

УДК 550.831 + 552.08

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПОДРАБОТАННОГО МАССИВА
НА ТРАНСФОРМАНТЫ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ**

Г. П. Щербинина, Г. В. Простолупов

*Горный институт УрО РАН, E-mail: gena-prost@yandex.ru,
ул. Сибирская, 78А, 614007, г. Пермь, Россия*

Представлены результаты интерпретации материалов высокоточной гравиметрической съемки, проведенной на одном из участков Верхнекамского месторождения калийных солей. Исследования направлены на выявление разуплотненных участков техногенного генезиса в подработанном массиве. Установлено, что на трансформантах гравитационного поля техногенные разуплотнения обнаруживаются в виде плоских наклонных отрицательных аномалий, пересекающих подработанную толщу сверху вниз. Определено пространственное положение техногенных разуплотнений в горном массиве.

Месторождение калийных солей, гравиметрия, мониторинг, напряженное состояние, деформации подработанного массива

DOI: 10.15372/FTPRPI20220104

Физические явления, происходящие в подработанном горными выработками массиве, обусловлены техногенными напряжениями за счет действия веса пород в поле силы тяжести Земли. Это приводит к деформированию подработанной толщи, которое сопровождается изменением физических и механических свойств пород.

Характер деформирования породного массива определяется сочетанием многих факторов: механическими и реологическими свойствами пород, степенью структурной неоднородности массива, глубиной расположения горных выработок (мощностью подработанной толщи), размером площади подработки, уровнем тектонических напряжений и др. Изучение форм проявления техногенных деформаций в различных условиях ведения горных работ — весьма трудная задача.

В практике горного производства методами исследования деформаций подработанных толщ чаще выступают инструментальные измерения оседаний земной поверхности, в том числе метод космических радарных съемок, измерения в горных выработках, модельные расчеты, основанные на теории прочности пород и пр. [1–3]. На Верхнекамском месторождении наблюдения внутри шахтных выработок выявлено два вида нарушений сплошности пород — это трещины отслоения в сводах и на стенках горных выработок и секущие трещины, перпендикулярные слоистости [4, 5].

Методы исследований, направленные на выявление деформаций внутри подработанной толщи, практически отсутствуют. Однако их изменения в массиве горных пород могут быть зафиксированы геофизическими методами, определяющими неоднородности строения дистанционно.

На Верхнекамском месторождении пространственная локализация участков изменения физических свойств пород в толще подработанного массива осуществлена с помощью интерпретации результатов гравиметрических наблюдений. Детальные гравиметрические работы позволили конкретизировать форму и место проявления техногенных деформаций.

ХАРАКТЕРИСТИКА УЧАСТКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Объект исследований — подработанная толща пород на одном из участков четвертого Березниковского рудника. Участок имеет размеры 1.5×2.7 км. В 2008 и 2013 гг. здесь проводились детальные гравиметрические съемки, гравитационные поля которых приведены на рис. 1а и б. Мощность подработанного массива от кровли горных выработок до земной поверхности составляет 250–350 м. Массив состоит из трех слоев разного литологического состава с различными физическими и механическими свойствами. Плотность и жесткость пород подработанной толщи изменяются в соответствии с литологическим строением [6].

