

Г.П. Щербинина, Г.В. Простолупов

**ВЫСОКОТОЧНАЯ ГРАВИМЕТРИЯ
ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОЙ ОТРАБОТКИ
ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ**

Приведены результаты гравиметрических исследований, проводимых с целью решения задач по обеспечению безопасной разработки Верхнекамского месторождения калийных солей. Ряд аварий стимулировали начало применения комплекса геофизических методов, в том числе и гравиметрической съемки, для решения задач по исследованию горного массива. Совместная интерпретация измеренных в разное время гравитационных полей и данных о геологическом строении на фоне изменчивой горной обстановки позволила выявить аномалии, обусловленные плотностными неоднородностями геологической и техногенной природы. Выявлены динамические аномалии – участки, где за период между съемками происходило изменение гравитационного поля, свидетельствующее о процессах, происходящих в горном массиве. В подработанной толще обнаружены зоны, которые могут быть причиной аварийных ситуаций на функционирующем месторождении, и которые требуют постоянного контроля и повышенного внимания горной службы.

Ключевые слова: гравиметрия, аномалия, рудник, соль, авария, безопасность, деформации.

Верхнекамское месторождение калийных солей (ВКМКС) находится в Соликамской депрессии Предуральяского краевого прогиба. Калийная залежь представляет собой пластовое тело, состоящее из переслаивания слоев каменных и калийных солей [1]. Горизонтальные размеры залежи 40×130 км, мощность 80–100 м. Калийный разрез приурочен к верхней части лунежской соляной толщи кунгурского яруса. Общая мощность лунежской соли достигает 400–500 м.

Соляная толща сверху перекрыта надсоляными отложениями мощностью 100–300 м. Надсоляной разрез представлен терригенно-карбонатной, карбонатно-глинистой, глинисто-мергелистой толщами. Породы в разной степени трещиноваты, кавернозные, выветрелы. Между надсоляной и соляной толщами залегает переходная толща, состоящая из слоев каменной соли и слоев мергеля или

глин небольшой мощности, в среднем 5–10 м. Существенным моментом при гравиметрических исследованиях является величина плотности пород, слагающих изучаемый массив. Так плотность надсоляной толщи на Верхнекамском месторождении значительно выше (2,30–2,45 г/см³) плотности соляных пород (2,00–2,20 г/см³).

Многие десятилетия со времени начала эксплуатации месторождения (1930) горно-геологическим фактором обеспечивающим безопасность отработки того или иного участка считалась мощность водозащитной толщи (ВЗТ), под которой подразумевается толща пород от кровли верхней горной выработки до кровли верхнего соляного пласта. Однако, прорыв воды на Третьем Березниковском руднике в 1986 г. на участке с большой мощностью ВЗТ (более 80 м) показал неправомерность такого подхода к обеспечению безопасности месторождения.

Это вызвало необходимость пересмотра геомеханических критериев безопасной подработки ВЗТ и привлечение других факторов, характеризующих особенности геологического строения месторождения, оценки их влияния на напряженно-деформированное состояние подработанного массива [2].

Очередная авария, и как следствие затопление Первого Березниковского рудника (2006), показали, что причинами этого является игнорирование наличия геологических неоднородностей в подрабатываемом массиве, в том числе изменчивости физико-механических свойств пород. Поэтому обеспечение безопасности калийных рудников на Верхней Каме представляет задачу, которая потребовала постановку геофизических исследований для изучения свойств ВЗТ и надсоляной толщи в целом, в том числе проведения гравиметрических наблюдений.

Гравиметрия включена в комплекс геофизических исследований на Верхнекамском месторождении и решает различные задачи: обнаружение разуплотненных ослабленных участков на подготавливаемых к отработке площадях, выявление таких участков на уже подработанных территориях, мониторинг состояния породного массива на участках со сложным геологическим строением.

