиеся породы слагают разрез в значительной части территории России и Зарубежья. Строительство в зоне развития карстово-суффозионных процессов сопряжено с риском разрушения инженерных сооружений. От своевременного обнаружения опасных зон растворения и выноса материала зависит и сохранность подземных природных объектов, подобных Кунгурской Ледяной пещере.

Задача, поставленная авторами – создание рациональной методики опережающих геофизических работ на основе методов гравиразведки и магниторазведки, ориентированной на обнаружение и локализацию ослабленных зон, карстовых полостей в пределах экзотехносферы (верхняя часть геологического разреза мощностью ~ 100 м) с целью заблаговременного предупреждения о возможных разрушительных последствиях.

Кунгурская Ледяная пещера и Ледяная гора представляют собой единый историко-природный комплекс, отличающийся сложным геологическим строением и повсеместным развитием карстово-суффозионных процессов.

Комплекс расположен в Пермском крае на окраине города Кунгура, на правом берегу реки Сылвы (рис. 1). В 2011 г. Ледяная гора и Кунгурская пещера включены в перечень объектов культурного наследия ЮНЕСКО.

С начала 1950-х годов Кунгурская Ледяная пещера и Ледяная представляют собой естественный полигон для апробации различных методов изучения земных недр (Кунгурская ..., 2005). Протекающие процессы карста и суффозии способствуют развитию в толще горы полостей, а на земной поверхности – образованию провалов и воронок. Наиболее протяженной полостью и эталонным объектом является сама пещера.

Изученность комплекса весьма далека от идеальной. Из площадных наблюдений можно отметить только результаты электропрофилеирования и вертикального электрического зондирования. В 70-х годах прошлого века в Кунгурской Ледяной пещере и над ней были выполнены гравиметрические работы силами сотрудников Института геофизики и Кунгурского стационара УНЦ АН СССР (Солуха и др., 1978). Измерения проводились при помощи кварцевого гравиметра КВГ отечественного производства. Помимо

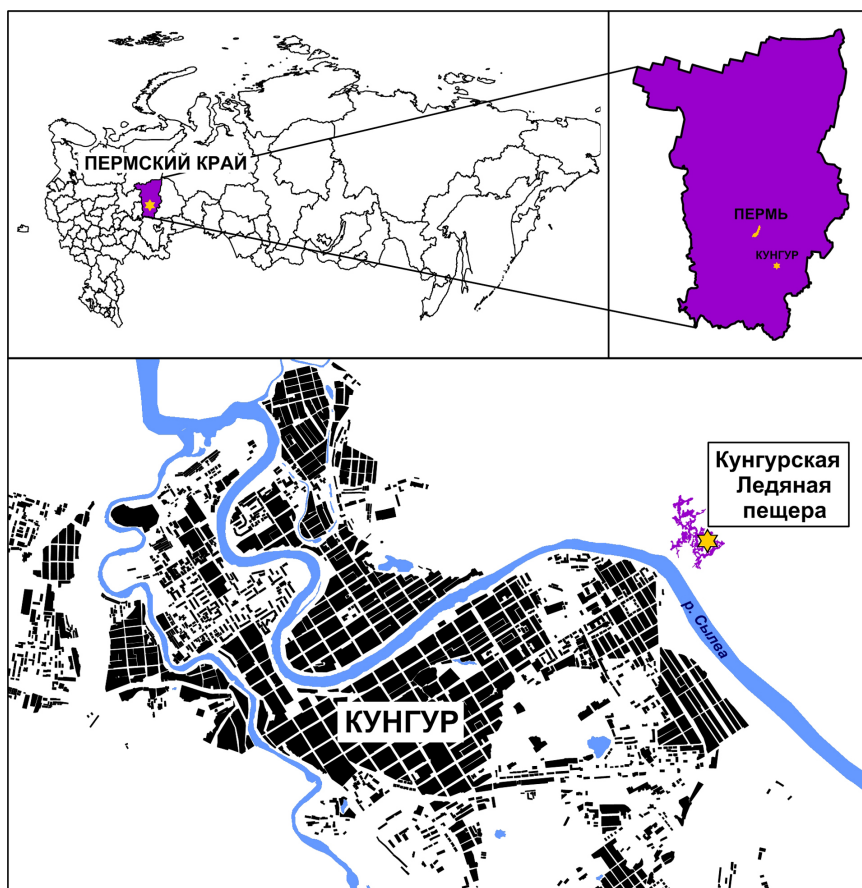


Рис. 1. Местоположение Кунгурской Ледяной пещеры.