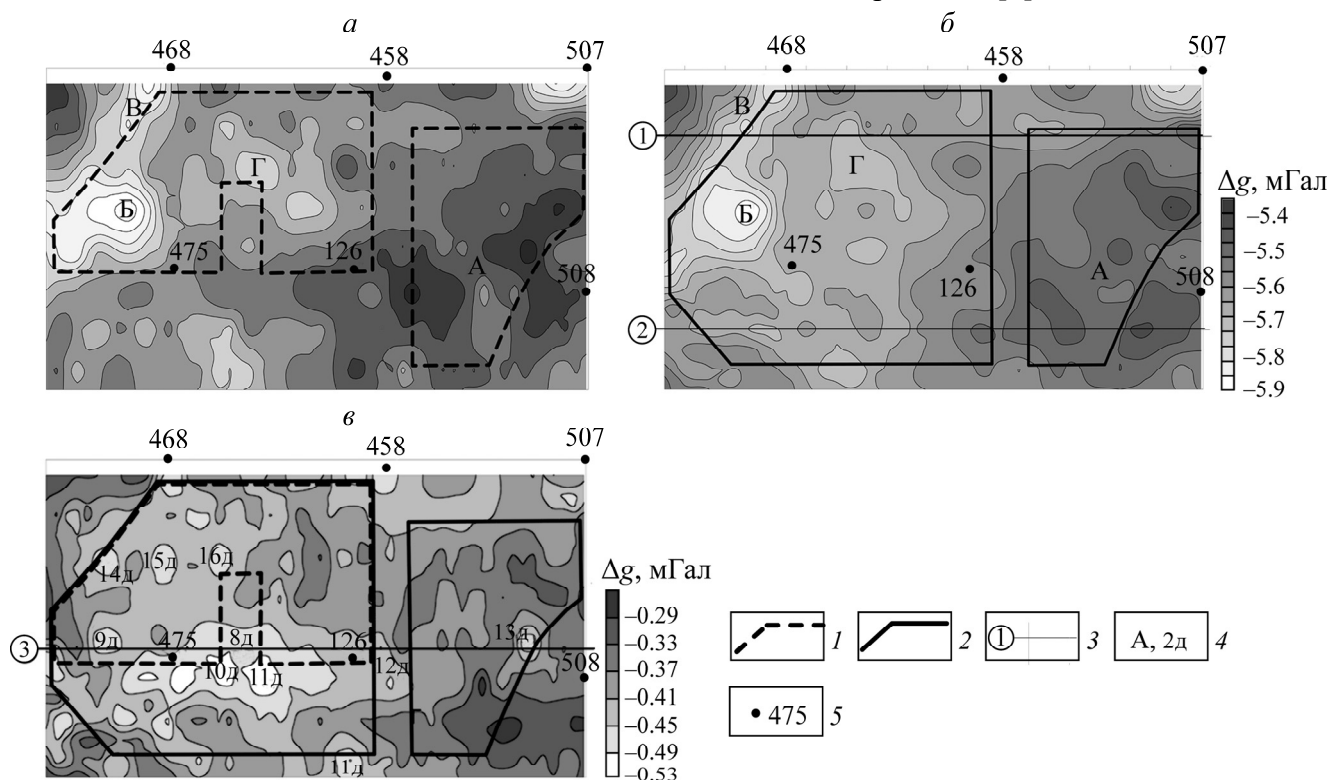


Рис. 1. Поле силы тяжести в редукции Буге, измеренное в 2008 г. (а), 2013 г. (б) и динамическое поле (в): 1 — границы отработки продуктивных пластов в 2008 г.; 2 — границы отработки продуктивных пластов в 2013 г.; 3 — линии вертикальных сечений трехмерных трансформант; 4 — аномалии поля силы тяжести, аномалии динамического поля; 5 — номер скважины

Нижний слой подработанного массива мощностью 80–90 м представляет собой часть продуктивной толщи, залегающей непосредственно над горными выработками, состоит из переслаивания соляных пород — каменной соли, карналлитов, сильвинитов, в верхней части присутствуют прослои глинисто-мергелистых пород незначительной мощности. Средняя плотность слоя изменяется в пределах $2.07–2.19$ г/см³. Породы характеризуются высокой пластичностью.

Средний слой, залегающий выше, является нижней частью надсоляного комплекса, сложен глинисто-мергелистыми породами с прослоями глин и гипса. Это глинисто-мергелистая толща (ГМТ), ее мощность 90–110 м, средняя плотность 2.28–2.32 г/см³.

Верхний слой, выходящий на земную поверхность, мощностью 80–140 м наиболее жесткий и прочный относительно двух нижних слоев, сложен известняками и песчаниками с прослоями мергеля — терригенно-карбонатная толща (ТКТ). Плотность верхнего слоя 2.44–2.53 г/см³.

Породы надсоляного разреза, по данным описания керна скважин, характеризуются различной степенью выветрелости и неравномерной трещиноватостью.