Для выполнения гравиметрических работ была разработана методика наблюдений, адаптированная для условий месторождения. Специфика ВКМКС для постановки гравиметрических работ заключается в пластовой форме залегания полезного ископаемого, малой глубине исследований и небольших горизонтальных размерах целевых объектов – плотностных неоднородностей.

Для обработки и интерпретации гравитационного поля созданы программные продукты, в которых реализованы теоретические разработки, полученные в Горном институте УрО

РАН (г. Пермь) [3]. Одна из таких программ – система VECTOR [4, 5], которая позволяет выявлять плотностные неоднородности и определять их положение в геологическом пространстве. Она базируется на вычислении горизонтальных градиентов поля и последующем сканировании поля окнами разной величины. Векторная обработка позволяет разделять источники поля резко различных частотных (и соответственно – глубинных) классов по латерали и глубине и получать представление о плотностном строении недр без привлечения какой-либо априорной геологической информации. Трансформанты представляют собой трехмерную картину плотностной неоднородности горного массива. После получения картины распределения аномалий (источников) в пространстве проводится сопоставление полученных трансформант с геологическими данными. Интенсивность аномалий позволяет оценить плотностные характеристики соответствующих им источников.

Многолетняя практика применения системы VECTOR, совместный анализ гравиметрических данных с геологическими материалами показали, что особенности плотностного строения того или иного участка, полученные по гравиметрическим данным, практически всегда подтверждаются геологическими материалами [6].

В качестве примера применения гравиметрии и комплекса VECTOR на Верхнекамском месторождении ниже приводятся результаты исследований на площади, включающей опытно-эксплуатационный участок (ОЭУ) и 5–6 юго-западные панели (ЮЗП) Быгельско-Троицкого участка Четвертого Березниковского рудника (рис. 1). Гравиметрические работы проводились с целью выявления потенциально-опасных участков и наблюдения за изменением плотностной картины за период между съемками разных лет.

Территория исследований расположена на северной периклинали Дурьманского прогиба – отрицательной структуры в кровле соляной толщи. Отрабатываемые калийные пласты продуктивной толщи в пределах изучаемого участка располагаются на глубинах от 250 до 350 м. Поверхность покровной соли (главного стратиграфического горизонта, отражающего тектонику Верхнекамского месторождения) на ЮЗП имеет падение на юго-восток, ОЗУ расположен в осевой части Дурьманского прогиба.

Надсоляная и соляная толщи имеют сложное геологическое строение. В северо-западной части площади исследований (рис. 1) располагается небольшой соляной валик. Параллельно и перпендикулярно этому валику в продуктивной толще выявлены зоны замещения нижних калийных пластов каменной солью. Частично эти зоны (I и II) заходят и на изучаемый участок. Юго-восточная часть площади исследований контактирует с третьей зоной замещения III (рис. 1), где все

калийные пласты продуктивной толщи замещены на каменную соль.

Участки замещений, являясь сами результатом геодинамических процессов в соляной толще, после своего формирования, как жесткие тела, обладающие более высокими прочностными показателями среди более пластичных калийных солей, вносят свой вклад в картину напряженно-деформированного состояния горного массива. Они, являясь концентраторами напряжений в поле сил общего давления с востока, генерируемого Уральской складчатой областью, усложняют горно-геологическую ситуацию.

Надсоляная толща за период своего существования испытала деформации, обусловленные перераспределением по площади нижележащих соляных масс, нагнетанием их на одних участках месторождения и эвакуацией на других. Вариации напряженно-деформированного состояния надсоляного массива привели к сложной картине изменений пород, выразившейся в неоднородности их физического

