

УДК 550.8

Г.В. Простолупов^{1,2}, Г.П. Щербинина¹

¹Горный институт Уральского отделения РАН, г. Пермь, Россия

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия

НАЗЕМНО–ПОДЗЕМНАЯ ГРАВИМЕТРИЯ НА ВЕРХНЕКАМСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

Возможности методов подземной гравиметрии в настоящее время незаслуженно забыты. Аварии на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей, катастрофическое затопление Первого и Третьего Березниковских рудников заставили по-новому относиться к проблеме геофизического обеспечения безопасной разработки месторождения. Для обнаружения разуплотнений в водозащитной толще над выработанным пространством рудников разработан метод наземно–подземной гравиметрии, приведены примеры его применения. Показано, что современные методы обработки и интерпретации наземно-подземных гравиметрических данных существенно повышают информативность геофизических исследований и позволяют успешно выявлять зоны повышенной опасности при обработке продуктивных пластов.

Ключевые слова: гравиметрия, геология, месторождение калийных солей, затопление, рудник, безопасность, подземные выработки.

Введение. Верхнекамское месторождение калийных солей (ВКМКС) является единственной сырьевой базой калийной промышленности России. Оно расположено в европейской части страны, с запада примыкает к Уральской складчатой системе. На рудниках месторождения шахтным способом ведется добыча сильвинитов – сырья для производства калийных удобрений, карналлита – для магниевой промышленности, каменной соли – для технической и пищевой [6]. Основная угроза для жизнедеятельности добывающих предприятий – вероятность их затопления. Защита от прорыва грунтовых вод обеспечивается мерами по сохранению целостности так называемой водозащитной толщи (ВЗТ), которая имеет мощность от 60 до 135 м. За последние три десятилетия произошли два катастрофических события: в 1986 г. – авария, повлекшая затопление Третьего Березниковского рудника; 2007 г. – катастрофическое обводнение с последующим обрушением пород на Первом Березниковском руднике. В связи с проблемой обеспечения безо-



Рис. 1. Провалы, сопутствующие катастрофическому затоплению: *а* – Третьего Березниковского рудника, 1986 г.; *б* – Первого Березниковского рудника, 2007 г.

пасной эксплуатации месторождения возникли задачи создания рационального геолого-геофизического комплекса и разработки современных методов для детального наблюдения за состоянием подрабатываемой толщи. Основная цель гравиметрии в этом случае – обнаружение разуплотненных, а значит, трещиноватых зон ВЗТ, – такие участки имеют ослабленные механические свойства и при подработке в экстремальных ситуациях разрушаются в первую очередь. Именно наличие подобных зон привело к проникновению вод в выработанное пространство и появлению провалов на двух Березниковских рудниках (рис. 1).

Наземно-подземная гравиметрия. Впервые подземные гравиметрические съемки были выполнены в середине 19 в. Г. Айри и позднее И. Хейфордом при определении плотности пород верхней части разреза. В СССР подземная гравиметрия бурно развивалась в 1950–1970 гг. В основном решались задачи эксплуатационной разведки по поиску слепых рудных тел, определения геоморфологии известных рудных тел, изучения структурных особенностей и тектоники эксплуатируемых участков месторождений. Созданием первых методик подземной гравиметрии, применяемых на рудниках Урала, Алтая и Кривбасса, в свое время занимались В.А. Казинский, А.А. Юньков, К.И. Соколовский, В.И. Андреев, Р.Н. Бурьян, А.Г. Тархов и многие другие исследователи [1, 2, 5]. Методы математической обработки гравиметрических полей, измеренных на нескольких гипсометрических подземных уровнях, восходят к работам М.Г. Сербуленко начала 1960-х годов, посвященных построению точных операторов разделения полей [10]. На совершенствование теоретической базы подземной гравиметрии значительное влияние ока-

зали исследования Г.Я. Голиздры, П.И. Лукавченко, Е.А. Мудрецовой, В.М. Новоселицкого, Е.Г. Булаха, В.Н. Стрехова.