На изучаемой территории горные работы велись на двух участках (рис. 1). На западном участке отработано два калийных пласта Кр-II и АБ. Ко времени первого этапа гравиметрической съемки в 2008 г. подработанная площадь западного участка составляла 0.7×1.6 км (на рис. 1а граница обозначена штриховой линией). К 2013 г. подработанная территория западного участка увеличилась до размеров 1.4×1.6 км (на рис. 1б показана сплошной линией). Закладка выработок не проводилась.

На восточном участке полезное ископаемое добывалось из трех пластов КрII, АБ и В. Размеры участка 0.8×1.1 км. Горные работы на восточном участке осуществлялись задолго до гравиметрических исследований в 1990–2000 гг. Выполнена закладка горных выработок. В период проведения гравиметрических наблюдений восточный участок находился в стабильном горнотехническом состоянии.

В тектоническом отношении изучаемая территория расположена в северной апикальной части Дурыманского прогиба, сформированного в кровле соляной толщи. В пределах изучаемой площади наблюдается погружение соляной поверхности на юг, юго-восток под углом 1.2–2.0°.

Для горных работ применялась комбайновая выемка полезного ископаемого, блочная система отработки. Ширина очистного фронта между подготовительными выработками 200 м. Ориентировка подготовительных выработок и, соответственно, выемочных блоков широтная.

ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗМЕРЕННЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ

Массив горных пород представляет собой среду с плотностными неоднородностями разного генезиса. Аномалии Δg Буге на данной территории (рис. 1а, б) являются суперпозицией четырех составляющих. Анализ ситуации показывает, что вклад в морфологию поля в виде обширных аномалий вносят неоднородности геологического строения (первая составляющая) [7]. Например, обширная положительная аномалия А на юго-востоке амплитудой 0.1–0.2 мГал обусловлена, согласно модельным расчетам, изменением литологии калийных пластов в продуктивной толще и понижением в этом месте кровли соляной поверхности. Оба эти фактора увеличивают значение силы тяжести.

Вторая составляющая гравитационного поля — наличие плотностных неоднородностей естественного происхождения, сформировавшихся в надсоляной толще за счет преобразования пород в зоне гипергенеза, где породы неравномерно подвергались выветриванию. На карте поля силы тяжести участки выветрелых пород проявляются в виде отрицательных аномалий Б и В. Описание керна скважин подтверждает наличие в верхней части разреза пород, сильно измененных под действием выветривания.

Третья составляющая — плотностные неоднородности техногенной природы. Они обусловлены изменением физических свойств пород при деформировании подработанного массива в результате проведения горных работ. Эти гравитационные эффекты в морфологии поля силы тяжести (рис. 1а, б) визуальны не видны. Причина — весьма небольшие амплитуды ано-

малей, которые в рисунке изоаномал не проявляются. Увидеть техногенные плотностные неоднородности можно только на трансформантах гравитационного поля (рис. 2, 3) благодаря тому, что они формируют регулярную картину аномалий, привязанных к территории отработки.

Четвертая составляющая поля силы тяжести на изучаемой площади — гравитационный эффект от пустот горных выработок. В картинах полей Δg Буге 2008 и 2013 гг. на западном участке данный эффект наблюдается в виде обширных отрицательных аномалий Г. Этот вывод основан на решении прямой задачи гравиметрии. Гравитационное влияние пустотного пространства представляет плавное уменьшение поля к центральной части подработанной площади на 0.10–0.12 мГал. Поправка за влияния пустотного пространства была введена в измеряемые поля, подготовленные для построения трансформант.

АНАЛИЗ ТРАНСФОРМАНТ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ

Как уже указывалось, цель исследований — выявление плотностных неоднородностей техногенного генезиса внутри подработанного горного массива. Детальная интерпретация результатов наземных гравиметрических съемок масштаба 1:10 000 основана на анализе трансформант поля, построенных по методике VECTOR [8]. Метод векторного сканирования относится к фильтрационному подходу “гравитационная томография”. Осуществляется послойное изучение пространственного распределения геоплотностных неоднородностей. Решение обратной задачи проводится путем разделения интерпретируемого гравитационного поля при участии векторных вычислительных процедур на составляющие, предположительно обусловленные влиянием разноточинных слоев горных пород [9].