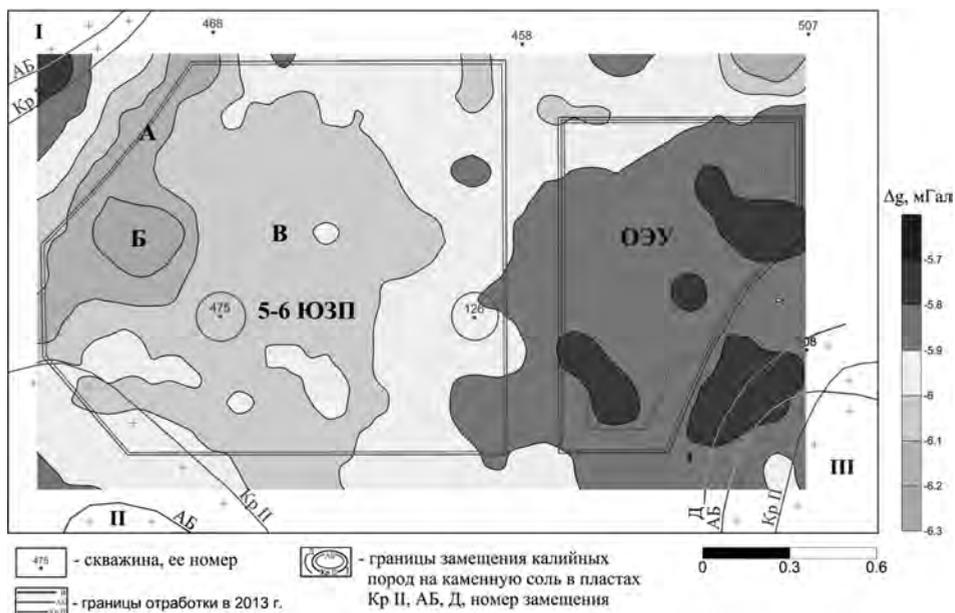


Рис. 1. Поле силы тяжести в редукции Буге (2013)

состояния, которое, в свою очередь, определило различную интенсивность процессов выветривания в том или ином месте.

Из описания керна солеразведочных скважин видно, что породы на изучаемой площади имеют сложную историю постседиментационных преобразований. Так в надсоляной толще встречаются зеркала скольжения, прослой измененных слабых пород, прослой пластичных глин – как результат выветривания мергелей с выносом растворимых компонентов. По всему вскрытому скважинами разрезу, от надсоляной толщи до подстилающей соли, в кернах отмечаются участки наклонной слоистости – свидетельство деформирования осадочных слоев и формирования внутриформационной складчатости.

Продуктивная толща приобрела неоднородное литологическое строение в результате катагенетических преобразований соляных пород. Кроме зон I, II, III по всей территории встречаются участки замещения карналлитовых слоев на пестрые сильвиниты. Особенно это характерно для восточной части площади исследований. Многочисленные и разнообразные признаки вторичных изменений пород, выявленные скважинами, позволяют прогнозировать наличие высокой природной неоднородности плотностных и, соответственно, прочностных характеристик на изучаемой территории.

На участках, подработанных горными выработками, первичная картина распределения плотности значительно усложнилась за счет перераспределения вертикальной нагрузки и появления неоднородностей техногенной природы.

Территории ОЭУ и ЮЗП отличаются различным структурно-тектоническим положением, разной историей постседиментационных преобразований и, следовательно, отличающимся плотностным строением.

На территории ОЭУ (рис. 1) добыча полезного ископаемого началась в 1990 г., обрабатывались три продуктивных пласта – КрII, АБ, В. При проведении очистных работ проявились негативные явления и осложнения: осыпание стенок горных выработок, ускоренные оседания земной поверхности, газодинамические явления и пр. Это явилось причиной постановки здесь в 1999 г. детальных наземных и подземных гравиметрических исследований. В результате были выявлены зоны, проблемные для обработки. Например, у северной границы замещения III обнаружено разуплотнение пород на уровне продуктивной и нижней части надсоляной толщи, интерпретируемое по характерной морфологии, как западное окончание левого сдвига широтного простирания (рис. 2). Причиной формирования сдвига является наличие жесткого тела замещения III, находящегося среди более пластичных и податливых калийных пород в условиях регионального геодинамического поля, генерируемого в зоне Уральского орогена.