История наземно-подземной съемки на ВКМКС началась с упомянутого выше катастрофического провала на Третьем Березниковском руднике. С того времени на рудниках начали активно изучать состояние водозащитной толщи методами сейсморазведки, электроразведки, геомеханики и гравиметрии. Перед В.М. Новоселицким, возглавлявшим лабораторию геопотенциальных полей Горного института УрО РАН, и группой исследователей встала проблема решения оригинальной задачи – интерпретации гравитационного поля, измеренного одновременно на поверхности земли и в шахте с целью локализации источников, находящихся между двумя уровнями наблюдений и связанных с ослабленными трещиноватыми породами. В результате был создан метод, названный наземно-подземной гравиметрией (НПГ), легший в основу излагаемых материалов.

Первые исследования на ВКМКС показали, что методы обработки и интерпретации гравитационного поля, измеренного на поверхности земли и в шахте, позволяют уверенно локализовывать неоднородности геологического строения ВЗТ месторождения. Однако разделение в пространстве таких плотностных неоднородностей – сложная проблема. Один из путей ее преодоления – совместный функциональный анализ наблюдений, проведенных на разных гипсометрических уровнях, и решение обратных задач в данной идеологии [8]. Другие подходы – решение этой задачи методом векторной гравиметрии [3, 9] и создание физико-геологических моделей, одновременно удовлетворяющих наблюдаемым полям: наземному и подземному [7].

Решение классической задачи поисков источников и их разделения по данным наблюдений поля на расположенных одна под другой выработках, когда плотностные неоднородности находятся достаточно близко (не далее первых десятков метров) и при этом могут располагаться выше, ниже, сбоку, между профилями или включать в себя профили наблюдений, подробно рассмотренное на примерах рудников Кривбаса, Абаканского железорудного месторождения и др. [1, 2, 5], в данном случае не подходит. Как и традиционные, методы обработки и интерпретации полевых материалов мало пригодны для выделения малоамплитудных аномалий от ослабленных зон ВЗТ. С учетом высокой чувствительности горизонтальных градиентов поля Δg к плотностным неоднородно-

стям в Горном институте УрО РАН была обоснована идея векторной обработки стандартных площадных гравиметрических съемок, как наземных, так и подземных, – технология VECTOR. Метод основан на высокой чувствительности горизонтальных градиентов поля к источникам аномалий. Трансформация поля на основе векторного сканирования с процедурой последующего интегрирования (восстановления) поля из градиентов позволяет осуществить разделение источников аномалий как в плане, так и по вертикали, с привязкой каждого источника к определенной эффективной глубине. Результаты обработки потенциальных полей представляются в виде двумерных (карт) и трехмерных (диаграмм-кубов) трансформант поля. Последние можно считать диаграммами объемного распределения аномальной квазиплотности геологической среды или моделью плотностного строения, адекватной наблюдаемому потенциальному полю [9].

Разработанная в 1990-е годы в Горном институте УрО РАН теория по созданию физико-геологических моделей, одновременно удовлетворяющих полям, измеренным на нескольких уровнях, также способствовала развитию наземно-подземной гравиметрии. Теория основана на принципе ограниченных контактов решения прямой задачи гравиметрии. Созданы программы двумерного и трехмерного моделирования разреза по наземно-подземным гравиметрическим съемкам [11].

Полевые наблюдения проводятся по совмещенным в плане профилям, проходящим на земной поверхности и в шахте (профильная съемка), или по находящимся на разных уровнях системам профилей (площадная съемка). В соответствии с решаемой задачей, шаг съемки на подземном профиле выбирается в 2–5 раз меньше, чем на наземном. В наблюдаемое на поверхности земли поле вводятся стандартный набор поправок, в подземное поле вводятся поправки: за высоту, промежуточный слой, нормальное поле, а также за выработки и наземный рельеф. На рудниках ВКМКС в зависимости от положения продуктивного слоя на тектонических структурах отработка ведется на глубинах от 250 до 400 м. Горные выработки носят площадной, если можно так выразиться, “ковровый” характер и хорошо подходят именно для площадной съемки. Сами выработки весьма удобны для работы оператора, имеют правильную цилиндрическую форму и расположены одна над другой (до 3 этажей). Вертикальное расстояние между ними незначительно (3–8 м) по сравнению с расстоянием (60 до 200 м) до предпола-

гаемых и представляющих интерес с точки зрения решения горных задач источников аномалий.