На трансформантах гравитационного поля, измеренного с высокой точностью, обнаруживается тонкая структура плотностного строения подработанных толщ. Это позволяет выявить особенности распределения участков с измененными за счет подработки плотностными свойствами, уловить их связь с параметрами выработанного пространства.

Один из видов трансформант — разностные трансформанты. Они представляют собой гравитационный эффект от квазигоризонтального слоя на заданной глубине. В поле разностной трансформанты отражается плотностное строение слоя. Примером является поле разностной трансформанты приповерхностного слоя от 0 м до эффективной глубины 120 м (рис. 2а), на котором в прямоугольной форме аномалий просматривается блочная система отработки и ширина очистного фронта.

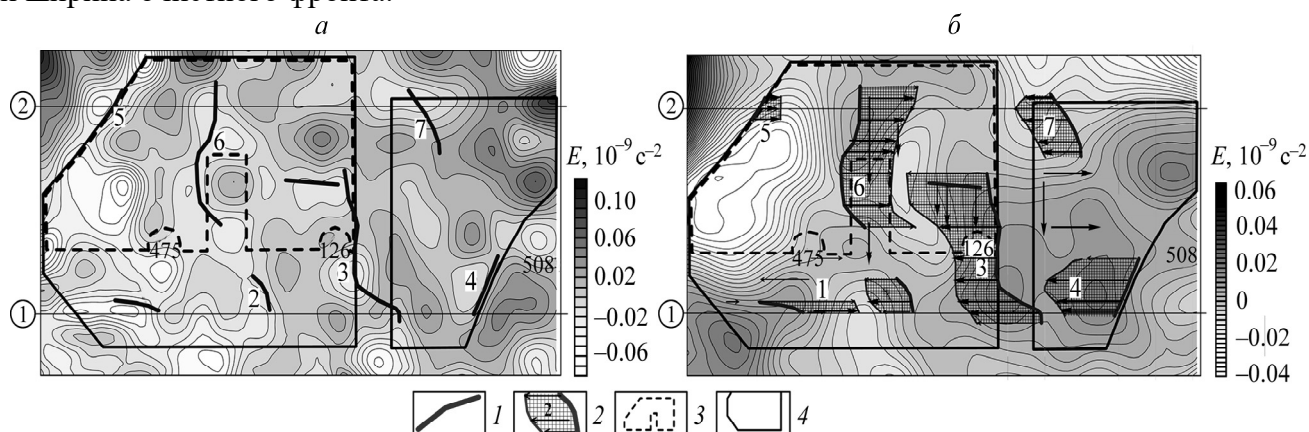


Рис. 2. Техногенные разуплотнения на фоне гравитационных эффектов, рассчитанных для слоя с $h_{\text{эфф}} = 0 - 120$ м (а) и для глубин залегания продуктивной толщи (б): 1 — выход плоскостей деформации на земную поверхность; 2 — проекции техногенных разуплотнений с вертикальных сечений на горизонтальную плоскость, их номер; 3 — границы отработки продуктивных пластов в 2008 г.; 4 — границы отработки продуктивных пластов в 2013 г. (здесь и на рис. 3, 4 E — этвеш, единица измерения градиента ускорения свободного падения)

Разностная трансформанта, характеризующая плотностное строение части геологического разреза, близкого к глубине расположения горных выработок, приведена на рис. 2б. Здесь наблюдаются крупные аномалии, отображающие в основном природное плотностное строение массива и в некоторой степени техногенные рассеянные изменения.

Объединенная серия разностных трансформант, распределенных по глубине, представляет собой трехмерную трансформанту гравитационного поля, которую можно считать кубом квазиплотности [10]. Вертикальные сечения куба квазиплотности характеризуют плотностное строение (аномальную плотность) породного массива в разрезе. На рис. 3 приведены сечения куба по линиям 1 и 2, положение которых показано на рис. 1, 2.