низкой точности гравиметров того времени, не позволявших регистрировать слабые локальные аномалии силы тяжести, недостатком съемки являлось то, что она была выполнена только в профильном варианте, поскольку точки подземных наблюдений в пещере были вынесены на поверхность для гравиметрических измерений. Возможность изучения простираения аномалий по площади за пределы изученной части пещеры, равно как и возможность их обнаружения вне профилей, была упущена.

Дефицит геологической информации является серьезным препятствием для интерпретации. Сведения о строении массива горы получены при геологической съемке и в результате бурения единичных скважин, расположенных на значительном удалении друг от друга за пределами разведанной части Кунгурской пещеры (Катаев, Кадебская, 2010).

ПОЛЕВЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

В 2014 г. авторами статьи выполнялись наземно-подземные гравиметрические и магнитометрические наблюдения с использованием высокоточного гравиметра AUTOGRAV CG-5 фирмы SCINTREX (Канада) и цезиевого магни-

тометра G-859SX компании Geometrix (США). Планово-высотная привязка точек наблюдений выполнена с использованием современной геодезической аппаратуры. В качестве вариационной станции применялся квантовый магнитометр POS-1 производства Уральского федерального университета (Россия). Расположение точек наблюдений в плане показано на рис. 2.

Гравиметрические и магнитометрические измерения выполнены в пределах участка размером 150×300 м с шагом 15 м и выходом в «нормальное поле». Небольшие отклонения в плане от квадратной сети обусловлены наличием карстовых форм рельефа. Гравиметрические наблюдения в Кунгурской Ледяной пещере выполнены вдоль хода, соединяющего грот Данте с гротом Метеорный (рис. 2). Среднеквадратическая погрешность определения аномалии Буге при наземной съемке по результатам контрольных наблюдений с учетом погрешности определения высот и координат пунктов наблюдений, вычисления поправок за влияние рельефа местности составила ± 0.015 мГал, при подземной — ± 0.010 мГал.

По результатам крупномасштабных топографо-геодезических работ были закартированы основные формы рельефа вплоть до карстовых воронок глубиной более 1.5 м. Полученные дан-