На начальном этапе наземно-подземная гравиметрия выполнялась в профильном варианте. Как показал дальнейший опыт, площадные съемки значительно эффективнее и предоставляют большую возможность по использованию арсенала методов обработки.

Пример интерпретации. Рассмотрим фрагмент интерпретации наземно-подземной гравиметрии на Четвертом Березниковском руднике, где выполнена площадная съемка в масштабе 1 : 10 000 на поверхности земли (4 км²) и в горных выработках на семи профилях (1 км²) (рис. 2).

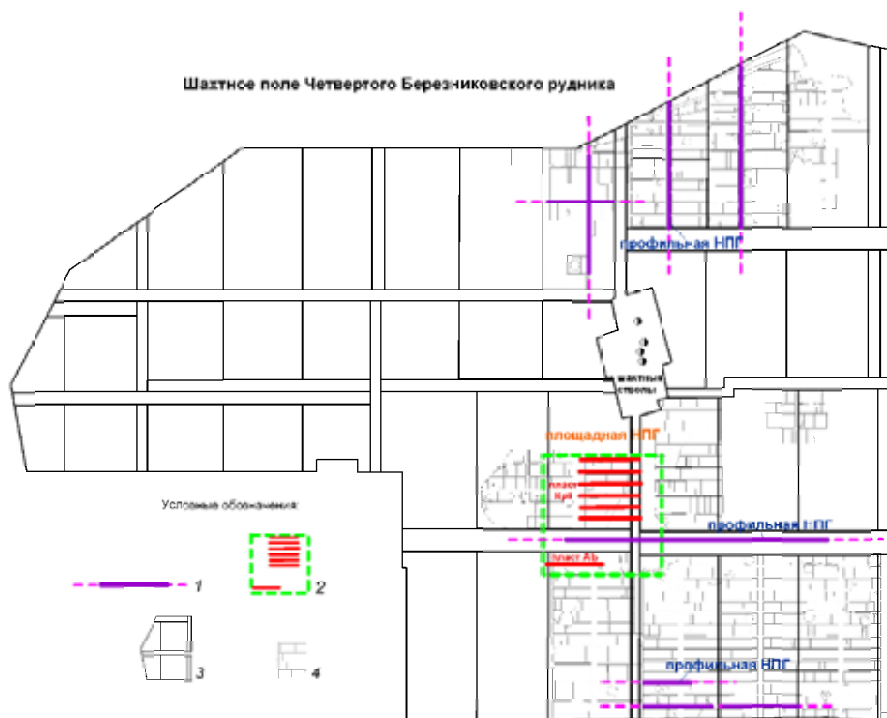


Рис. 2. Схема расположения наземно-подземных гравиметрических работ на шахтном поле Четвертого Березниковского рудника: 1 — наземный (розовый) и подземный (фиолетовый) профили; 2 — контур наземной площадной съемки (зеленый) и подземные профили (красные); 3 — панели плановой отработки и граница шахтного поля; 4 — выработанное пространство

Геологический разрез участка включает следующие толщи сверху вниз. Терригенно-карбонатная толща – породы относительно жесткие, их плотность, согласно определениям по керну в шахтных стволах и скважинах, составляет 2,40–2,49 г/см³. Этот комплекс распространен от земной поверхности до глубины около 150 м. Ниже залегает глинисто-мергелистая толща мощностью 90 м, средняя плотность 2,3 г/см³, под ней – переходная толща – переслаивание галита и глины мощностью 40 м, и покровная каменная соль – 20-метровый слой, залегающий над продуктивной толщей. Плотность комплекса 2,15 г/см³. Продуктивная толща, в которой непосредственно ведется добыча полезного ископаемого, имеет по площади значительную изменчивость литологии: в некоторых скважинах не встречены карналлиты, в одной скважине, пробуренной на этом участке, все калийные пласты замещены на натриевую соль. Добыча ведется по пластам: КрII – красный сильвинит, АБ – полосчатый сильвинит, В – карналлит. Плотность продуктивного комплекса 2,10 г/см³, мощность – около 70 м. Ниже залегает плотностной комплекс, состоящий из подстилающей каменной соли со средней плотностью 2,13 г/см³. Он имеет изменчивую мощность около 400 м. Подошва этого комплекса залегает на глубине 700 м. Основной объект гравиметрического изучения – водозащитная толща, состоящая из переходной толщи, покровной каменной соли и верхней части продуктивной толщи (“п + п + п”).

