

ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ РАЗУПЛОТНЕННЫХ ЗОН В ПОДРАБОТАННОМ МАССИВЕ ПО ДАННЫМ ВЫСОКОТОЧНЫХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2023 С.Г. Бычков, Г.В. Простолупов, А.А. Симанов, В.В. Хохлова, Г.П. Щербинина

Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия, 614007; e-mail: bsg@mi-perm.ru

Поступила в редакцию 01.03.2023 г.; после доработки 16.05.2023 г.; принята в печать 26.06.2023 г.

В работе представлены результаты гравиметрических исследований на месторождении калийных солей с целью получения информации о развитии негативных инженерно-геологических процессов в горном 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, оседания, безопасность.

ВВЕДЕНИЕ

Длительные техногенные нагрузки, связанные с эксплуатацией месторождений полезных ископаемых, являются мощным воздействием на природную геологическую среду. Откликом на эти воздействия могут быть масштабные изменения плотностного строения горного массива, ведущие к катастрофическим последствиям — просадкам и провалам земной поверхности, угрожающие жизнедеятельности и приносящие значительные экономические потери. Для изучения и прогнозирования негативных инженерно-геологических явлений широко используются геофизические методы (Барях и др., 2013), немаловажную роль в комплексе которых играют гравиметрические исследования (Бычков и др., 2019; 2020; 2021; 2022). Об актуальности задачи выявления техногенного воз-

действия на геологическую среду говорят факты катастрофических аварий последних лет с затоплением рудников Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) (Красноштейн и др., 2009).

Месторождение, расположенное в пределах Пермского края (рис. 1а), является основной сырьевой базой калийной промышленности России (Кудряшов, 2001). В тектоническом отношении оно приурочено к центральной части Соликамской впадины Предуралья Краевого прогиба (рис. 1б). Месторождение представлено соляной толщей кунгурского яруса, имеющей форму линзы мощностью до 550 м и площадью более 8000 км². Изучению геологического строения месторождения и безопасности его освоения всегда уделялось большое внимание, что обусловлено его масштабом и практическим значением (Петротектонические..., 2000).

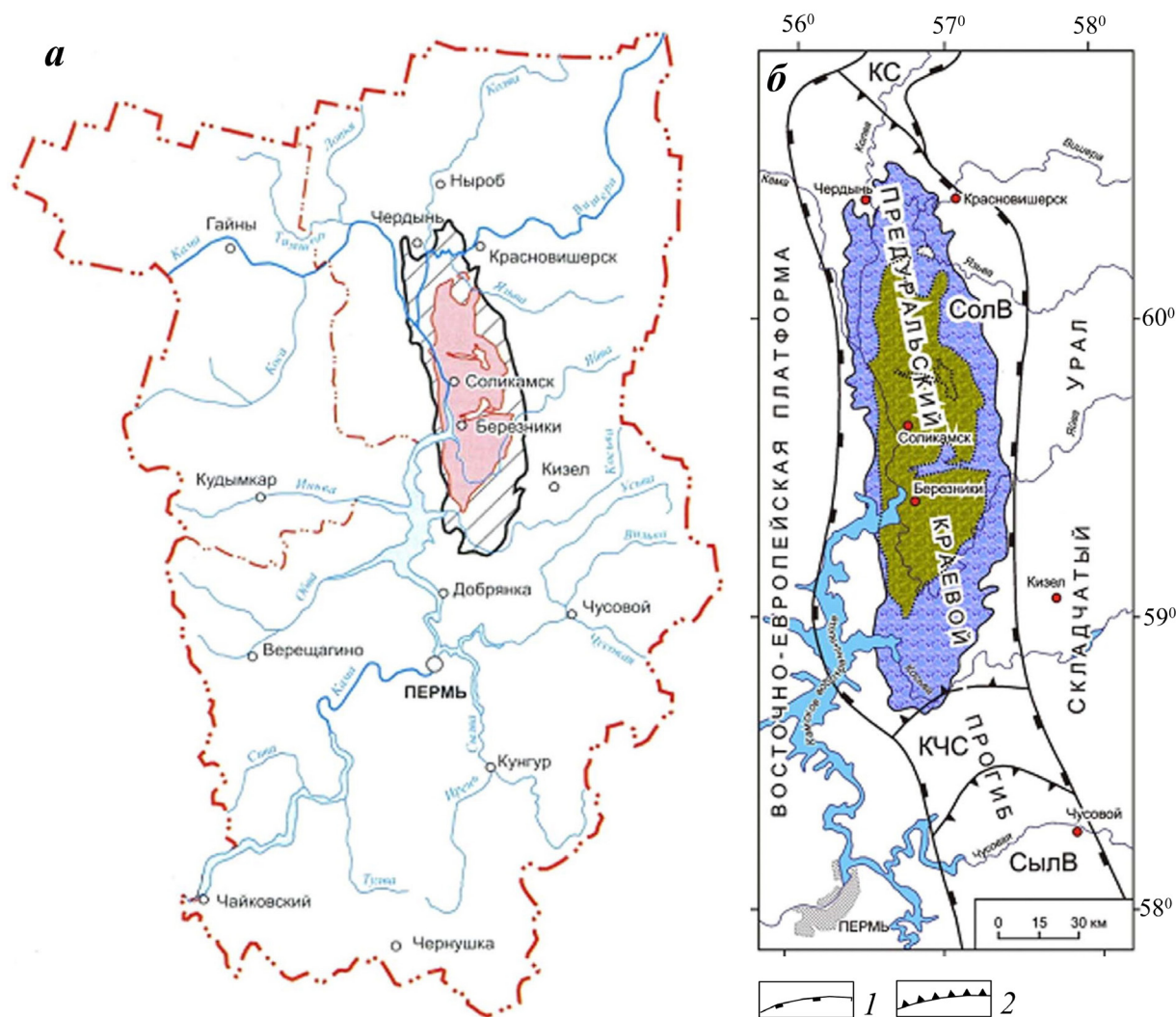


Рис. 1. Верхнекамское месторождение калийных солей: *a* — географическое положение (штриховкой отмечена площадь развития соляной залежи, розовым цветом — калийная залежь); *б* — тектоническое положение (КС — Колвинская седловина, СолВ — Соликамская впадина, КЧС — Косвинско-Чусовская седловина, СылВ — Сылвенская впадина). 1 — Предуральский прогиб; 2 — границы крупных тектонических структур (из (Минерально-сырьевые..., 2006)).

Fig. 1. Verkhnekamskoye potash deposit: *a* — geographical location (hatching indicates the area of development of the salt deposit, pink color indicates potash deposit); *б* — tectonic position (КС — Kolvinskaya saddle, СолВ — Solikamsk depression, КЧС — Kosvinskaya-Chusovskaya saddle, СылВ — Sylvenskaya depression): 1 — Cis-Ural trough, 2 — boundaries of large tectonic structures. (from (Mineral resources..., 2006)).

Геологический разрез месторождения представлен породами нижнепермского возраста (Кудряшов, 2001). В верхней части разреза от земной поверхности до глубины ~150 м находится терригенно-карбонатная толща, имеющая плотность 2.40–2.49 г/см³. Ниже залегают глинисто-мергелистые породы мощностью 90 м и плотностью около 2.30 г/см³. Далее находится комплекс, включающий переходную толщу — переслаивание галита и глины переменной мощности, а также покровную каменную соль со средней плотностью 2.15 г/см³. Продуктивная толща имеет по площади значительную изменчивость литологического состава и представлена переслаиванием силь-

винита и карналлита со средней плотностью 2.10 г/см³ и мощностью около 70 м. Ниже залегают подстилающая каменная соль со средней плотностью 2.13 г/см³, ее мощность изменяется от 150 м до 400 м, а подошва залегает на глубине около 700 м.

Основным объектом изучения для гравиметрии на ВКМКС является водозащитная толща (ВЗТ), включающая в основном переходную толщу и покровную каменную соль (Кудряшов, 2001). Нарушения сплошности ВЗТ зачастую приводят к аварийному затоплению рудников, как это произошло в 1986 г. на Третьем и в 2007 г. на Первом Березниковском рудниках (Красноштейн и др., 2009).