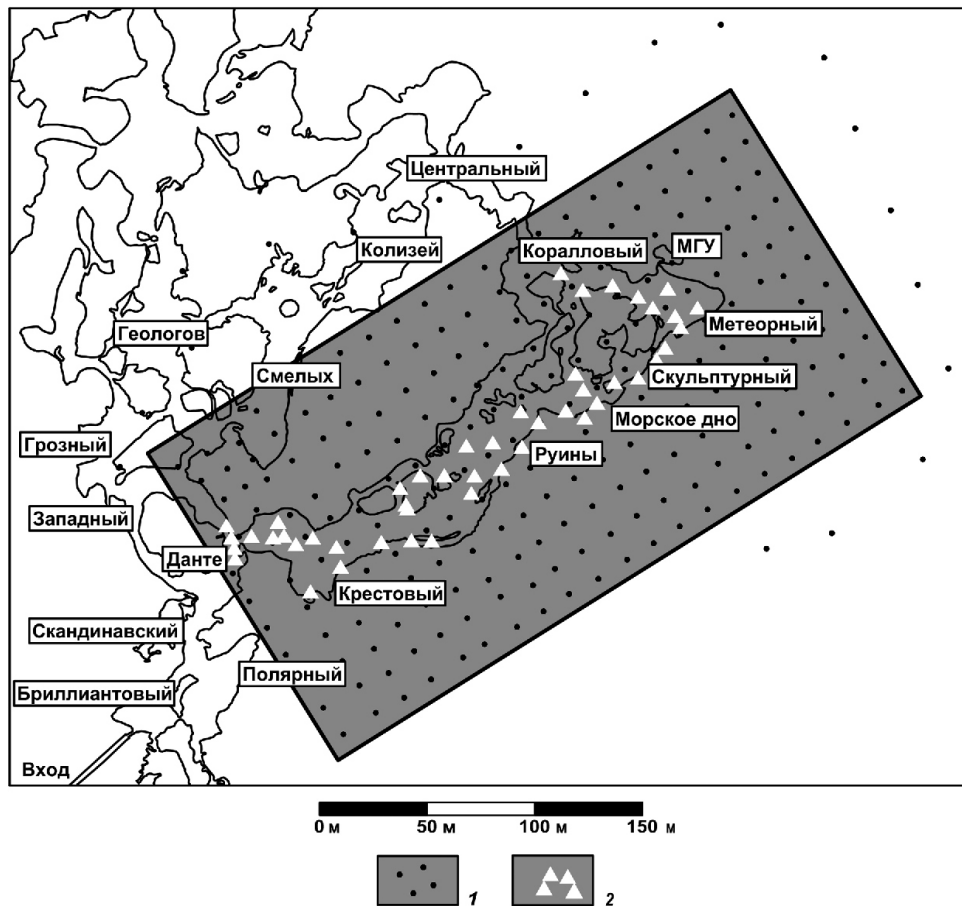


Рис. 2. Схема расположения пунктов гравиметрических и магнитометрических наблюдений. Контур пещеры приведен по данным (Лавров, Чугаева, 2001). Текстом даны названия гротов. 1 – пункты гравиметрических (магнитометрических) наблюдений на поверхности Ледяной горы; 2 – пункты гравиметрических наблюдений в Кунгурской Ледяной пещере.

ные позволили составить детальную цифровую модель земной поверхности для высокоточного учета поправок за влияние рельефа в центральной и ближней зоне.

Участок пересекают линии электропередач (ЛЭП), которые являются помехой при магнитной съемке. Результаты повторных наблюдений на точках вблизи линии электропередач показали достаточную стабильность отсчетов магнитометра G-859SX ($\pm 1-3$ нТл).

КАМЕРАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА, АНАЛИЗ НАБЛЮДЕННЫХ ПОЛЕЙ И ИХ ТРАНСФОРМАНТ

Массив Ледяной горы в районе Кунгурской пещеры сложен карбонатными (известняк, доломит) и сульфатными (гипс, ангидрит) породами. Поверхность самой верхней карбонатной пачки сильно закарстована, впадины заполнены крупноглыбовым материалом карстовых брекчий, образовавшихся в процессе разрушения вышележащих карбонатных отложений. Перекрывают поверхность Ледяной горы четвертичные глины и суглинки мощностью до 18 метров на водораз-

деле, полностью смытые вблизи склона и на отдельных участках возвышенности (Кунгурская ..., 2005). Схематический геологический разрез Ледяной горы (Кадебская, Калинина, 2014), показан на рис. 3.

Рельеф земной поверхности в пределах участка представляет собой склон горы с падением в южном направлении (рис. 4). Абсолютные отметки земной поверхности в пределах участка по данным инструментальной съемки варьируются в диапазоне от 168 до 191.5 м. В большом количестве присутствуют локальные карстовые формы рельефа глубиной от 0.5 до 11 м.

Диапазон аномальных значений силы тяжести в редукции Буге достигает 0.5 мГал. Значения аномального магнитного поля ΔT лежат в интервале от -60 до 30 нТл.

Оценка величины плотности промежуточного слоя была выполнена двумя способами: по методу Неттлетона и по разности наблюдений силы тяжести в точках на земной поверхности и в пещере согласно формуле, приведенной в инструкции (Инструкция ..., 1980). Значение плотности, определенное методом Неттлетона составило 2.0 г/см³, а по разности двухуровне-