Плотностное строение исследуемого породного массива сформировалось под влиянием двух факторов: естественного геологического и техногенных воздействий при добыче калийной руды. Участок находится в очень сложных структурно-тектонических условиях. В палеозойской карбонатной толще на глубинах 2400–2900 м возможно наличие франско-турнейских рифогенных построек, насыщенных нефтью. На отдельных участках горных выработок соль имеет нефтяной привкус. Это достоверно свидетельствует, во-первых, о наличии в подсоляных толщах залежей углеводородов, во-вторых, о проницаемости соляной толщи. Переинтерпретация и обработка данных, менее детальной, но захватывающей большую площадь гравиметрической съемки масштаба 1 : 50 000 в системе VECTOR на этой территории, подтвердили наличие нефтеперспективных рифогенных тел под соляной толщей. Наличие этих тел ведет к усложнению соляной тектоники. Сочетание структур облекания над рифами и областей с уплотняющимися межрифовыми осадками вызывает в соляной и надсоляной толщах вторичные изменения:



Рис.3. Пример складчатости слоев сильвинита (стенка горной выработки)

выдавливание соли в межкупольные пространства, растворение, разрушение пород надсоляной толщи над массивом, повышенное трещинообразование в надсоляной толще при ее деформировании.

Таким образом, можно предполагать следующие причины изменчивости плотности продуктивного слоя: в результате образование складок пластических деформаций, что сопровождается перекристаллизацией каменной соли; формирование трещиноватости при хрупких тектонических деформациях и т. п. Нужно отметить, что продуктивная толща на данном участке находится в условиях горизонтального сжатия. На это указывают многие факты: на фотоснимках стенок штреков видны структуры сжатия, в керне скважин зафиксированы углы слоистости до 90° , горизонтальные срывы (рис. 3).

Подземные гравиметрические наблюдения проводились по пластам КрII и АБ. Уровень наблюдений – нижняя часть продуктивной толщи. На площади съемки (см. рис. 2) расположен опытный участок, на кото-

ром отрабатывались параметры одностадийной трехпластовой (Кр II, АБ, В) выемки калийных солей, суть – трехэтажной. Приблизительные параметры отработки: высота камер для пласта Кр II 5,8 м, для пластов АБ и В – 3,1 м, ширина междукамерных целиков 7,1 м. Проводилась сухая закладка отработанных камер. При выполнении горных работ на опытном участке имели место негативные явления, осложнения, что и вызвало постановку детальных гравиметрических исследований.

Разуплотненные области геологического пространства отражаются на 3D-диаграммах программы VECTOR сложной системой соединяющихся между собой отрицательных аномалий. Детальное рассмотрение сечений 3D-диаграмм показало, что над выработанным пространством в надсоляной толще (эффективные глубины 70–240 м) образуются вертикальные разуплотнения, сквозные через толщи “п + п + п” и глинисто-мергелистую – например аномалия А (рис. 4, а). Такая вертикальная форма разуплотнений, а не со смещением в разных слоях, свидетельствует о влиянии на их формирование подработки. Проведенное сопоставление карт оседаний земной поверхности с трансформантами поля позволяет сделать вывод, что величина и темп оседаний земной поверхности над различными участками отработанного пространства на данной территории зависит от плотностного строения подработанного массива, которое отражается в положительных и отрицательных аномалиях гравитационного поля.