ГРАВИМЕТРИЧЕСКИЙ
МОНИТОРИНГ

Мониторинговые гравиметрические исследования широко применяются при исследованиях вулканической деятельности и в гидрогеологии (Biegert et al., 2008; Carbone, Gresco, 2007; Jentzsch et al., 2004). Весьма эффективно применение гравиметрических данных для изучения карстовых явлений (Пугин и др., 2014; Erpelbaum et al., 2008; Jacob et al., 2009; Rybakov et al., 2001). Большой объем повторных наблюдений проводится на месторождениях нефти и газа, где гравиметрические данные используются для определения изменений пластового давления и оценки подъема нефте- и газо-водяного контакта (Андреев и др., 2012; Каленицкий, Ким, 2012; Паровышний и др., 2005; Gelderen et al., 1999; Glegola et al., 2015; Reitz et al., 2015; Gasperikova, Hovsten, 2008). Исследования оседаний земной поверхности и развития подземных полостей по гравиметрическим данным над соляными шахтами осуществляется в Великобритании (Branston, Styles, 2002; Styles et al., 2006) и Украине (Багрий и др., 2016; Дубовенко, Черная, 2011; Tsiupiak et al., 2019).

На ВКМКС с целью выявления вариаций силы тяжести, связанных с техногенным воздействием на геологическую среду, мониторинговые гравиметрические наблюдения проводятся с начала 2000 годов (Новоселицкий и др., 2008). По результатам повторных 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 определенный интервал времени.

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 (Бычков и др., 2017).

Обработка полевых гравиметрических данных производится с применением современных процедур редуцирования, основанных на международно-принятых уравнениях и установленных в России параметрах Земли. Данные процедуры существенно отличаются от описанных в учеб-

никах и инструкциях и позволяют повысить информативность гравиметрических данных (Бычков и др., 2015).

Основываясь на предлагаемой модели гравиметрического мониторинга и мировом опыте проведения мониторинговых гравиметрических исследований, разработана методика совместного применения качественных и количественных методов интерпретации (Бычков и др., 2013; Bychkov et al., 2021).

Качественная интерпретация осуществляется с использованием системы Vector (Простолупов и др., 2006), с помощью которой производится разделение гравитационного поля на составляющие, отражающие различные интервалы разреза. Результаты векторного сканирования успешно используются для уточнения геологических гипотез, построения модели первого приближения и задания априорных ограничений для решения обратной задачи.

Количественная интерпретация осуществляется путем решения обратных задач гравиметрической разведки монтажным методом с использованием гарантированного подхода к оценке качества решения и с построением функции локализации источников поля (Балк, Долгаль, 2020; Долгаль и др., 2012). Модель среды, используемая при этом методе решения задачи (изолированный объект в однородной среде), полностью удовлетворяет геологической модели гравиметрического мониторинга. Результатом количественной интерпретации динамических аномалий силы тяжести является область распространения и наиболее вероятный интервал глубин изменения плотности горных пород, произошедший в период между двумя измерениями поля.

Для установления связи между оседаниями земной поверхности и изменениями гравитационного поля создана динамическая модель гравиметрического мониторинга (Бычков и др., 2022). Процесс разуплотнения горных пород вследствие затопления горных выработок отражается отрицательными динамическими аномалиями силы тяжести. Последующее оседание земной поверхности над зоной разуплотнения приводят к уплотнению пород, что будет фиксироваться положительной динамической аномалией силы тяжести.

ОПЫТНЫЕ РАБОТЫ
НА ГРАВИМЕТРИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ

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) (Бычков и др., 2020).

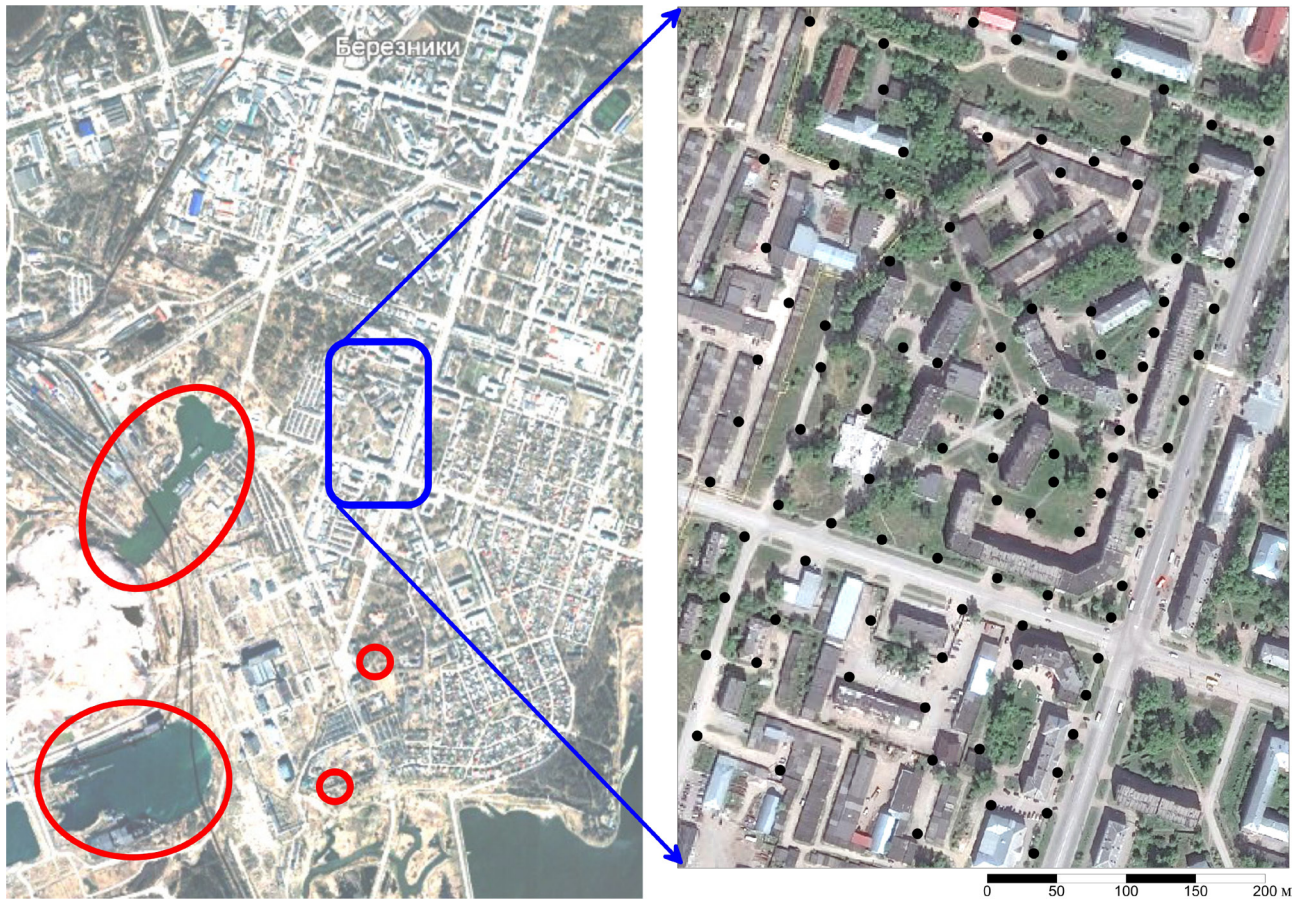


Рис. 2. Расположение гравиметрического полигона на карте г. Березники. Красными овалами показаны контуры провалов земной поверхности, черными точками — пункты гравиметрических наблюдений (по Google Earth с добавлениями).

Fig. 2. Location of the gravimetric test site on the map of Berezniki (red ovals show the contours of the dips of the ground surface failures, black dots are gravimetric observation points) (from Google Earth with additions).

Гравиметрические работы на полигоне проводились ежегодно в осенний период (сентябрь–октябрь) вплоть до 2020 г.

Полигон состоит из 102 пунктов, работы на котором выполнялись на закрепленных металлических знаках (дюбелях, забитых в асфальт) гравиметрами AUTOGRAV CG-5. В каждом цикле измерений определялись не только значения силы тяжести, но и фиксировались изменения высот пунктов. Планово-высотная привязка гравиметрических пунктов осуществляется с использованием спутниковых GNSS-технологий. Среднеквадратическая погрешность определения значений силы тяжести составила ± 0.005 мГал, высот пунктов — ± 0.01 – 0.02 м.

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.