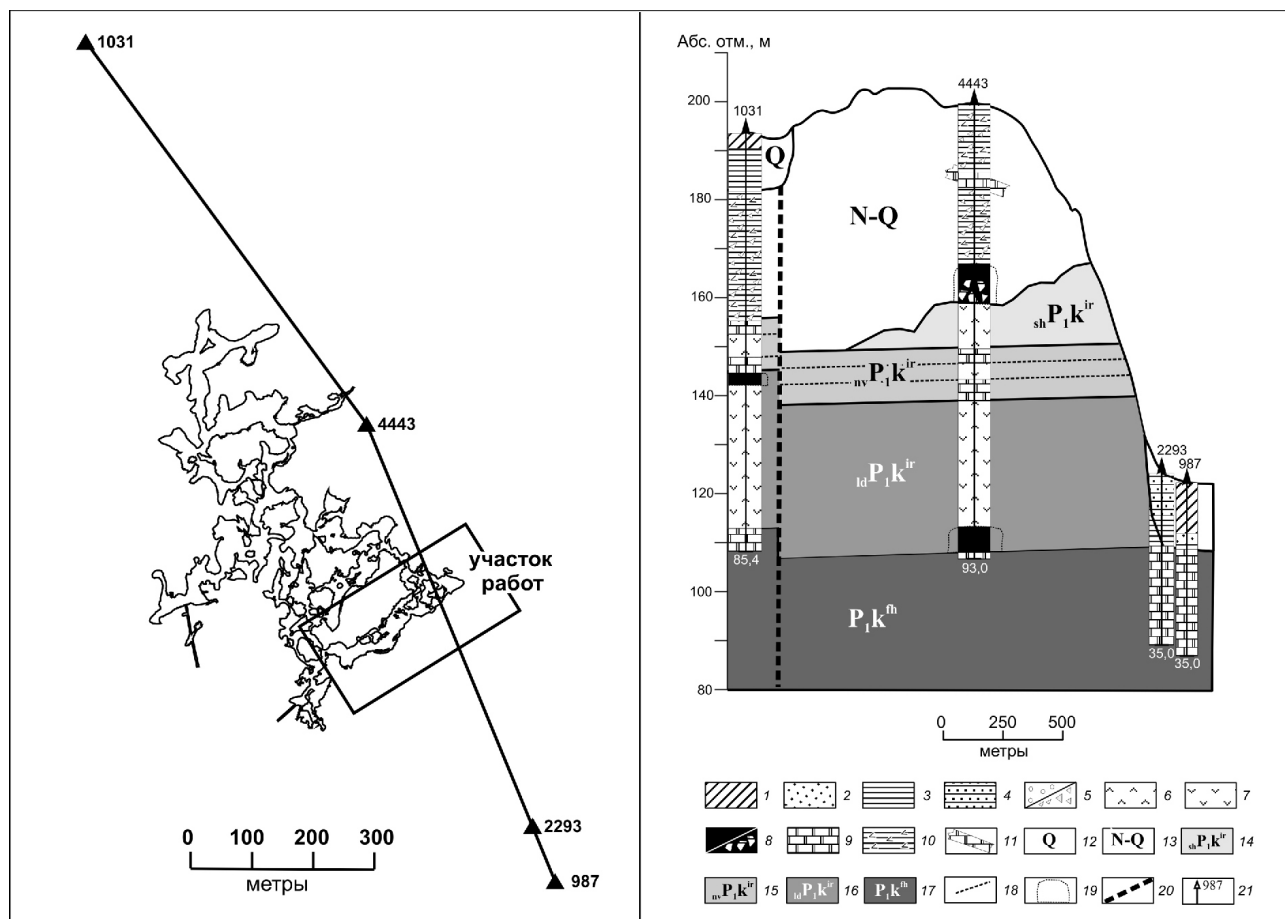


Рис. 3. Геологический разрез Ледяной горы на участке Кунгурской пещеры по материалам (Кадебская, Калинина, 2014): 1 – суглинок; 2 – песок; 3 – глина; 4 – супесь; 5 – гравийно-галечниковый/дресвяно-щебневый грунт; 6 – ангидрит; 7 – гипс; 8 – провалы инструмента/щебнево-глыбовый материал в карстовой полости; 9 – доломит; 10 – глина известковистая; 11 – фрагмент ксенолита елкинской пачки; 12 – четвертичные отложения; 13 – неоген-четвертичные отложения; 14-16 – пачки (14 – шалашнинская, 15 – неволинская, 16 – ледянопещерская); 17 – филипповский горизонт; 18 – границы между карбонатными и сульфатными породами неволинской пачки; 19 – карстовая полость; 20 – линии предполагаемых разломов; 21 – скважина и ее номер.