В 2008 г. территория ОЭУ вошла в общую площадь детальной гравиметрической наземной съемки. К этому времени здесь были закончены все работы по добыче полезного ископаемого и закладке выработанного пространства. Картина гравитационного поля на ОЭУ за период с 1999 по 2008 гг. значительно изменилась – на востоке и в центре участка значения поля увеличились. Очевидно, проявилось влияние закладочных масс.

Последующая гравиметрическая съемка в 2013 г. на этом участке показала, что основные изменения произошли у северного края области замещения III, где шахтными гравиметрическими наблюдениями в 1999 г. был выявлен элемент сдвига. За период с 2008 г. по 2013 г. отрицательная аномалия в районе сдвига стала

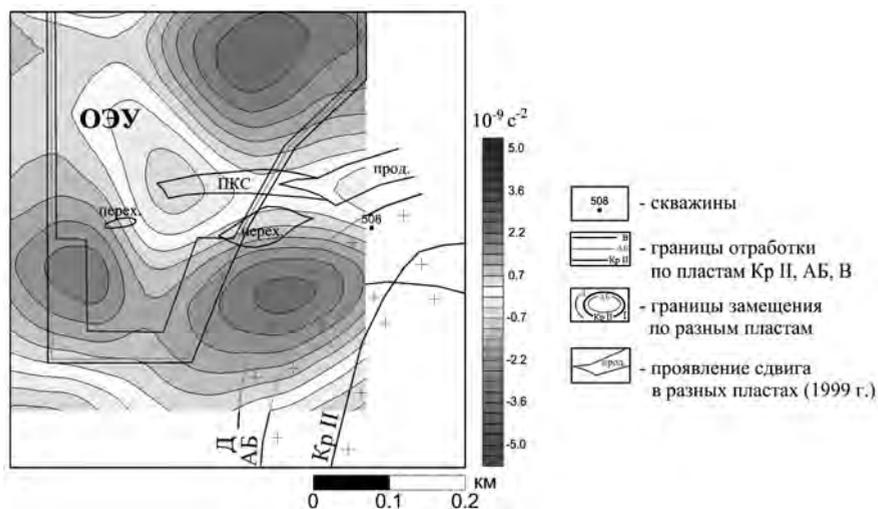


Рис. 2. Разностная трансформанта гравитационного поля, соответствующая слою в пределах эффективных глубин 180–220 м

интенсивнее, что лучше всего видно на разностной трансформанте поля (рис. 2). Понижение поля свидетельствует о динамических процессах в горном массиве, которые привели к снижению плотности пород в области этого предполагаемого тектонического нарушения.

На территории ЮЗП отработаны два продуктивных пласта – КрII и АБ. Горные работы завершились в 2013 г., закладка выработанного пространства не производилась. Детальные площадные гравиметрические работы масштаба 1:10000 здесь были проведены в 2008 и 2013 гг. Гравитационное поле последней съемки характеризуется наличием в центральной части подработанной площади обширной отрицательной аномалии В (рис. 1). Эта аномалия сглаженной морфологии и небольшой амплитуды до 0,1 мГал обусловлена, согласно модельным расчетам, влиянием выработанного пространства.

Узкая линейная отрицательная аномалия А на северо-западе (рис. 1) включает влияние соляного валика и разрыхления надсоляных пород над его сводом. На склоне соляного вали-

ка выявлена интенсивная отрицательная аномалия Б (рис. 1) амплитудой 0,15–0,20 мГал, диаметр аномалии 400 м. На вертикальном сечении трехмерной трансформанты поля (рис. 3) данная аномалия распространяется в большом интервале, захватывая глубины залегания соляной и надсоляной толщ. Детализация низких значений трехмерной аномалии Б показала, что центр ее локализации (центр отрицательных масс) фиксируется на эффективной глубине 200 м, что соответствует реальным глубинам нижней части надсоляной толщи.