Анализируя изменения гравитационного поля и высот гравиметрических пунктов (рис. 3),

прежде всего, следует отметить, что амплитуда, размеры и местоположение динамических аномалий существенным образом меняются в различных циклах мониторинга. Можно констатировать увеличение скорости изменения силы тяжести: если в период 2016–2017 гг. амплитуда отрицательной аномалий составляла 0.05 мГал, то к 2019–2020 гг. амплитуда увеличилась до 0.10 мГал. Количественная интерпретация динамических аномалий показала, что источник изменения поля находится на глубине порядка 20–40 м. Увеличение амплитуды динамической аномалии свидетельствует об ускорении процесса разуплотнения пород надсоляной толщи, расположенной над затопленными шахтными полями. При этом весьма интенсивно происходят оседания земной поверхности до 80 см за четыре года. Изменение формы и амплитуды динамических аномалий во времени и в пространстве, по нашему мнению, связано с процессом непрерывного оседания земной поверхности.

В период 2019–2020 гг. произошла инверсия знака динамических аномалий. В юго-западной

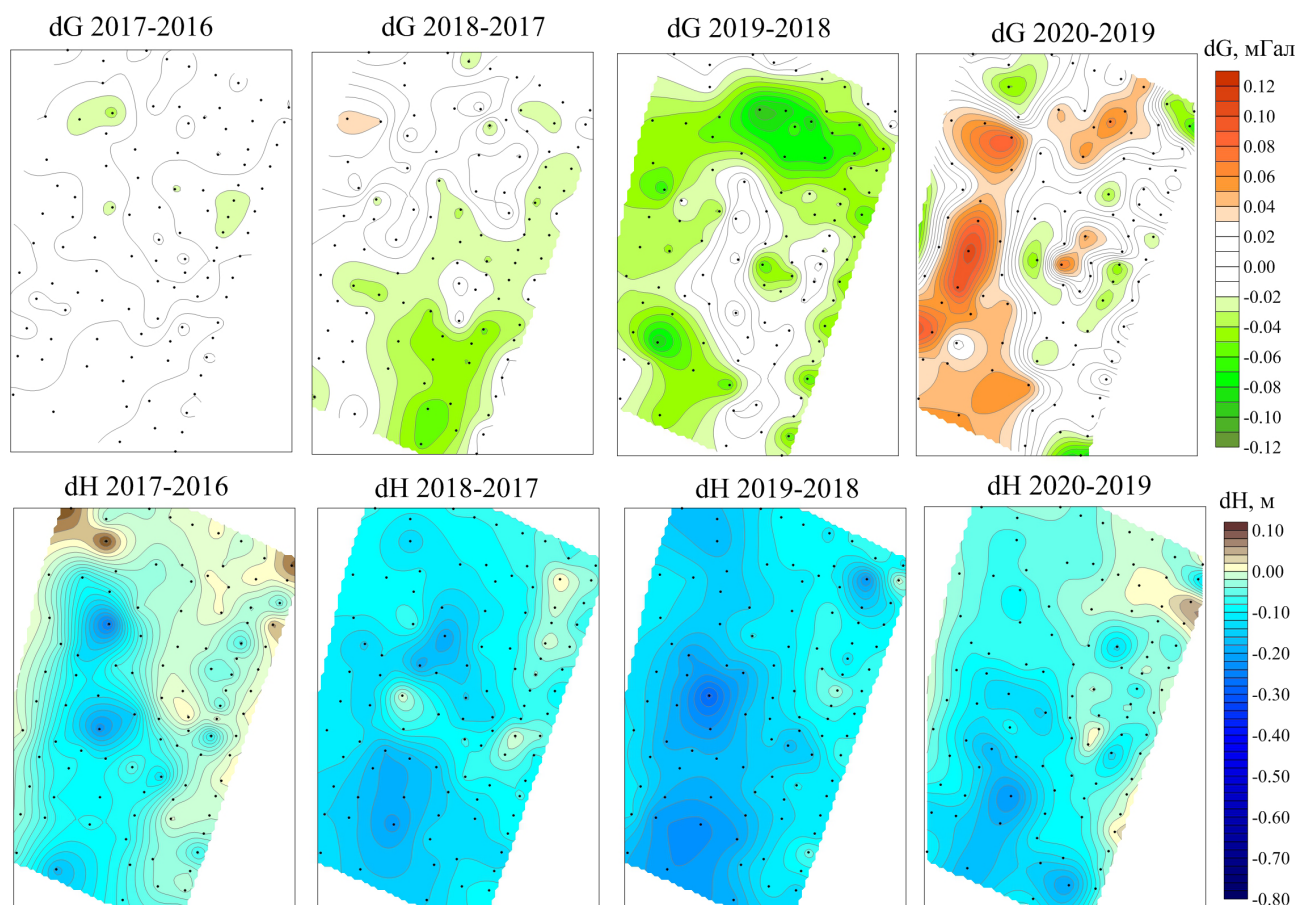


Рис. 3. Ежегодные изменения аномалий силы тяжести и высот пунктов гравиметрических наблюдений на полигоне (цифрами на картах показан период в годах).

Fig. 3. Annual changes in gravity anomalies and heights of gravimetric observation points at the test site (numbers on the maps show the period in years).

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 прогноз оседаний. 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».

Опыт работ по проведению гравиметрических исследований на полигоне позволил выполнить интерпретацию данных на различных участках ВКМКС.

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ РАЗУПЛОТНЕННЫХ ЗОН В ПОДРАБОТАННОМ МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД

На одном из участков ВКМКС 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 ($\geq 4^\circ$) 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.

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 гг. (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 (рис. 4а) диапазон изменения значений поля в пределах участка составляет около 1 мГал. Локальные аномалии получены путем вычитания из наблюдаемого поля гравитационного эффекта кровли соляной толщи, залегающей на абсолютных глубинах от 0 до –250 м. Данная плотностная граница вносит основной вклад в суммарное гравитационное поле. Учитывая, что более глубокозалегающие 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.

Зона отрицательных аномалий, отражающая наиболее разуплотненные породы, расположена под техногенным озером и распространяется в субмеридиональном направлении (рис. 4а). По результатам решения линейной обратной

задачи определено, что плотность надсоляных пород в пределах этих аномалий понижена на 0.05–0.08 г/см³. 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. (рис. 4б, 4в) позволил выявить участки, где в настоящее время происходят изменения плотности, обуславливающие оседания земной поверхности и увеличение размеров техногенного озера. Если к 2018 г. отрицательные динамические аномалии, отражающие процесс разуплотнения пород, отмечались преимущественно в южной части озера (рис. 4б), то в период 2018–2021 гг. разуплотнение пород происходило практически во всей центральной части участка (рис. 4в). 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. 4а). Увеличился также диапазон изменения поля: от 0.2 мГал в 2016–2018 гг. до 0.3 мГал в 2018–2021 гг. Наиболее интенсивные отрицательные динамические аномалии в настоящее время фиксируются в северной части озера.

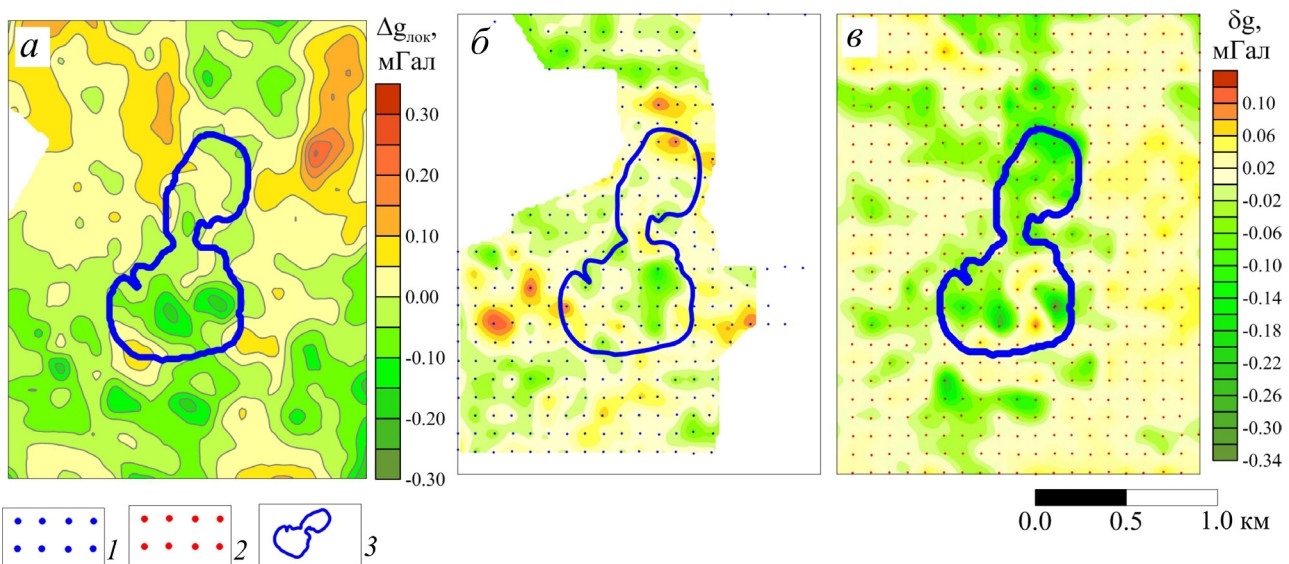


Рис. 4. Карта локальных аномалий силы тяжести в 2016 г. (а) и изменения поля за периоды 2016–2018 гг.; (б) и 2018–2021 гг.; (в): 1 — пункты наблюдений 2016 г.; 2 — пункты наблюдений 2018 и 2021 г.; 3 — контур техногенного озера.