вых гравиметрических наблюдений – 2.05 г/см³. Второе значение, как более точное, было принято авторами при расчете поправки за промежуточный слой и учете топографических масс.

Оценка области влияния ЛЭП при магнитной съемке проводилась по результатам решения обратной задачи методом подбора для линейно вытянутого однородно намагниченного тела. Расчетная зона существенного влияния ЛЭП, обозначенная на рисунке 4г, исключалась из рассмотрения.

Первые результаты интерпретации данных наземной гравиметрической и магнитной съемок предлагается рассмотреть на картах трансформант, приведенных на рис. 5. Трансформации гравитационного поля выполнены с использованием методов истокообразной аппроксимации и вейвлет-анализа на основе базисной функции DOG2.

В процессе визуального анализа полей и их трансформант обнаружена линейная зона

(рис. 5а), аномальная по своим магнитным и плотностным характеристикам. Геологической причиной аномалии является возможное наличие в разрезе дизъюнктивного нарушения, заполненного глинистым и обломочным материалом.

Локальная составляющая гравитационного поля, полученная в результате вейвлет-анализа (рис. 5б), отражает влияние объектов, расположенных в массиве горы выше уровня ледяной пещеры. Основной интерес вызывает интенсивная отрицательная аномалия силы тяжести, опоясанная кольцом небольших карстовых воронок (рис. 5б). В эпицентре аномальной зоны проседания земной поверхности по данным инструментальных наблюдений не зафиксированы. Предположительно, выделенная область связана с наличием карстовой полости, перекрытой породами, обладающими достаточным запасом прочности. При таких условиях оседания земной поверхности в начальный момент формирования