При визуальном анализе вертикальных сечений трехмерных трансформант установлены некоторые специфические черты плотностного строения подработанной толщи. Особенностью является наличие наклонных отрицательных аномалий, которые формируют характерный расходящийся вверх рисунок, сближаясь на уровне горных выработок в центре подработанной территории. Они распространяются снизу вверх, пересекая всю подработанную толщу, и указывают на наличие наклонных разуплотнений в подработанном массиве.

На разрезе (нижний рис. 3а), в отличие от логарифмического масштаба трансформанты, оси наклонных разуплотнений соответствующих аномалий показаны с соотношением горизонтального и вертикального масштабов 1:1. На разрезе углы наклона осей разуплотненных зон вблизи земной поверхности составляют 50–90°, уменьшаясь на глубинах выработанного пространства до 40–60°.

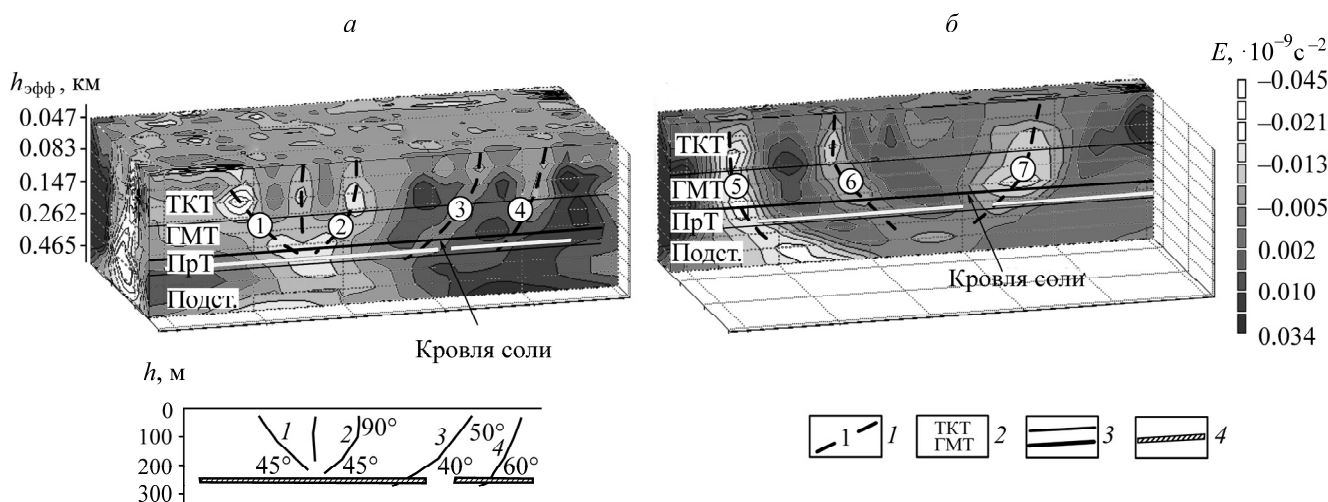


Рис. 3. Вертикальные сечения трехмерной трансформанты гравитационного поля 2013 г.: а — по линии 1; б — по линии 2; 1 — оси отрицательных аномалий техногенных разуплотнений; 2 — литологические толщи: ТКТ — терригенно-карбонатная толща, ГМТ — глинисто-мергелистая толща, ПрТ — продуктивная толща, Подст. — подстилающая каменная соль; 3 — границы литологических толщ, привязанные к эффективным глубинам трансформанты; 4 — положение горных выработок

Распространение наклонных отрицательных аномалий по площади прослежено по серии вертикальных сечений и показано на рис. 2б в виде стрелок, направленных в сторону их падения. Стрелки формируют регулярный в плане рисунок, их согласованные серии — проекции наклонных плоскостей отрицательных аномалий на горизонтальную плоскость. Номера наклонных плоскостей на рис. 2б соответствуют номерам наклонных аномалий, наблюдаемых на вертикальных сечениях (рис. 3).