Fig. 4. Map of local gravity anomalies in 2016 (a) and changes in the for the periods 2016–2018; (b) and 2018–2021 (v). 1 — observation points in 2016, 2 — observation points in 2018 and 2021, 3 — contour of the technogenic lake.

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. эта аномалия стала положительной. По нашему мнению, инверсия динамических аномалий объясняется процессом оседания земной поверхности (углублением дна озера), поскольку оседание земной поверхности над зоной разуплотнения приводят к уплотнению пород, что фиксируется положительной динамической аномалией силы тяжести.

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.

ГРАВИМЕТРИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ УЧАСТКОВ ШАХТНЫХ ПОЛЕЙ

С целью контроля и прогноза сохранения сплошности водозащитной толщи на одном из потенциально опасных участках шахтных полей в 2015, 2016, 2019, 2020 и 2021 гг. проводились гра-

виметрические работы. По объективным причинам здесь невозможно было провести площадные работы по регулярной сети профилей, поэтому представленные результаты в виде карт носят обзорный характер для общего представления изменений гравитационного поля. На данном участке расположена геодезическая реперная линия, по которой осуществляется контроль оседаний земной поверхности. Основной анализ изменений поля проведен по гравиметрическому профилю, совпадающему с данной линией.

На карте локальных аномалий силы тяжести (рис. 5) отчетливо выделяются две интенсивные локальные отрицательные аномалии силы тяжести интенсивностью до 0.1 мГал, отражающие зоны разуплотнения пород. В районе скв. 2 ширина аномалии составляет более 200 м; у скв. 1 ширина отрицательных аномалий силы тяжести около 100 м.

На вертикальном сечении 3D куба трансформанты гравитационного поля, полученного в системе Vector (рис. 6), можно проследить распределение отрицательных аномалий силы тяжести по глубине. Ось z на 3D диаграмме поля оцифровывается в коэффициентах трансформации k , которые связаны с эффективными глубинами источников (Простолупов и др., 2006). В районе скважин наблюдаются две изолированные отрицательные аномалии на эффективных глубинах порядка 100 м, отражающие зоны разуплотнения в надсоляной толще. Область разуплотнения

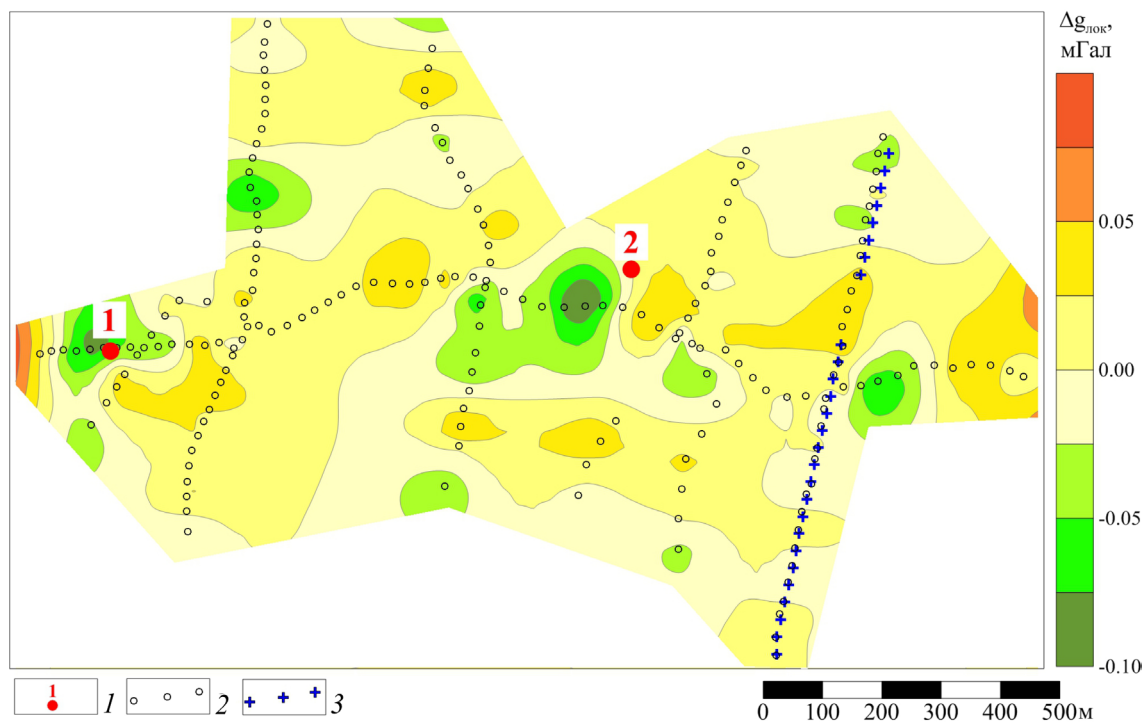


Рис. 5. Локальная составляющая гравитационного поля: 1 — скважины; 2 — пункты гравиметрических наблюдений; 3 — реперная линия.

Fig. 5. Local component of the gravity field: 1 — wells, 2 — gravity points, 3 — reference line.

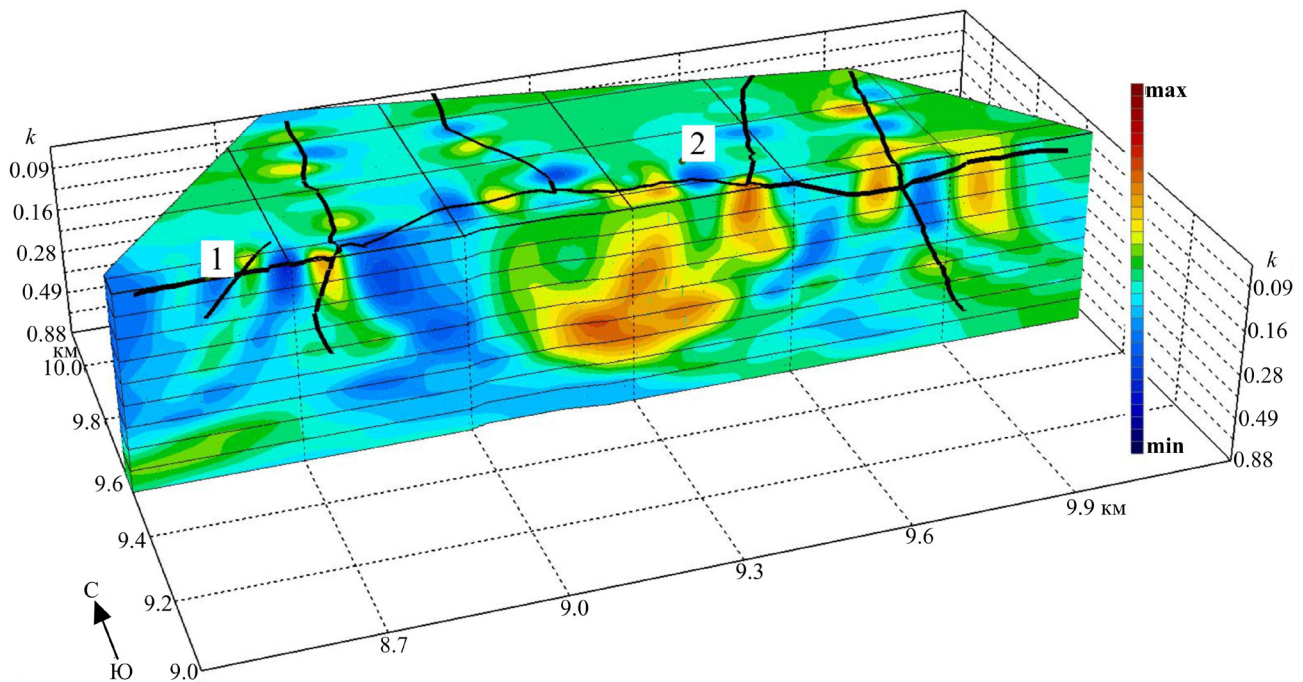


Рис. 6. Вертикальное сечение трехмерной трансформанты гравитационного поля через скв. 1 и 2 (местоположение скважин показано цифрами)

Fig. 6. Vertical section of the 3D transform of the gravity field through the wells 1 and 2 (well locations are shown by numbers)

у скв. 2 значительно шире, горизонтальные размеры отрицательной аномалии достигают 500 м, диапазон глубин превышает 300 м.