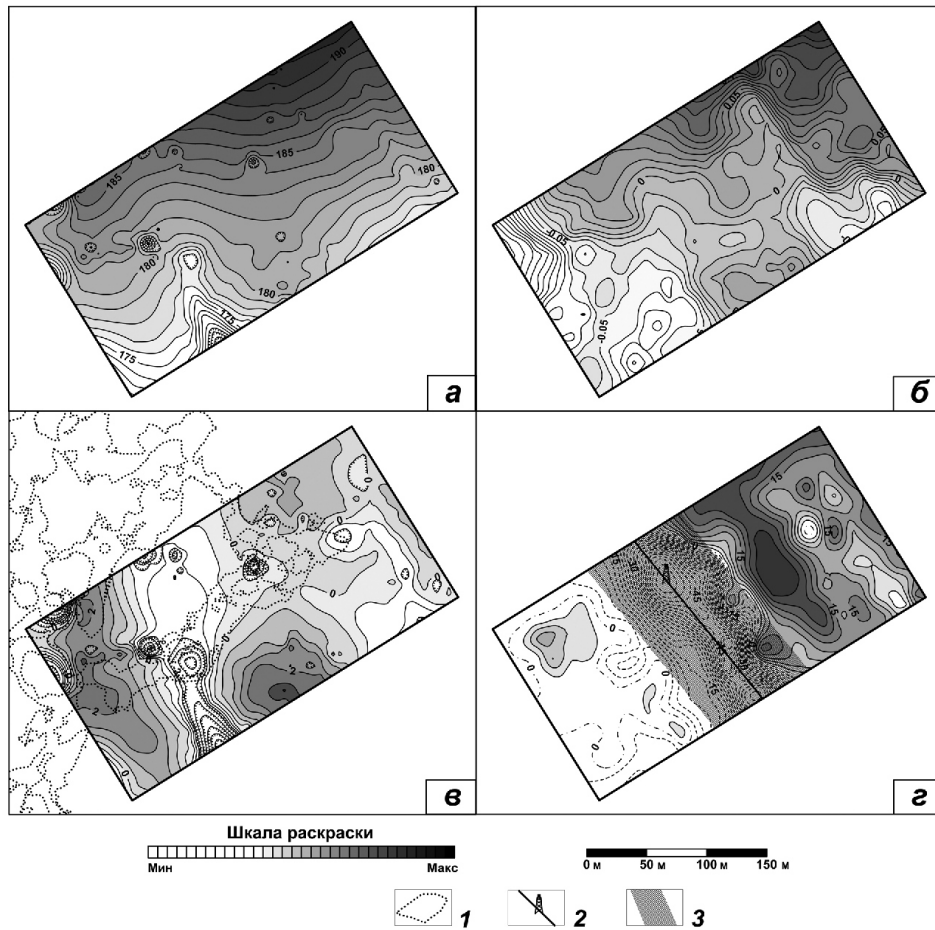


Рис. 4. Наблюдаемые поля и рельеф земной поверхности. *а* – изогипсы рельефа земной поверхности по данным топографической съемки в метрах; *б* – изоаномалы силы тяжести в редуции Буге с плотностью промежуточного слоя 2.05 г/см^3 в мГал; *в* – изогипсы локальных форм рельефа земной поверхности в метрах; *з* – изодинамы аномального магнитного поля ΔT_a в нТл. 1 – контур Кунгурской Ледяной пещеры по данным (Лавров, Чугаева, 2001); 2 – положение линий электропередач и металлической опоры; 3 – зона существенного влияния ЛЭП.

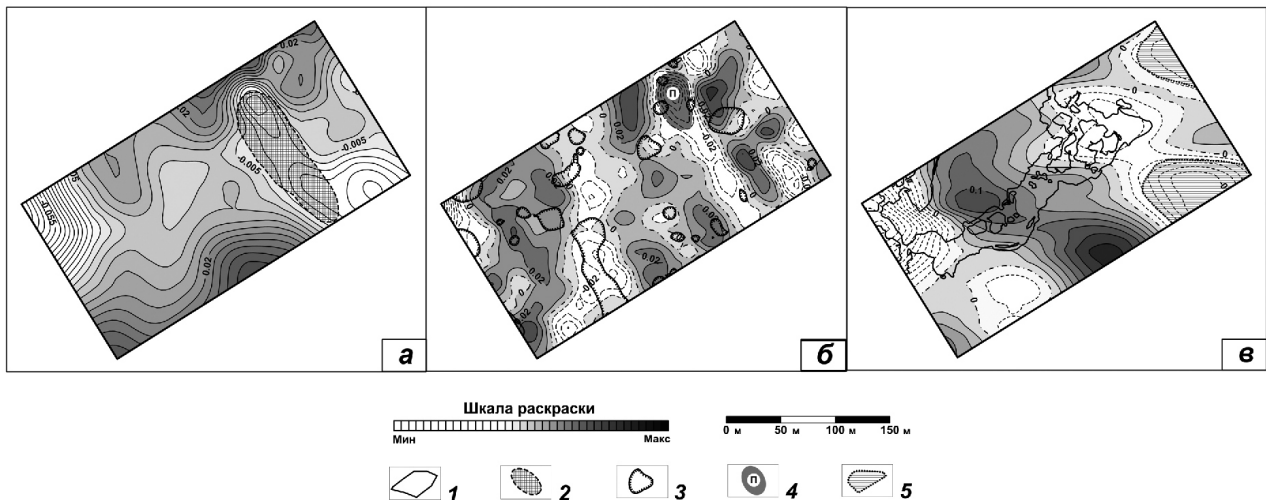


Рис. 5. Трансформанты гравитационного поля. *а* – поле силы тяжести Δg (в мГал), редуцированное на горизонтальную плоскость на высоту $H = 195$ метров; *б* – отображение локальной составляющей гравитационного поля в виде вейвлет-коэффициентов (усл. ед.); *в* – отображение среднечастотной компоненты гравитационного поля в виде вейвлет-коэффициентов (усл. ед.). 1 – контур Кунгурской Ледяной пещеры по данным (Лавров, Чугаева, 2001); 2 – линейная аномалия гравитационного и магнитного полей; 3 – контуры основных отрицательных локальных форм рельефа; 4 – предполагаемое положение подземной полости закрытого типа; 5 – возможное положение гротов вне разведанной части пещеры.