С точки зрения физического толкования наклонных аномалий можно предположить, что они отображают наличие плоских разуплотненных тел повышенной трещиноватости, проходящих снизу вверх через весь подработанный массив. Морфология и положение плоских разуплотнений относительно границ выработанного пространства позволяют говорить о том, что они являются элементами самоорганизации процессов деформирования подработанного массива и представляют локализованные элементы сдвижения пород с измененными физическими свойствами. На рис. 2б, таким образом, приведена система выявленных техногенных наклонных ослабленных зон, сформировавшихся в подработанной толще в результате ее деформирования.

Возможность формирования на Верхнекамском месторождении сквозных наклонных зон деформаций выше горных выработок подтверждают геомеханические расчеты [11, 12]. Плановое положение плоских наклонных разуплотнений техногенного генезиса на рис. 2б показано на фоне гравитационного эффекта, рассчитанного для глубины залегания продуктивной толщи. Видно, что центры схождения наклонных разуплотненных тел на уровне горных выработок приурочены к отрицательным аномалиям разностной трансформанты, т. е. к разуплотненным ослабленным участкам нижней части подработанного массива. Можно предположить, что участки, где породы вблизи кровли горных выработок изначально характеризовались меньшей плотностью и, соответственно, пониженной прочностью, играли роль инициаторов деформирования при оседаниях. Далее плоскости деформирования распространялись вверх по наиболее оптимальным траекториям с точки зрения минимизации энергетических затрат. Выходы плоскостей деструкции на земную поверхность (рис. 2а) приурочены к локальным отрицательным аномалиям, т. е. к ослабленным участкам приповерхностного слоя.

Плоские наклонные разуплотнения, выявляемые на гравитационных трансформантах, можно считать локализованными элементами сдвижения пород. Приуроченность их к отрицательным аномалиям разностных карт позволяет сделать вывод о том, что деформирование подработанной толщи при сдвижении определяется плотностным строением горного массива.

Наличие локализованных зон в подработанном деформированном массиве соответствует эмпирически установленному закону, который гласит, что “при деформации тела в нем возникают участки, в которых деформации сосредоточиваются преимущественно. Эти участки разделены слабдеформированными блоками” [13]. О выявлении дискретного характера распределения деформаций и напряжений при деформировании больших объемов скальных породных массивов сообщается в работе [14].

Таким образом, анализ трансформант гравитационного поля отчетливо показывает, что подработанный массив на изучаемой территории представляет собой среду, где на фоне природных плотностных неоднородностей сформирована техногенная сеть плоских наклонных разуплотнений. Их толщина оценивается в 100–200 м. Понижение плотности, полученное при решении обратной задачи гравиметрии, составляет 0.02–0.07 г/см³.

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛЯ

С точки зрения безопасности освоения рудника и выявления нестабильных участков наибольший интерес представляют отрицательные динамические аномалии участков, где произошло уменьшение плотности пород за период между съемками. В динамическом поле 2008–2013 гг. (рис. 1в) обнаружилось следующие отрицательные аномалии. На юге западного участка к 2013 г. появилось новое выработанное пространство. Наибольшая разница полей между съемками наблюдается вдоль границы отработки, существовавшей в 2008 г. Это круп-

ная широтная отрицательная аномалия 8д амплитудой 0.12 мГал, распространяющаяся через всю подработанную территорию. Она демонстрирует понижение поля силы тяжести к 2013 г., обусловленное появлением нового пустотного пространства. Больше всего поле изменилось в центральной части подработанной площади, что соответствует модельному отрицательному гравитационному эффекту, рассчитанному от влияния горных выработок.

Отмечаются изменения поля и на локальных участках. Например, отрицательные аномалии 9д, 10д, 11д и др. (рис. 1в) можно истолковать как уменьшение плотности (увеличение трещиноватости) в подработанном массиве за пятилетний период. На восточном отработанном участке в динамическом поле выявлено понижение значений силы тяжести на восточной границе в виде локальной аномалии 13д.

Трехмерная трансформанта динамического поля показывает изменение плотности пород внутри горного массива. На сечении трансформанты (рис. 4) видно, что на западном участке наибольшие изменения произошли на глубинах, близких к уровню залегания горных выработок — аномалия 8д. Наблюдаются также четкие отрицательные наклонные аномалии, подобные аномалиям на трансформантах наблюдаемого поля (рис. 3). Наклонные отрицательные аномалии динамического поля можно характеризовать как зоны деформаций, где зафиксировано уменьшение плотности пород в период 2008 – 2013 гг.