Для анализа изменения поля построены карты динамических аномалий относительно значений, полученных в 2021 г. (рис. 7), и графики изменения поля вдоль реперной линии (рис. 8) в различные периоды. На графиках в верхней части показаны значения гравитационного поля Δg , полученные в соответствующие периоды (положительные динамические аномалии показаны красной линией, отрицательные — синей), а в нижней части графиков оседания ΔH за эти же периоды.

Анализируя карты и графики динамических аномалий, можно сделать следующие выводы. Наиболее существенные изменения значений гравитационного поля происходили в период с 2014 по 2019 гг. В этот период также происходили наибольшие оседания земной поверхности. После 2019 г. ситуация с оседаниями стабилизировалась. Они стали существенно меньше; динамические аномалии гравитационного поля преимущественно положительные. Положительные динамические аномалии можно объяснить уплотнением пород вследствие оседаний. Отрицательные динамические аномалии на карте 2020–2021 гг. находятся вне профилей наблюдений.

Необходимо отметить резкие изменения гравитационного поля вблизи скв. 1. Здесь происходит инверсия знака аномалий, в 2021

г. выделяются положительные динамические аномалии небольших размеров, форма которых меняется в разные периоды времени.

КОНТРОЛЬ ОСЕДАНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

На одном из участков Верхнекамского месторождения над шахтными полями в 2019 г. проведены гравиметрические работы в зоне повышенных оседаний земной поверхности. Два профиля съемки 2019 г. совпадают с профилями ранее проведенной съемки 2016 г. (рис. 9). Кроме того, на данном участке расположены два профиля геодезических реперов (9 и 25), по которым осуществляется контроль оседаний земной поверхности. Учитывая, что координаты гравиметрических пунктов и реперов не совпадают, сравнение изменений поля и оседаний произведено по спрямленным профилям I, II и III.

Анализируя графики изменения гравитационного поля и сравнение их с графиками оседаний земной поверхности (рис. 10), можно отметить, что по северному профилю I (рис. 10а), проходящему вблизи скважины, значения поля в 2019 г. уменьшились на 0.05–0.07 мГал. Можно предположить, что здесь продолжается процесс разуплотнения горных пород в верхней части разреза в природных разуплотненных зонах, которые отражаются отрицательными локальными аномалиями силы тяжести (рис. 9).

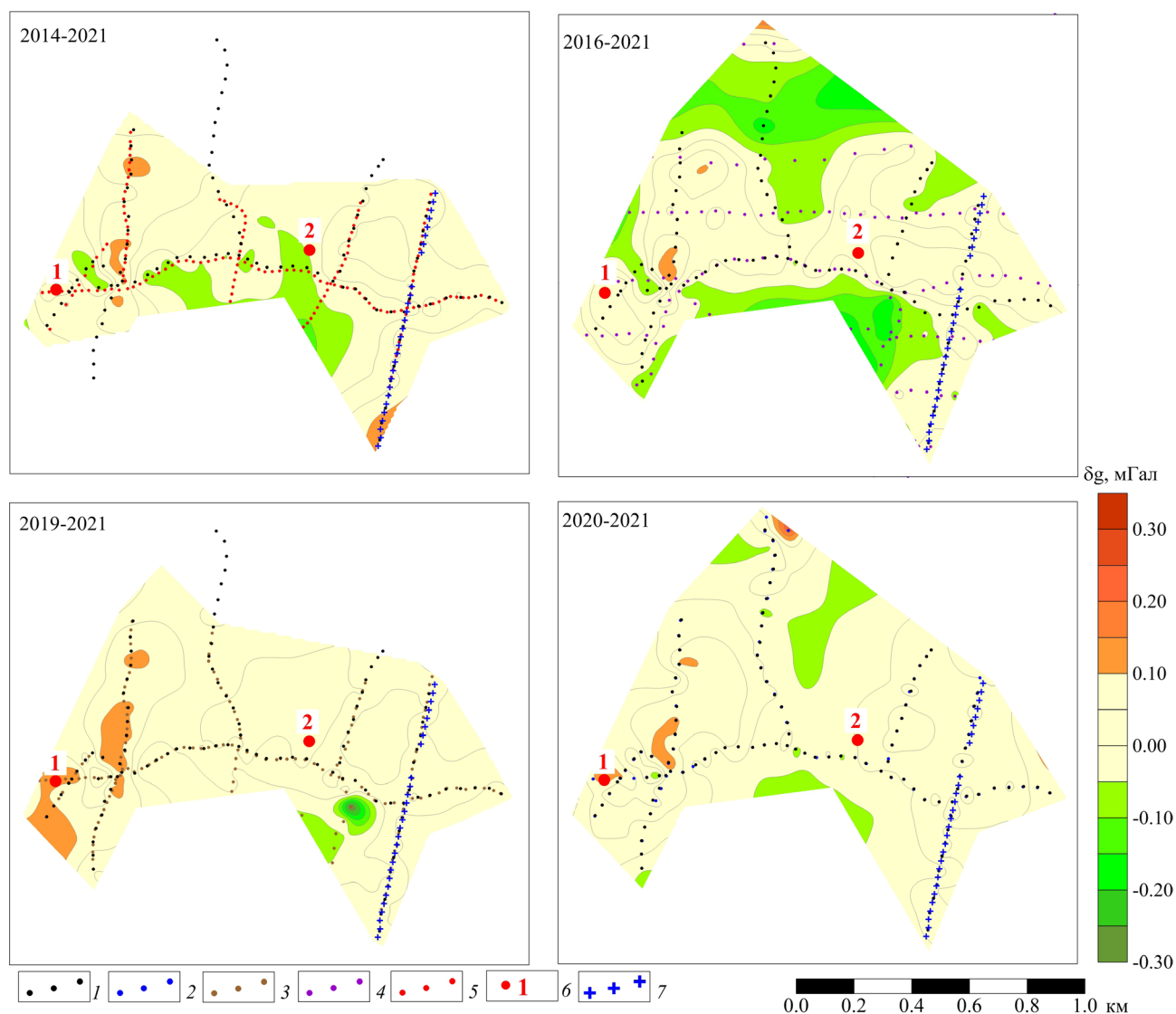


Рис. 7. Динамические аномалии силы тяжести (периоды изменения поля показаны на картах): пункты гравиметрических наблюдений: 1 — 2021 г.; 2 — 2020 г.; 3 — 2019 г.; 4 — 2016 г.; 5 — 2014 г.; 6 — скважины; 7 — реперная линия.

Fig. 7. Dynamic gravity anomalies (periods of field change are shown on the maps): gravity points: 1 — 2021; 2 — 2020; 3 — 2019; 4 — 2016; 5 — 2014; 6 — wells; 7 — reference line.

На южном профиле II (рис. 10б) в период с 2016 г. по 2019 г. значения гравитационного поля в целом несколько увеличились на 0.01–0.02 мГал, причем зоны увеличения поля отчетливо коррелируют с зонами повышенных оседаний земной поверхности за этот же период времени. Увеличение значений поля можно объяснить уплотнением пород верхней части разреза, обусловленным оседаниями. Этот вывод подтверждает характер графиков по профилю III (рис. 10в): повышенные оседания земной поверхности соответствуют повышенным значениям поля.

Данный вывод о связи изменений гравитационного поля с оседаниями земной поверхности нуждается в дальнейшем экспериментальном исследовании, однако можно предположить, что в дальнейшем повышенные оседания будут про-

исходить в районе скважины и к северо-западу от нее в области отрицательных локальных и динамических аномалий силы тяжести.