На рассматриваемом участке выделяются две системы отрицательных аномальных зон. Первая из них – северная, начинается в подошве терригенно-карбонатной толщи аномалией А, продолжается вниз в переходной, покровной и продуктивной толщах, переходящий в аномалию Б (рис. 4, б) и ниже – в подстилающую соль. Эти разуплотнения характерны для области подработки и представляют потенциальную опасность для существования рудника. Вторая система разуплотнений – южная, от земной поверхности уходящий вглубь в южном направлении за пределы площади исследований. Эта система отличается тем, что не имеет глубоких источников в подстилающей соли, ее аномальная плотность незначительна.

Наблюденное на уровне горных выработок поле – результат суперпозиции полей от нижезалегающей и вышезалегающей толщ. Поэтому при “наземно-подземной” интерпретации прежде берутся в расчет аномалии, обнаруженные одновременно на двух уровнях съемки. Рассмотр-

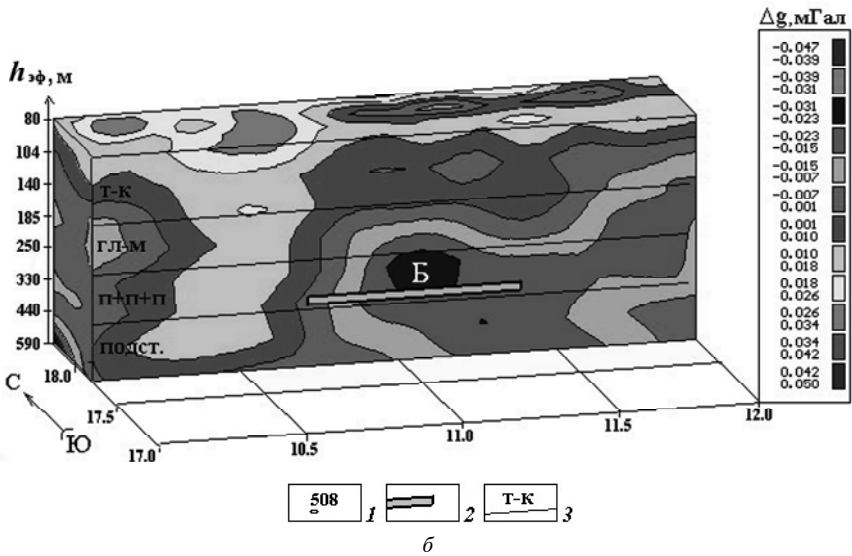
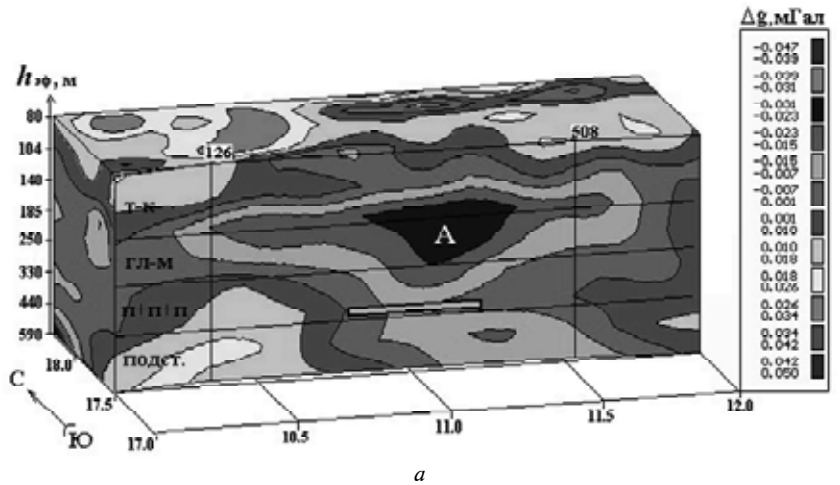
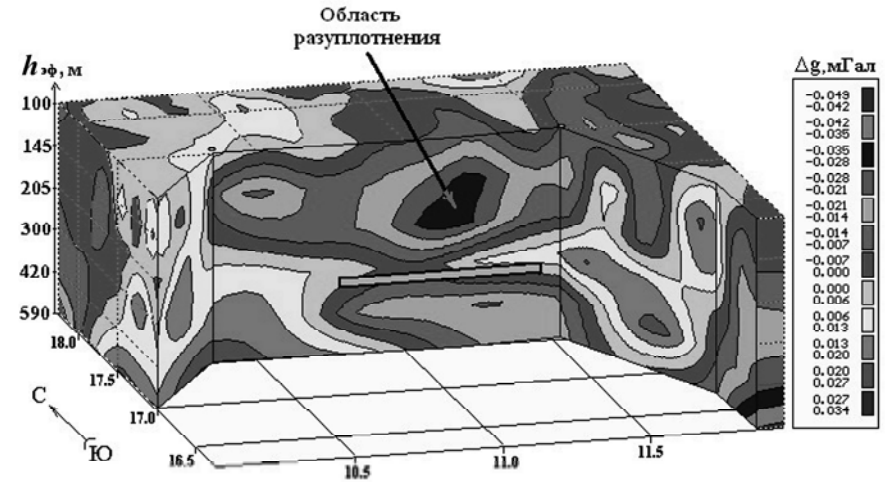