Большой размер аномалии Б, наблюдаемый на вертикальном сечении, в силу потенциального характера гравитационного поля не означает, что такой размер имеет область разрыхленных пород в массиве, а свидетельствует только о большом дефиците массы или о значительном уменьшении плотности пород в области локализации.

На рис. 3 кроме аномалии Б четко проявляются и другие менее интенсивные отрицательные аномалии – Б₁ и Б₂. Очевидно, что это небольшие самостоятельные очаги разуплотнения по-

род, проявляющиеся высокочастотной составляющей гравитационного поля. Расчетная глубина их нахождения – 80–90 м. Это соответствует верхней части надсоляной толщи. Диаметр этих аномалий, определенный на разностной трансформанте для верхней части разреза, составляет 100–150 м.

Таким образом, трансформации гравитационного поля показывают, что комплексная отрицательная аномалия, включающая центры локализации Б, Б₁ и Б₂, отражает наличие сложного разуплотнения пород в надсоляной толще на склоне соляного валика. Нельзя отрицать, что процессы выветривания на этом участке могли захватить и верхнюю часть соляной толщи.

Нужно отметить также, что разуплотненная область, наблюдаемая в виде аномалии Б на рис. 1, приурочена к границе выработанного пространства, т.е. находится в зоне действия интенсивных техногенных напряжений.

Сравнение гравитационных полей 2008 г. и 2013 г. выявило наличие

отрицательных динамических аномалий по контуру аномалии Б. Значения силы тяжести здесь уменьшились на 0,05 мГал. Это говорит о том, что в районе контура разуплотненной области Б в настоящее время происходят физические процессы, приводящие к расширению аномалии.

Сравнение аномалии Б (рис. 4, б) с подобной аномалией, зафиксированной в районе провала земной поверхности (2010) у ж/д вокзала г. Березники на шахтном поле Первого Березниковского рудника (рис. 4, а), показывает, что амплитуды этих аномалий Буге близки – около 0,15 – 0,20 мГал. Горизонтальные же размеры аномалии на ЮЗП значительно больше (400 м), чем у вокзала (250 м). Близки также и особенности картин аномалий на вертикальных сечениях трехмерных трансформант. В обоих случаях на малых коэффициентах трансформации (глубины верхней части надсоляной толщи) наблюдаются самостоятельные центры разуплотнений, входящие в структуру комплексных аномалий.

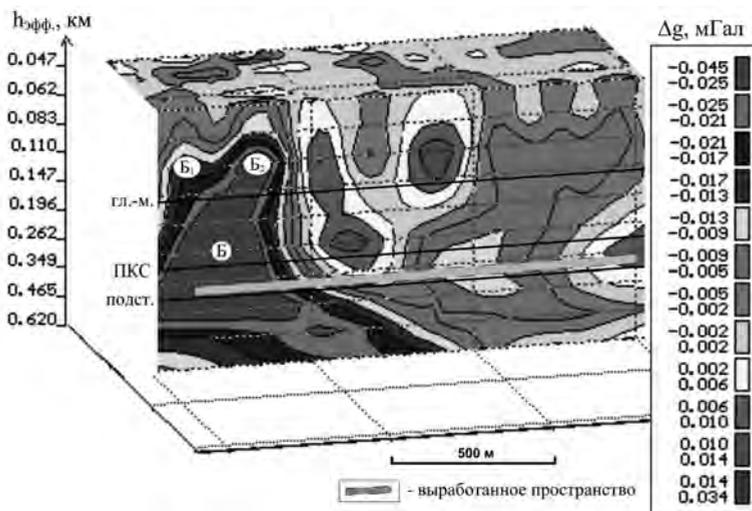


Рис. 3. Вертикальное сечение трехмерной трансформанты гравитационного поля на 5–6 ЮЗП: Б, Б₁, Б₂ – отрицательные аномалии; ПКС, подст., гл.-м. – условное положение стратиграфических границ, соответственно: кровли покровной каменной соли, кровли подстилающей соли, кровли глинисто-мергелистой толщи