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 анома-

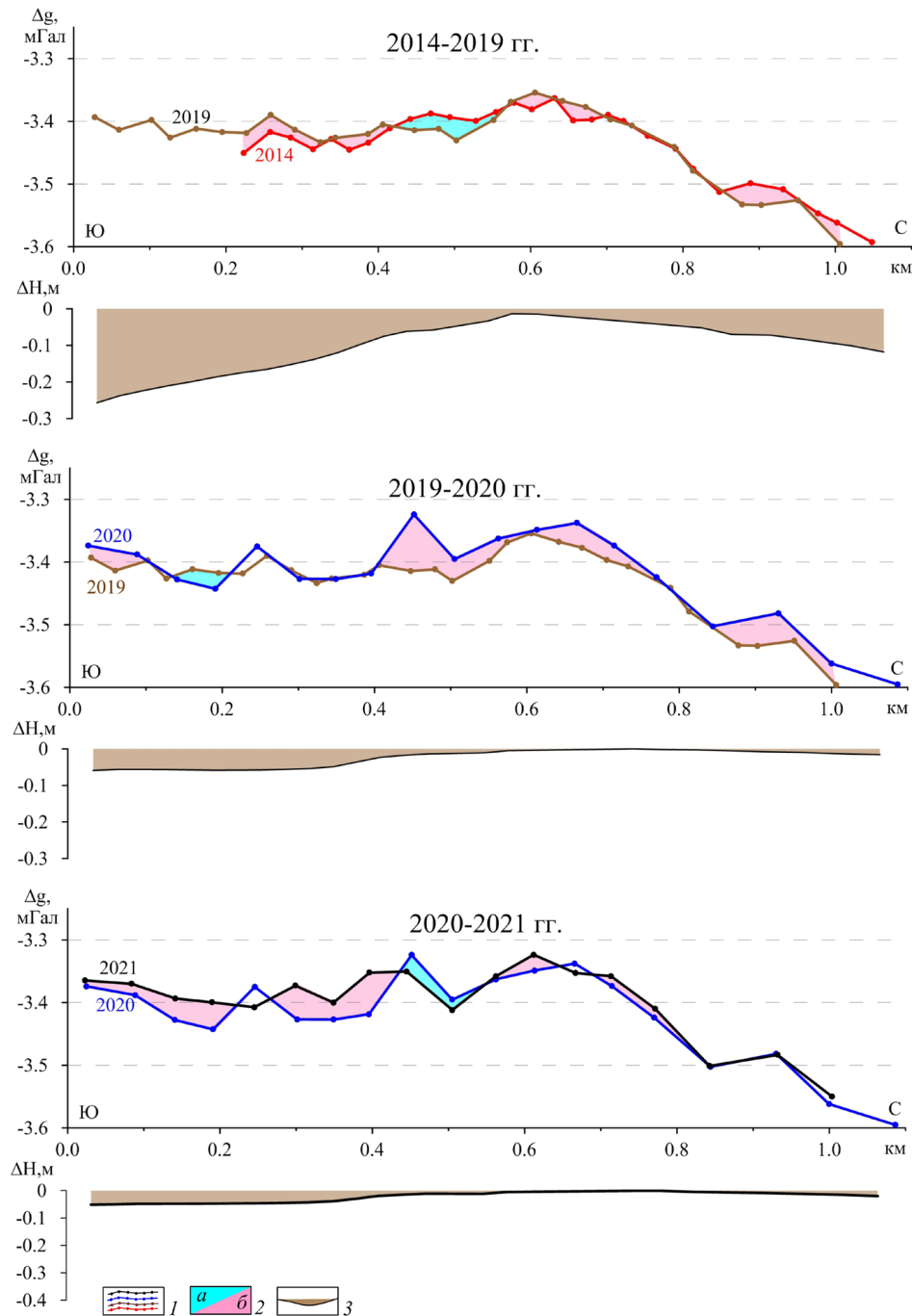


Рис. 8. Графики аномалий силы тяжести и оседаний земной поверхности по реперной линии: 1 — гравитационное поле (год измерения показан соответствующим цветом на графиках); 2 — изменение гравитационного поля (*a* — уменьшение значений, *б* — увеличение значений); 3 — оседания земной поверхности.

Fig. 8. Graphs of gravity anomalies and subsidence of the earth's surface along the reference line: 1 — gravity field (the year of measurement is shown in the corresponding color on the graphs); 2 — change in the gravitational field (*a* — decrease in values, *б* — increase in values); 3 — subsidence of the earth's surface.

лиями, выявленными по мониторинговым гравиметрическим наблюдениям, которые связаны с продолжением процесса разуплотнения, можно успешно прогнозировать участки опасных геологических процессов и повысить безопасность эксплуатации Верхнекамского месторождения.

На основании анализа локальных и динамических аномалий силы тяжести, процесса

оседаний земной поверхности и результатов вычисления плотности приповерхностных отложений можно сделать следующие основные выводы.

1. Наиболее интенсивные оседания земной поверхности происходят на участках пониженной плотности горных пород, т.е. в природных разуплотненных зонах. Эти зоны отчетливо

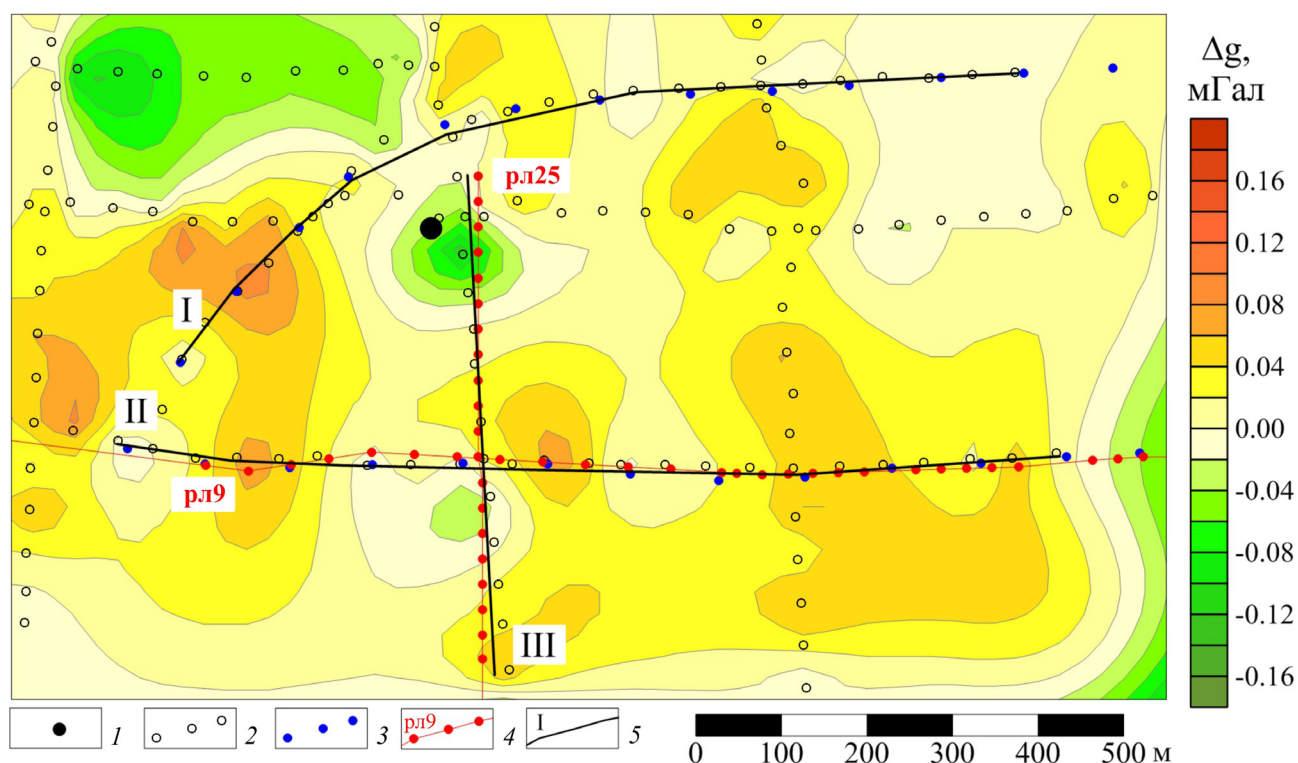


Рис. 9. Расположение гравиметрических пунктов и реперных линий: 1 — скважина; 2 — гравиметрические пункты 2019 г.; 3 — гравиметрические пункты 2016 г.; 4 — реперные линии; 5 — профили повторных гравиметрических наблюдений.