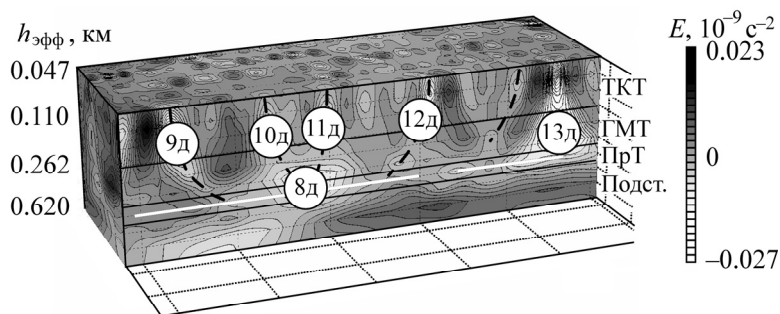


Рис. 4. Сечение трехмерной трансформанты динамического поля по линии 3 (штрихами обозначены оси отрицательных аномалий динамического поля)

Рисунок трансформанты динамического поля подобен картине техногенных деформаций, которая отмечается на трансформантах гравитационного поля. Таким образом, особенности разных видов трансформант гравитационного поля свидетельствуют о том, что деформирование изучаемого массива при его подработке происходило в виде формирования плоских разуплотненных (трещиноватых) зон, наклоненных к центру подработанной площади. Учитывая действие поля силы тяжести Земли, можно предполагать, что в формировании наклонных локализованных зон присутствует сбросовая составляющая.

Наклонные разуплотненные зоны являются наиболее возможными путями фильтрации пластовых и грунтовых вод в выработанное пространство. Поэтому места, где наблюдается схождение наклонных разуплотнений на уровне горных выработок, можно считать наиболее опасными с точки зрения появления течи. Такими местами на изученной территории являются: область, где наиболее сближены техногенные разуплотнения 6 и 3 (780 м к северо-востоку от скв. 475), область сближения разуплотнений 1 и 2 (590 м к юго-востоку от скв. 475) (рис. 2б). Ситуация усугубляется еще и тем, что эти потенциально опасные участки приурочены к зонам отрицательных аномалий гравитационного поля, т. е. к зонам пониженной прочности пород на уровне шахтного пространства.

Выявленные гравиметрией наклонные разуплотнения и отслоения, визуально фиксируемые в горных выработках, позволяют предложить обобщенную модель деформирования подработанных толщ на Верхнекамском месторождении (рис. 5).

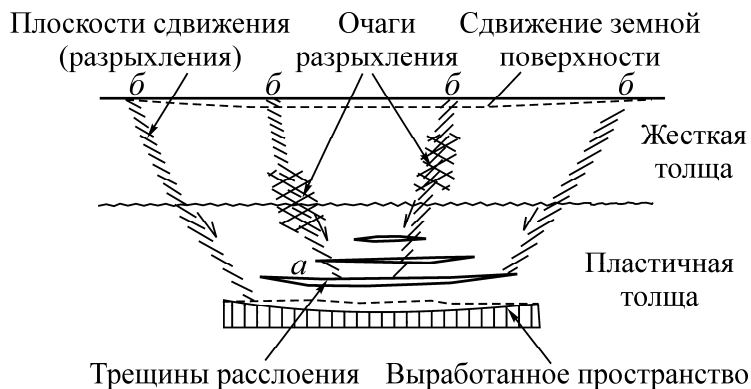


Рис. 5. Схема деформирования подработанного массива: *a* — расслоение; *б* — сдвиг по наклонным плоскостям

ВЫВОДЫ

Анализ результатов высокоточной гравиметрической съемки, проведенной на одном из участков Верхнекамского месторождения, показал, что в гравитационном поле на фоне природной плотностной неоднородности в подработанном массиве фиксируются изменения плотности, произошедшие под воздействием горных работ.