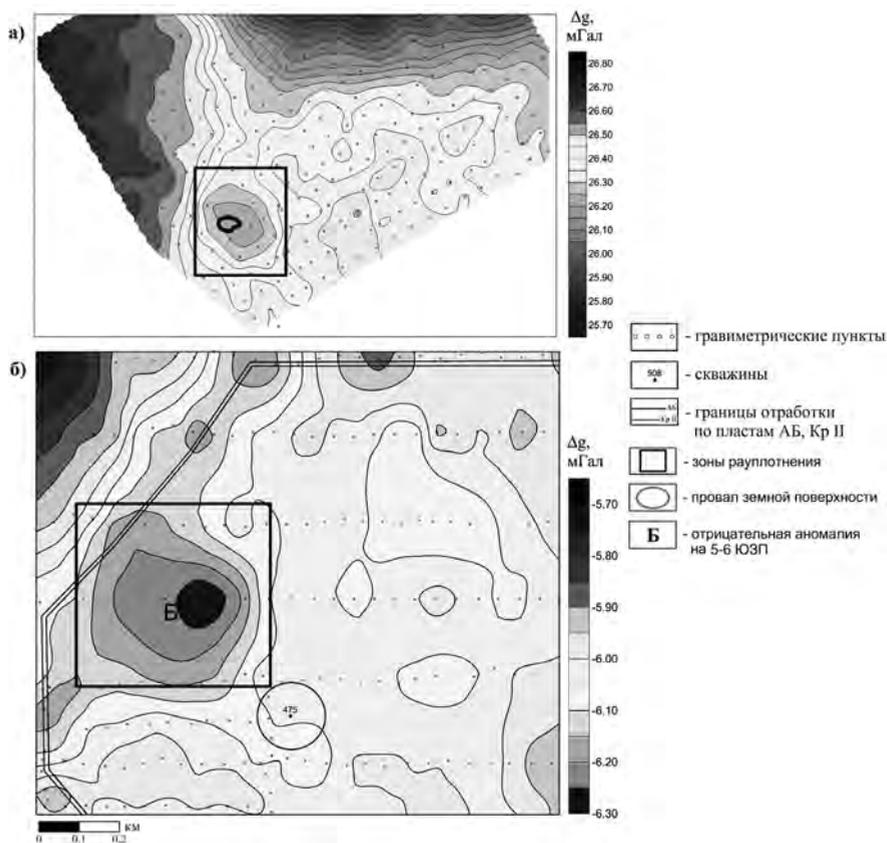


Рис. 4. Поле силы тяжести в районе провала у ж/д вокзала на Первом Березниковском руднике (а) и в районе 5–6 ЮЗП на Четвертом Березниковском руднике (б)

Выводы

Интерпретация результатов гравиметрической съемки позволила сделать заключение о том, что на территории Четвертого Березниковского рудника в пределах подработанного массива 5–6 юго-западных панелей и в районе северной границы замещения III на опытно-эксплуатационном участке выявлены области, требующие

повышенного внимания и контроля со стороны горной службы рудника.

Таким образом, посредством детальной гравиметрии выявлены потенциально опасные ослабленные участки с пониженными плотностными свойствами пород, характеризующиеся динамической активностью, и в целом, значительно расширено понимание процессов, происходящих в подработанных недрах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2001. – 429 с.
2. Бычков С.Г., Простолупов Г.В., Шербинина Г.П. Гравиметрические исследования Верхнекамского месторождения калийных солей // Геофизика. – 2014. – № 5. – С. 46–51.

3. Новоселицкий В.М., Чадаев М.С. Авторское свидетельство 1611103 СССР, МКИ G 01 V 07/00. Способ гравиметрической съемки. 3 с.