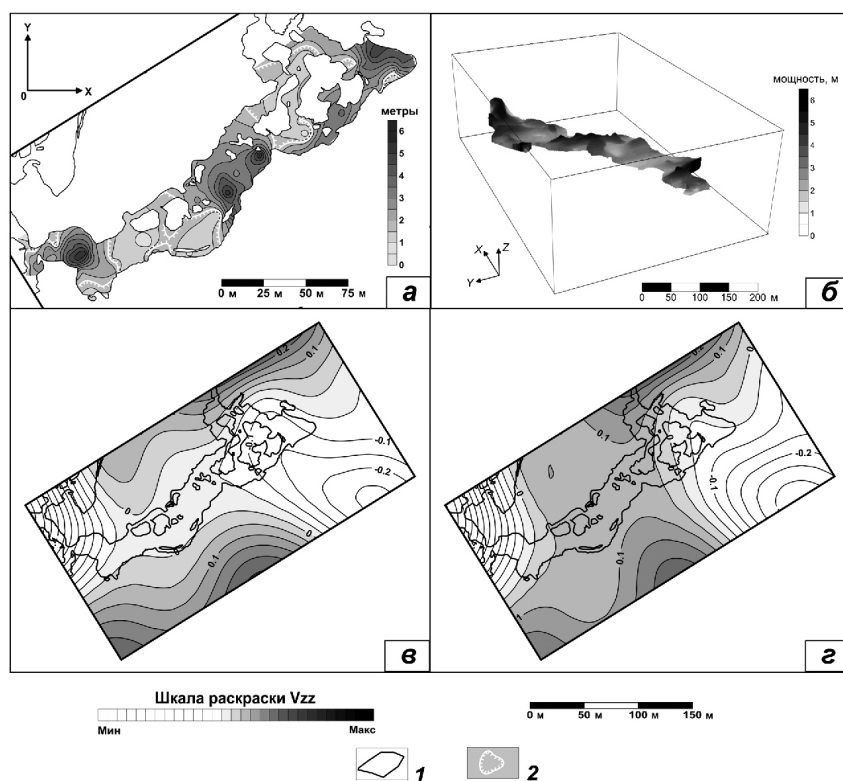


Рис. 6. Устранение гравитационного влияния пещеры. *а* – план изопахит пещеры, полученный в результате маркшейдерской съемки; *б* – трехмерный образ пещеры, созданный по инструментальным данным; *в* – аномальный вертикальный градиент силы тяжести V_{zz} (в мГал/км), вычисленный на горизонтальной плоскости на высоте $H = 240$ метров до устранения гравитационного эффекта пещеры; *г* – аномальный вертикальный градиент силы тяжести V_{zz} (в мГал/км), вычисленный на горизонтальной плоскости на высоте $H = 240$ метров после устранения гравитационного эффекта пещеры. 1 – контур Кунгурской Ледяной пещеры по данным (Лавров, Чугаева, 2001); 2 – изопахита с отметкой 1.75 метра (средний рост человека).

провала сопряжены с ослабленными зонами в краевых частях полости. Результаты решения обратной задачи гравиразведки методом конечных элементов показали, что объем полости может превышать 1000 м^3 .

Локальные отрицательные аномалии вейвлет-коэффициентов на востоке участка (рис. 5в) авторы связывают с гравитационным влиянием гротов, расположенных вне разведанной части Кунгурской Ледяной пещеры.

Вопрос о возможности картирования Ледяной пещеры по гравиметрическим данным оставался открытым. По результатам маркшейдерской съемки авторами была построена генерализованная трехмерная модель ее внутреннего пространства (рис. 6а, 6б). Гравитационный эффект пещеры был рассчитан в точках земной поверхности путем решения прямой задачи от созданной модели с аномальной плотностью объекта -2.05 г/см^3 . Расчетная величина аномального эффекта непосредственно над пещерой достигает -0.035 мГал , что полностью совпадает с предварительными оценками.