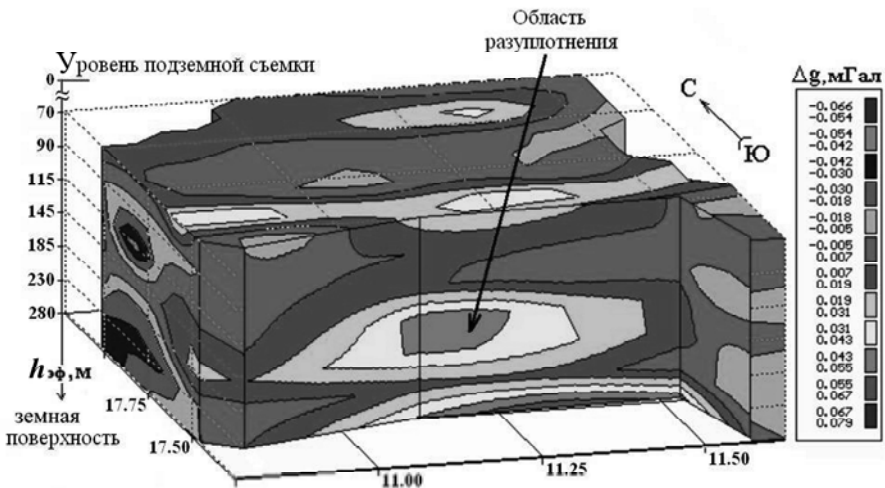
Рис. 4. Сечения 3D-диаграммы гравитационного поля через характерные опасные для отработки аномалии А(а) и Б(б): 1 – скважина и ее номер; 2 – горные выработки; 3 – литолого-стратиграфические слои (т-к – терригенно-карбонатная толща, гл-м – глинисто-мергелистая толща, п + п + п – толща, включающая переходную пачку, покровную каменную соль и продуктивную толщу, подст. – подстилающая каменная соль)

рение карт, полученных в результате обработки подземных гравиметрических данных, не ведет к однозначной трактовке местоположения аномалий относительно уровня наблюдений (выработок), так как на подземное поле в равной степени влияют как ниже-, так и вышезалегающие объекты. В геологическом разрезе ВКМКС задача разделения поля несколько облегчается за счет того, что ниже уровня подземных наблюдений находится литологически однородная среда, представляющая собой мономинеральную породу, на 90–98 % сложенную галитом, с незначительными примесями ангидритов, глин и карбонатов. Таким образом, в предположении, что ниже уровня шахтных наблюдений в подстилающей каменной соли строение значительно более однородное, чем в толще выше уровня наблюдений, можно принять, что большинство источников аномалий, фиксируемых на подземном уровне съемки обусловлено более тонким и сложным строением продуктивной, покровной и переходной толщ.