На вертикальных сечениях трехмерной трансформанты поля наблюдаются отрицательные плоские аномалии наклонного простираия, пересекающие всю подработанную толщу. Система разуплотнений представляет собой серию плоских наклонных тел с измененными свойствами пород. Особенности распространения тел в пространстве позволяют считать их проявлением деформационных процессов, вызванных оседанием подработанных масс.

Конкретное положение плоскостей деструкции определяется первичной плотностной неоднородностью массива, точнее, неоднородностью его деформационных свойств. Плоскости деструкции в процессе саморазвития распространяются через наиболее ослабленные участки, которые характеризуются низкой первичной плотностью пород. Систему наклонных разуплотнений можно интерпретировать как локализованные участки сдвига подработанной толщи, где происходит изменение физических свойств.

Полученные результаты исследований позволяют сделать прогноз участков проявления негативных последствий от подработки породного массива. Конкретизируется местоположение опасных участков, определяется место проведения первоочередных мероприятий по предотвращению затопления рудника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кашников Ю. А., Мусихин В. В., Лысков И. А. Определение оседаний земной поверхности при разработке месторождений полезных ископаемых по данным радарной интерферометрии // ФТПРПИ. — 2012. — № 4. — С. 68–77.

2. Кантемиров Ю. И., Камза А. Т., Бермуханова А. М., Тогайбеков А. Ж., Санарбекова М. А., Никифоров С. И. Космический радарный мониторинг смещений земной поверхности на примере одного из нефтяных месторождений Мангистауской области Республики Казахстан // Геоматика. — 2014. — № 4. — С. 46–58.
3. Турчанинов И. А., Иофис М. А., Каспарьян Э. В. Основы механики горных пород. — Л.: Недра, 1989. — 488 с.
4. Кудряшов А. И. Верхнекамское месторождение солей. — Пермь: ГИ УрО РАН, 2001. — 429 с.
5. Петротектонические основы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / под ред. Н. М. Джиноридзе. — СПб.: Соликамск: ОГУП Соликамская типография, 2000. — 400 с.
6. Щербинина Г. П., Простолупов Г. В., Бычков С. Г. Гравиметрические исследования при решении горно-геологических задач на Верхнекамском месторождении калийных солей // ФТПРПИ. — 2011. — № 5. — С. 28–35.
7. Щербинина Г. П., Простолупов Г. В. Высокоточная гравиметрия при обеспечении безопасной отработки Верхнекамского месторождения калийных солей // ГИАБ. — 2015. — № 3. — С. 219–226.
8. Новоселицкий В. М., Чадаев М. С., Погадаев С. В., Кутин В. А. Метод векторного сканирования // Геофизические методы поисков и разведки месторождений нефти и газа: сб. науч. тр. — Пермь: ПГУ, 1998. — С. 54–59.
9. Бычков С. Г. Сравнительные возможности интерпретации гравиметрических материалов в системе “VECTOR” // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: материалы регион. науч.-практ. конф. — Пермь: ПГУ, 2002. — С. 107–110.
10. Простолупов Г. В., Новоселицкий В. М., Конешов В. Н., Щербинина Г. П. Об интерпретации гравитационного и магнитного полей на основе трансформации горизонтальных градиентов в системе VECTOR // Физика Земли. — 2006. — № 6. — С. 90–96.
11. Девятков С. Ю. К вопросу определения условий формирования провалов на земной поверхности // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 12. — Пермь: ГИ УрО РАН, 2014. — С. 96–98.
12. Федосеев А. К. Учет локализации нарушений в надсоляной толще при оценке безопасных условий подработки ВЗТ // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 13. — Пермь: ГИ УрО РАН, 2015. — С. 90–92.
13. Херасков Н. П. Роль тектоники в изучении закономерностей размещения полезных ископаемых в земной коре // Закономерности размещения полезных ископаемых. — М.: АН СССР, 1958. — Т. 1. — С. 14–92.
14. Балек А. Е. Явление самоорганизации деформационных полей массивов горных пород и его использование при решении задач геомеханики // Проблемы недропользования. — 2016. — № 4. — С. 90–96.

*Поступила в редакцию 30/IX 2020
После доработки 28/VII 2021
Принята к публикации 24/XII 2021*