4. Новоселицкий В.М., Чадаев М.С., Погадаев С.В. Принцип сканирования в векторной обработке геолого-геофизических

полей // Проблемы безопасности при эксплуатации месторождений полезных ископаемых в зонах градопромышленных агломераций. – Материалы Международного симпозиума SPM-95 Москва-Пермь. – Пермь, 1995. – С. 113–114.

5. Простолупов Г.В., Новоселицкий В.М., Конешов В.Н., Шербинина Г.П. Об интерпретации гравитационного и магнитного полей на основе трансформации горизонтальных градиентов в системе VECTOR // Физика Земли. – 2006. – № 6. – С. 90–96.

6. Шербинина Г.П., Простолупов Г.В., Бычков С.Г. Гравиметрические исследования при решении горно-геологических задач на Верхнекамском месторождении калийных солей // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. СО РАН. – 2011. – № 5. – С. 29–36.

7. Шербинина Г.П. Результаты гравиметрических исследований на опытно-эксплуатационном участке и 5–6 ЮЗП БКПРУ-4 / Стратегия и процессы освоения георесурсов: сборник научных трудов. Вып. 12. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2014. – С. 161–164. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Шербинина Галина Прокопьевна – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Горный институт УрО РАН, Простолупов Геннадий Валерьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: genagravik@gmail.ru, Горный институт УрО РАН, Пермский государственный научно-исследовательский университет.

UDC 550.831

HIGH-PRECISION GRAVIMETRY FOR FAIL-SAFE MINING OF VERKHNEKAMSKOE POTASSIUM DEPOSIT

Shcherbinina G.P., Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Mining Institute of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 614007, Perm, Russia, Prostopolupov G.V., Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, e-mail: genagravik@gmail.ru, Perm State National Research University, Perm, Russia, Mining Institute of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 614007, Perm, Russia.

Some results of gravimetric surveys conducted for fail-safe development of a potash Deposits problems solving are presented. A fair amount of accidents has stimulated the beginning of using of geophysical methods series, including gravity survey, to solve problems on rocks exploration. Interpretation of the measured at more than one times gravitational fields and data about the geological structure in changeable rock conditions allowed us to detect anomalies due to density inhomogeneities of geological and man-made nature. The dynamic anomalies – areas, where some change of the gravity field are observed, were found and they're indicating that some processes in the rocks take place. In the undermined stratum areas are discovered that may cause emergency situations and do require constant monitoring and proper attention of mining services.

Key words: gravity anomaly, mine, salt, accident, security, deformation.

REFERENCES

1. Kudryashov A.I. *Verkhnekamskoe mestorozhdenie solei* (Verkhnekamskoe potassium deposit), Perm', GI UrO RAN, 2001, 429 p.
2. Bychkov S.G., Prostopolupov G.V., Shcherbinina G.P. *Geofizika*, 2014, no 5, pp. 46–51.
3. Novoselitskii V.M., Chadaev M.S. *Copyright certificate 1611103 the USSR, MKI G 01 V 07/00*. The way of gravity survey.
4. Novoselitskii V.M., Chadaev M.S., Pogadaev S.V. *Problemy bezopasnosti pri ekspluatatsii mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh v zonakh gradopromyshlennykh aglomeratsii. Materialy Mezhdunarodnogo simpoziuma SPM-95 Moskva-Perm'* (Problems of safety in the operation of mineral deposits in the areas of industrial agglomerations. Proceedings of the International Symposium SPM-95 Moscow-Perm), Perm, 1995, pp. 113–114.
5. Prostopolupov G.V., Novoselitskii V.M., Koneshov V.N., Shcherbinina G.P. *Fizika Zemli*, 2006, no 6, pp. 90–96.
6. Shcherbinina G.P., Prostopolupov G.V., Bychkov S.G. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2011, no 5, pp. 29–36.
7. Shcherbinina G.P. *Strategiya i protsessy osvoeniya georesursov: sbornik nauchnykh trudov*. Vyp. 12 (Materials of the conference: Strategy and process of georesources development, issue 12), Perm, GI UrO RAN, 2014, pp. 161–164.