На картах поля Δg в редукции Буге, измеренного на земной поверхности и в шахте, заметно совпадение наземной отрицательной аномалии и обширной положительной аномалии подземного поля. Соответствие наземных и подземных аномалий с противоположными знаками указывает на общий источник этих аномалий, расположенный между двумя уровнями наблюдений. Для локализации источника данной аномалии в пространстве проведено послойное векторное сканирование наземного и подземного полей с шагом около 40 м. В результате построена серия трансформант, характеризующих гравитационный эффект от толщи пород между двумя уровнями наблюдений. Из попарного сопоставления трансформант с указанной эффективной толщиной слоев, построенных от уровня поверхности земли вниз и подземного уровня вверх, обнаружено, что гравитационный эффект, характеризующий эту аномалию, наблюдается на эффективных глубинах от 150 до 215 м, а центр источника аномалии находится на глубине около 170 м от земной поверхности. На этих глубинах аномалия с наземного и подземного уровней наблюдений локализуется наилучшим образом, что проиллюстрировано на вертикальных разрезах трехмерной диаграммы наземного поля через исследуемую аномалию (рис. 5, а) и на вертикальном разрезе в той же плоскости трехмерной диаграммы подземного поля (рис. 5, б). Эпицентр аномалии попадает на глинисто-мергелистую толщу.



a



b

Рис. 5. Вертикальный разрез трехмерной диаграммы гравитационного поля через разуплотненную область в верхней части ВЗТ: а – разрез диаграммы наземного поля; б – разрез диаграммы подземного поля

При трансформации поля подземной площадной съемки (см. рис. 2) на инвертированных в верхнее полупространство разностных картах (глубины ВЗТ) зафиксировано сублинейное разуплотнение широтного простираения, связанное с деформированием толщ у северного окончания зоны замещения (калийной соли на натриевую) при реализации движения соляных масс со стороны Урала. Зона замещения в данном случае выступает как жесткое неподвижное тело, препятствующее перемещению на запад соляных масс. Выявленное разуплотнение, расположенное выше горных выработок и имеющее сдвиговую природу, удалось зафиксировать исключительно в площадном варианте подземной съемки. В гравитационном поле на наземном уровне данная аномалия вследствие небольшой аномальной массы не улавливается. Это еще раз подтверждает обоснованность применения подземной съемки [4, 12].

Выводы. Анализ материалов гравиметрической съемки с использованием процедуры векторного сканирования и с учетом данных о геологическом строении позволил выделить ослабленные трещиноватые зоны водозащитной толщи рудника, т. е. участки повышенной опасности при отработке продуктивных пластов. Выявлено также, что породы верхней части соляной и нижней части надсоляной толщ в рассматриваемом районе находятся в условиях сложного горизонтального сжатия, что отражается на трансформантах гравитационного поля. Установлена и обоснована связь разуплотнений, выявленных гравиметрией на глубинах продуктивной и водозащитной толщ, с оседаниями на земной поверхности.

Пример проведенной наземно-подземной гравиметрии, на наш взгляд, свидетельствует об высокой эффективности использования гравиметрических наблюдений при изучении геологического строения Верхнекамского месторождения калийных солей. Изменения плотности в породном массиве, происходящие под влиянием горных работ, отчетливо фиксируются в гравитационном поле.

Наземно-подземная гравиметрическая съемка выполнена почти на всех рудниках месторождения, однако площадь съемок непосредственно в шахтах несопоставима с площадью участков выработанного пространства и составляет от последней не более 5 %. В целом это указывает на недостаточное использование мощного средства изучения геологического строения месторождения и на еще не раскрытый потенциал данного метода в обеспечении безаварийной работы рудников.