Предположительно, аномалия вертикального градиента силы тяжести (рис. 6в), совпадающая в плане с положением Кунгурской

Ледяной пещеры, обусловлена ее гравитационным влиянием. Сопоставление трансформант одного типа, вычисленных до редуцирования аномального эффекта Ледяной пещеры (рис. 6в) и после него (рис. 6г), свидетельствует в пользу данной гипотезы, поскольку процедура редуцирования практически целиком устраняет аномалию.

Аномальные гравитационные эффекты, сгенерированные гротами Данте и Метеорный, полностью подавить не удалось. Остаточное влияние связано с разуплотнением пород над гротами вследствие интенсивных разрушений, затрагивающих весь интервал от кровли пещеры до земной поверхности. Оба грота обрушены в центральной части, а на поверхности выражены провалами.

ВЫВОДЫ

Первые результаты опытно-методических работ показывают, что гравиразведка отлично справляется с задачей картирования последствий карстово-суффозионных процессов. Карстовые полости и зоны разуплотнения пород проявляются в аномалиях силы тяжести,

фиксируются современной гравиметрической аппаратурой и уверенно выделяются из суммарного поля. Вычислительные эксперименты, опирающиеся на данные полевых измерений, убедительно доказывают возможность картирования гротов и галерей вне разведанной части Кунгурской Ледяной пещеры.

Измерения магнитного поля дополняют информацию сведениями о магнитных характеристиках пород верхней части разреза, и позволяют с большей достоверностью выполнять картирование разрывных нарушений и полостей, заполненных глинистым и обломочным материалом.

В дальнейшем, подробная совместная интерпретация материалов наземно-подземных съемок позволит выявить в деталях изменения плотностных характеристик разреза между двумя уровнями наблюдений, а не ограничиваться определением средней (эффективной) плотности толщи пород.

Авторы выражают искреннюю благодарность за предоставленные материалы по Кунгурской Ледяной пещере, за помощь в организации полевых работ и консультации сотрудникам ГИ УрО РАН (Пермь) О.И. Кадебской и И.И. Чайковскому

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-05-31035) в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы №80 (тема: «Развитие

методов пространственного геофизического мониторинга экзотехносферы»).

Список литературы

- Инструкция по гравиразведке. М.: Недра, 1980. 80 с.
- Кадебская О.И., Калинина Т.А. Литологический разрез Ледяной горы // Комплексное использование и охрана подземных пространств: Международная научно-практическая конференция, посвященная 100-летию юбилею научной и туристско-экскурсионной деятельности в Кунгурской Ледяной пещере и 100-летию со дня рождения В.С.Лукина / Под общей ред. О.И. Кадебской. Пермь: ГИ УрО РАН, 2014. С. 23-24.
- Катаев В.Н., Кадебская О.И. Геология и карст города Кунгура. – ПГУ, ГИ УрО РАН. Пермь, 2010. 236 с.
- Кунгурская Ледяная пещера: опыт режимных наблюдений. Под ред. В.Н. Дублянского. Екатеринбург: ГИ УрО РАН, 2005. 376 с.
- Лавров И.А., Чугаева А.А. Электронная карта Кунгурской Ледяной пещеры // Пещеры: Межвуз. сборник научных трудов. Пермь, 2001. С. 73-75.
- Солуха В.И., Дорофеев Е.П., Сычева М.В. Гравиметрические исследования в Кунгурской пещере / Пещеры. Межвузовский сборник научных трудов. Пермь: Пермский ун-т, 1978. С. 78-85.

EXPERIMENTAL-METHODOLOGICAL GEOPHYSICAL WORKS ON THE TERRITORY OF THE HISTORICAL-NATURAL COMPLEX «ICE MOUNTAIN AND KUNGUR ICE CAVE»

A.V. Pugin, A.V. Michurin, A.A. Simanov, V.V. Khohlova, P.N. Novikova

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of sciences, 614007, Sibirskaya str., 78a, Perm, Russia

Results of ground-underground gravimetrical and magnetometric investigations on the territory of natural system «Ice Mountain and Kungur Ice Cave» are presented in the article. The description of field operations is reduced. The first results of the analysis of observed fields and their transforms containing elements of geological interpretation are given.

Keywords: gravitational exploration, magnetic exploration, Kungur Ice Cave, Ice Mountain, karst.