Fig. 9. Location of gravimetric points and reference lines: 1 — well; 2 — gravimetric points in 2019; 3 — gravimetric points in 2016; 4 — reference lines; 5 — profiles of repeated gravimetric observations.

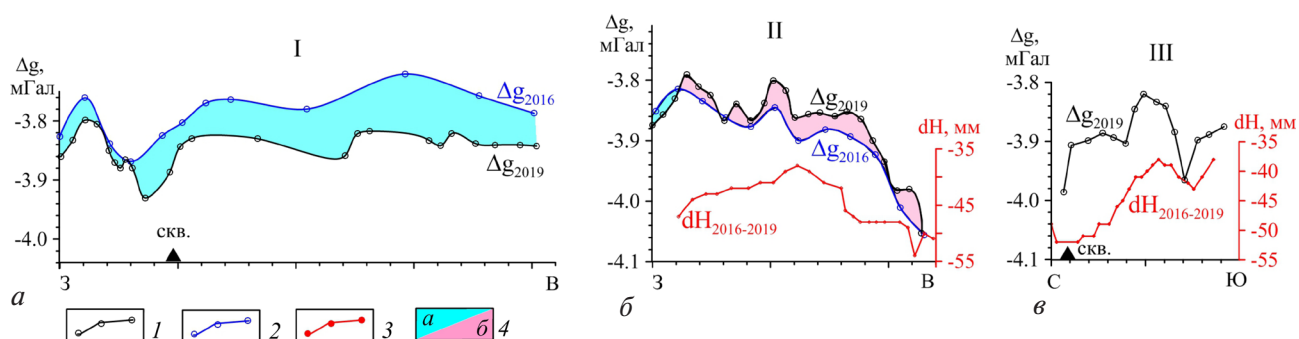


Рис. 10. Графики аномалий силы тяжести и оседаний земной поверхности по профилям I (а), II (б) и III (в): 1 — гравитационное поле, измеренное в 2019 г.; 2 — гравитационное поле, измеренное в 2016 г.; 3 — оседания земной поверхности за период 2016—2019 гг.; 4 — изменение гравитационного поля (а — уменьшение значений; б — увеличение значений). Местоположение профилей представлено на рис. 9.

Fig. 10. Graphs of gravity anomalies and subsidence of the earth's surface along profiles I (a), II (б), III (в): 1 — gravity field measured in 2019; 2 — gravity field measured in 2016; 3 — subsidence of the earth's surface for the period 2016—2019; 4 — change in the gravitational field (a — decrease in values; б — increase in values). The location of the profiles is shown in fig. 9.

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. Участки повышенных оседаний, сопровождаемые увеличением величины динамической аномалии, объясняются компенсацией значений аномалий уплотнением пород верхней части разреза, что свидетельствует о замедлении или прекращении процесса разуплотнения пород.

Выявление техногенных разуплотненных зон 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. Разработанная технология разделения разуплотненных зон на природные и техногенные позволит повысить безопасность эксплуатации Верхнекамского месторождения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29.12.2020 г. (рег. номер 122012000398-0).

Список литературы [References]

- Андреев О.П., Кобылкин Д.Н., Ахмедсафин С.К. и др. Гравиметрический контроль разработки газовых и газоконденсатных месторождений. Состояние, проблемы, перспективы. М.: ООО Издательский дом Недра, 2012. 374 с. [Andreev O.P., Kobylkin D.N., Akhmedsafin S.K. et al. Gravimetric control of development of gas and gas condensate fields. Status, problems, prospects. Moscow: ООО Publishing house Nedra, 2012. 374 p. (in Russian)].
- Балк П.И., Долгаль А.С. Аддитивные методы решения обратных задач гравиразведки и магниторазведки. М.: Научный мир, 2020. 455 с. [Balk P.I., Dolgal A.S. Additive methods for solving inverse problems of gravity and magnetic exploration. Moscow: Scientific world, 2020. 455 p. (in Russian)].
- Барях А.А., Санфиоров И.А., Дягилев Р.А. Мониторинг последствий затопления калийного рудника // Горный журнал. 2013. № 6. С. 34–39 [Baryakh A.A., Sanfirov I.A., Diaghilev R.A. Monitoring the consequences of flooding a potash mine // Mining Journal. 2013. № 6. P. 34–39 (in Russian)].
- Бычков С.Г., Долгаль А.С., Симапов А.А. Синтез качественных и количественных методов извлечения геологической информации из гравиметрических данных // Горный журнал. 2013. № 6. С. 26–29 [Bychkov S.G., Dolgal A.S., Simanov A.A. Synthesis of qualitative and quantitative methods for extracting geological information from gravimetric data // Mining Journal. 2013. № 6. P. 26–29 (in Russian)].
- Бычков С.Г., Мичурин А.В., Симапов А.А. Гравиметрический мониторинг рудников Верхнекамского месторождения калийных солей // Геофизика. 2017. №5. С. 10–16 [Bychkov S.G., Michurin A.V., Simanov A.A. Gravimetric monitoring of the mines of the Verkhnekamsk potash deposit // Geophysics. 2017. № 5. P. 10–16. (in Russian)].
- Бычков С.Г., Мичурин А.В., Симапов А.А. и др. Гравиметрические исследования состояния геосреды в районах интенсивного освоения недр // Горный журнал. 2019. № 12. С. 90–94 [Bychkov S.G., Michurin A.V., Simanov A.A. et al. Gravimetric studies of the state of the geo-environment in areas of intensive development of mineral resources // Mining Journal. 2019. № 12. P. 90–94 (in Russian)].
- 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 [Bychkov S.G., Prostopolupov G.V., Shcherbinina G.P. Identification of potentially hazardous areas at the Verkhnekamskoye potash deposit based on gravimetric observational data // Geophysics. 2021. № 5. P. 29–35 (in Russian)].
- Бычков С.Г., Симапов 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 [Bychkov S.G., Simanov A.A., Khokhlova V.V. Identification of natural and technogenic decompacted zones in an undermined massif according to high-precision gravimetric observations // Geophysics. 2020. № 5. P. 26–30 (in Russian)].
- Бычков С.Г., Симапов А.А., Хохлова В.В. Контроль динамики развития разуплотненных зон в подработанном массиве горных пород на основе повторных гравиметрических исследований // Геофизика. 2022. № 5. С. 13–19 [Bychkov S.G., Simanov A.A., Khokhlova V.V. Control of the dynamics of development of decompacted zones in an undermined rock mass based on repeated gravimetric studies // Geophysics. 2022. № 5. P. 13–19 (in Russian)].
- Бычков С.Г., Симапов А.А., Хохлова В.В. Программная реализация современных процедур обработки гравиметрических данных в рамках информационно-аналитической системы «ГРАВИС» // Геоинформатика. 2015. № 2. С. 24–32 [Bychkov S.G., Simanov A.A., Khokhlova V.V. Software implementation of modern procedures for processing gravimetric data within the framework of the information and analytical system «GRAVIS» // Geoinformatics. 2015. № 2. P. 24–32 (in Russian)].
- Долгаль А.С., Балк П.И., Демениев А.Г. и др. Использование метода конечных элементов при интерпретации данных гравиразведки и магниторазведки // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2012. № 1. Вып. 19. С. 108–127 [Dolgal A.S., Balk P.I., Demenev A.G. et al. The use of the finite element method in the interpretation of gravity and magnetic data // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2012. № 1(19). P. 108–127 (in Russian)].
- Дубовенко Ю.И., Черная О.А. Об особенностях 4D гравитационного мониторинга геологической среды // Геофизический журнал. 2011. № 3. Т. 33. С. 161–168 [Dubovenko Yu.I., Chernaya O.A. On the features of 4D gravity monitoring of the geological environment // Geophysical Journal. 2011. № 3. V. 33. P. 161–168. (in Russian)].
- Каленицкий А.И., Ким Э.Л. О комплексной интерпретации данных геодезическо-гравиметрического мониторинга техногенной геодинамики на месторождениях нефти и газа // Вестник СГГА. 2012. № 4(20). С. 3–13 [Kalenitsky A.I., Kim E.L. On the integrated interpretation of data from geodetic-gravimetric monitoring of technogenic geodynamics in oil and gas fields // Bulletin of the SSGA. 2012. № 4(20). P. 3–13 (in Russian)].
- Красноштейн А.Е., Барях А.А., Санфиоров И.А. Горно-технические аварии: затопление первого Березниковского калийного рудника // Вестник ПНЦ. 2009. № 2. С. 40–49 [Krasnoshtein A.E., Baryakh A.A., Sanfirov I.A.].