1. *Андреев В.И.* Интерпретация материалов подземных гравитационных и магнитных наблюдений / В.И. Андреев, К.И. Соколовский. – Киев: Наук. думка, 1971. – 155 с.
2. *Бурьян Н.Р.* Подземная гравиразведка / Н.Р. Бурьян, А.А. Юньков, Н.М. Анищенко и др. – Л.: Недра, 1979. – 159 с.
3. *Бычков С.Г.* Информационная технология содержательной интерпретации геопотенциальных полей/ С.Г. Бычков., В.М. Новоселицкий, Г.В. Простолупов, Г.П. Щербинина // Геоинформатика. – 2004. – № 3.– С. 52–57.
4. *Бычков С.Г.* Гравиметрический мониторинг территории разработки Верхнекамского месторождения калийных солей / С.Г. Бычков, Г.В. Простолупов, Г.П. Щербинина // Горн. журн. – 2013. – № 6. – С. 22–25.
5. *Казинский В.А.* Вопросы гравиметрии и методы ее применения в горном деле. – М.: Наука, 1969. – 204 с.
6. *Кудряшов А.И.* Верхнекамское месторождение солей. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2001. – 429 с.
7. *Новоселицкий В.М.* К обоснованию наземно-подземной гравиметрии / В.М. Новоселицкий, А.С. Маргулис // Докл. АН УССР. – 1991. – Т. 8. – С. 115–118.
8. *Новоселицкий В.М., Пенская М.Я.* О разделении полей в наземно-подземной гравиметрии. Материалы VI Междунар. семинара “Горная геофизика”. – Пермь, 1993. – С. 47–48.
9. *Простолупов Г.В.* Об интерпретации гравитационного и магнитного полей на основе трансформации горизонтальных градиентов в системе “VECTOR” / Г.В. Простолупов, В.М. Новоселицкий, В.Н. Конешов, Г.П. Щербинина // Физика Земли.– 2006. – № 6. – С. 90–96.
10. *Сербуленко М.Г.* К вопросу о локализации особенностей потенциальных полей по наблюдаемым аномалиям и точности аналитических продолжений в нижнее полупространство / М.Г. Сербуленко, О.А. Соловьев // Геология и геофизика. – 1963. – № 7. – С. 112–116.
11. *Тарантин М.С., Простолупов Г.В.* Реализация решения прямой задачи гравиразведки в рамках принципа контактных поверхностей // Материалы конференции “Четвертые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича”. – Екатеринбург: Ин-т геофизики УрО РАН, 2007. – С. 90–92.
12. *Щербинина Г.П.* Гравиметрические исследования при решении горно-геологических задач на Верхнекамском месторождении калийных солей / Г.П. Щербинина, Г.В. Простолупов, С.Г. Бычков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. СО РАН. – 2011. – № 5. С. 29–36.

Наземно-підземна гравіметрія на Верхньокамському родовищі калійних солей Г.В. Простолупов, Г.П. Щербініна

Можливості методів підземної гравіметрії на цей час незаслужено забуті. Аварії на рудниках Верхньокамського родовища калійних солей, катастрофічне затоплення Першого і Третього Березняківських рудників змусили по-новому розглянути проблему геофізичного забезпечення безпечної розробки родовища. Для виявлення розуцільнення у водозахисній товщі над виробленим простором рудників розроблено метод наземно-підземної гравіметрії, наведено приклади його застосування. Показано, що сучасні методи обробки та інтерпретації наземно-

підземних гравіметричних даних істотно підвищують інформативність геофізичних досліджень і дають змогу успішно виявляти зони підвищеної небезпеки під час розробки продуктивних пластів.

Ключові слова: гравіметрія, геологія, родовище калійних солей, затоплення, рудник, безпека, підземні виробки.

The ground-underground gravimetric surveys at Verkhnekamskoe potassium deposit G.V. Prostolupov, G.P. Shcherbinina

The capabilities of the methods of underground gravimetry and new direction – the ground-underground gravimetry undeservedly forgotten in the present time. A number of failures on a mines of the Verkhnekamsky potassium deposit, which include the flooding of the first and the third mines, led to a fresh look at the problem of geophysical safety of a Deposit development. The method of ground-underground gravimetry for the detection of weak points of the protective layer over the mines are developed, examples of its application are presented. It is shown that the modern methods of processing and interpretation of ground-underground gravity data significantly increase the information value of geophysical research and allow to successfully identify zones of increased danger of the development of productive layers.

Keywords: gravimetry, geology, deposit of potash salts, flooding, mine, safety, underground mine.