- Sanfirov I.A.* Mining accidents: flooding of the first Berezniki potash mine // Bulletin of the PNTs. 2009. № 2. P. 40–49 (in Russian)].
- Кудряшов А.И.* Верхнекамское месторождение солей. Пермь: ГИ УрО РАН, 2001. 429 с. [*Kudryashov A.I.* Verkhnekamsk salt deposit. Perm: GI UB RAS, 2001. 429 p. (in Russian)].
- Минерально-сырьевые ресурсы Пермского края: Энциклопедия / ред. А.И.Кудряшов. Пермь: Книжная площадь, 2006. 464 с. [Mineral resources of the Perm region: Encyclopedia / ed. A.I. Kudryashov. Perm: Book Square, 2006. 464 p.].
- Новоселицкий В.М., Бычков С.Г., Щербинина Г.П. и др.* Гравиметрические исследования изменений плотностной характеристики геологической среды под воздействием горных работ // Горный журнал. 2008, № 10. С. 37–41 [*Novoselitsky V.M., Bychkov S.G., Shcherbinina G.P. et al.* Gravimetric studies of changes in the density characteristics of the geological environment under the influence of mining // Mining Journal. 2008, № 10. P. 37–41 (in Russian)].
- Паровышный В.А., Веселов О.В., Сеначин В.Н.* Опыт изучения временных изменений геофизических полей над газовой залежью // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Пермь: ГИ УрО РАН, 2005. С. 216–219 [*Parovyshny V.A., Veselov O.V., Senachin V.N.* Experience in studying temporal changes in geophysical fields over a gas reservoir // Problems of theory and practice of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields. Perm: GI UB RAS. 2005. P. 216–219 (in Russian)].
- Петротектонические основы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / Ред. Н.М. Джиноридзе. СПб-Соликамск: ОГУП Соликамск типография, 2000. 400 с. [Petrotectonic fundamental for safe mining operation in the UPPER-KAMA deposit of potash-magnesium salts // ed. N.M. Ginoridze. SPb-Solikamsk: OGUP Solikamsk printi, 2000. 400 p. (in Russian)]
- Простолупов Г.В., Новоселицкий В.М., Конешов В.Н. и др.* Об интерпретации гравитационного и магнитного полей на основе трансформации горизонтальных градиентов в системе «VECTOR» // Физика Земли. 2006. № 6. С. 90–96 [*Prostolupov G.V., Novoselitsky V.M., Koneshov V.N. et al.* On the interpretation of gravitational and magnetic fields based on the transformation of horizontal gradients in the «VECTOR» system // Physics of the Earth. 2006. № 6. P. 90–96 (in Russian)].
- Пугин А.В., Мичурин А.В., Симанов А.А. и др.* Опытнометодические геофизические работы на территории историко-природного комплекса «Ледяная гора и Кунгурская ледяная пещера» // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2014. № 2. Вып. 24. С. 191–197 [*Pugin A.V., Michurin A.V., Simanov A.A. et al.* Experimental and methodological geophysical work on the territory of the historical and natural complex «Ice Mountain and Kungur Ice Cave» // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2012. № 2 (24) P. 191–197 (in Russian)].
- Багрий С.М., Кузьменко Е.Д., Анікеєв С.Г.* Оцінка ступеня просідання земної поверхні на шахтних полях Калуського гірничо-промислового району за даними високоточної гравіметрії // Научные труды SWorld. 2016. № 1(42). С. 40–48 [*Bagriy S.M., Kuzmenko E.D., Anikeev S.G.* Evaluation of the level of ground surface penetration in the mine fields of the Kaluska mining and industrial area for data on high-current gravimetry // Scientific Works of SWorld. 2016. № 1 (42). P. 40–48 (in Ukraine)].
- Biegiert E., Ferguson J., Li X.* 4D gravity monitoring - Introduction // Geophysics. 2008. V. 73. № 6. P. WA1–WA2. <https://doi.org/10.1190/1.3010377>
- Branston M. W., Styles P.* The application of time-lapse microgravity for the investigation and monitoring of mining subsidence // Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. 2003. № 36. P. 231–244. <https://doi.org/10.1144/1470-9236/03-243>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02640-8>
- Carbone D., Greco F.* Review of microgravity observations at Mt. Etna: A powerful tool to monitor and study active volcanoes // Pure and Applied Geophysics. 2007. V. 164. Is. 4. P. 769–790. <https://doi.org/10.1007/s00024-007-0194-7>
- Eppelbaum L.V., Ezersky M., Al-Zoubi A. et al.* Study of the factors affecting the karst volume assessment in the Dead Sea sinkhole problem using microgravity field analysis and 3-D modeling // Advances in GeoSciences. 2008. № 19. P. 97–115. <https://doi.org/10.5194/adgeo-19-97-2008>
- Gelderen M., Haagmans R., Bilker M.* Gravity changes and natural gas extraction in Groningen // Geophysical Prospecting. 1999. № 47(6). P. 979–993. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.1999.00159.x>
- Glegola M., Ditmar P., Vossepoel F. et al.* Gravimetric monitoring of the first field-wide steam injection in a fractured carbonate field in Oman — a feasibility study // Geophysical Prospecting. 2015. № 63(5). P. 1256–1271. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12150>
- Jacob T., Chery J., Bayer R. et al.* Time-lapse surface to depth gravity measurements on a karst system reveal the dominant role of the epikarst as a water storage entity // Geophysical Journal International. 2009. № 177(2). P. 347–360. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04118.x>
- Jentzsch G., Adelheid W., Carlos R. et al.* Gravity changes and internal processes: some results obtained from observations at three volcanoes // Pure and Applied Geophysics. 2004. V. 161. Iss. 7. P. 1415–1431. <https://doi.org/10.1007/s00024-004-2512-7>
- Reitz A., Krahenbuhl R., Li Y.* Feasibility of time-lapse gravity and gravity gradiometry monitoring for steamassisted gravity drainage reservoirs // Geophysics. 2015. № 80 (2). P. WA99–WA110. <https://doi.org/10.1190/geo2014-0217.1>
- Rybakov M., Goldshmidt V., Fleischer L. et al.* Cave detection and 4-D monitoring: a microgravity case history near the Dead Sea // The Leading Edge. 2001. V. 20. № 8. P. 896–900. <https://doi.org/10.1190/1.1487303>
- Styles P., Toon S., Thomas E. et al.* Microgravity as a tool for the detection, characterization and prediction of geohazard posed by abandoned mining cavities // First break. 2006. № 24. P. 51–60. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2006013>
- Tsiupiak A.I., Anikeev S.G., Hablovskiy B.B.* Gravitation monitoring substantiation by imitation modelling methods // Geoinformatics. 2019. Kiev. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902040>

**IDENTIFICATION OF NATURAL AND TECHNOGENIC DECOMPACTED ZONES
IN THE WORKED-OUT MASSIF BASED
ON HIGH-PRECISION GRAVIMETRIC OBSERVATIONS**

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

*Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia, 614007;
e-mail: bsg@mi-perm.ru*

Received March 01, 2022; revised May 16, 2023; accepted June 26, 2023

The paper presents the results of gravimetric studies at the potassium salt deposit in order to obtain information on the development of negative engineering-geological processes in the rock mass caused by subsoil development. A methodology was developed for high-precision monitoring gravimetric observations, which makes it possible to determine the change in the field over time. A physico-geological model of gravimetric monitoring, representing a homogeneous geological medium with an isolated area in which rock density changes have occurred, has been created. For the purposes of gravimetric monitoring, a method for processing and interpreting dynamic gravity anomalies based on the synthesis of qualitative and quantitative methods for extracting geological information from gravimetric data has been adapted. 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 process of decompaction. Examples are given of testing the developed technology for dividing decompressed zones into natural and man-made zones at the Verkhnekamskoye potash deposit in order to improve the safety of its operation. It is shown that the results of monitoring gravimetric observations can predict areas of dangerous geological processes and control subsidence of the earth's surface.

Keywords: gravimetry, monitoring, salts, sedimentation, safety.