

## Заключение

Проведение работ ВСП на изучаемой территории позволило решить две основные задачи:

- получение опорной модели скоростей распространения упругих волн в скважинах;
- увязка данных ВСП и МОГТ, выделение по данным ВСП основных отражающих горизонтов для дальнейшей интерпретации сейсморазведки МОГТ.

На основании решения данных задач установлено, что комплексирование скважинных и наземных сейсморазведочных исследований для данной территории позволяет получать более точные результаты при решении задач стратиграфической привязки опорных отражающих горизонтов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баянов А.С., Меркулов В.П., Степанов Д.Ю. Вертикальное сейсмическое профилирование нефтяных и газовых скважин: учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 100 с.
2. Санфиоров И.А. Рудничные задачи сейсморазведки МОГТ / ГИ УрО РАН. – Екатеринбург, 1996. – 168 с.
3. RadExPro Plus 2020: руководство пользователя. – Текст электронный. – URL: <https://radexpro.com/> (Дата обращения 15.04.2023).

УДК 550. 83. 552.1

DOI:10.7242/echo.2023.3.16

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ГРАВИМЕТРИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СЛОИСТЫХ ТОЛЩ В СКЛАДЧАТОЙ ОБЛАСТИ

Г.П. Щербина

*Горный институт УрО РАН, Пермь*

**Аннотация:** Проведение и интерпретация гравиметрической съемки на месторождении калийных солей, расположенном на территории складчатого строения в горах Гиссарского хребта, имеет свои особенности. Гравиметрические профили прокладывались в зависимости от условий горного рельефа – по горным долинам. Это определило разное расстояние между линиями профилей, что осложняет интерпретацию гравитационного поля. На изучаемой территории расстояние между профилями составило 0,5-1,5 км. Это обстоятельство обусловило разную детальность гравитационной характеристики на разных участках между профилями.

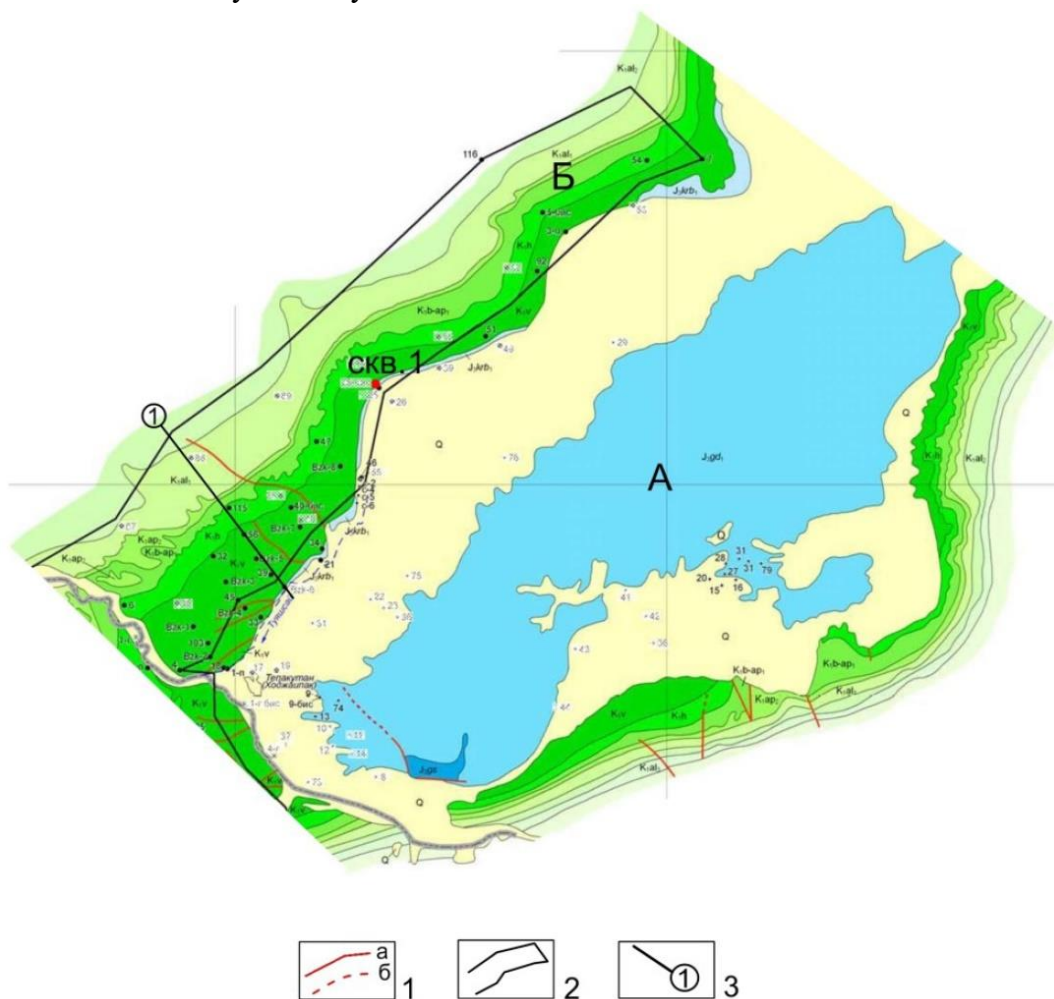
Существенно разная глубина залегания соляного пласта вблизи вершины складки (200-300 м) и в нижней части крыла (1000-200 м) влияет на выявляемую по данным гравитационного поля детальность его плотностного строения. Наиболее детально гравитационное поле характеризует плотностное строение продуктивного пласта на участке близкого залегания к земной поверхности, т.е. в верхней части крыла складки. С погружением слоя солей уменьшается выявляемая детальность его плотностного строения по данным гравиметрии. Т.е. один и тот же стратиграфический слой, залегающий наклонно, отражается в гравитационном поле с разной степенью детальности.

Результаты гравиметрической съемки показали также, что в результате деформаций породного массива при горообразовании надсоляная толща приобрела повышенную плотностную неоднородность по сравнению с соляным и подсоляным разрезом. Гравиметрической съемкой выявлено, что повышенной плотностной неоднородностью характеризуются участки близкие к вершине складки, находящиеся в зоне гипергенеза. Эти участки являются наиболее опасными с точки зрения возможного затопления соляного месторождения при обработке полезного ископаемого.

**Ключевые слова:** гравиметрическая съемка, складчатое строение территории, плотностная неоднородность породных толщ.

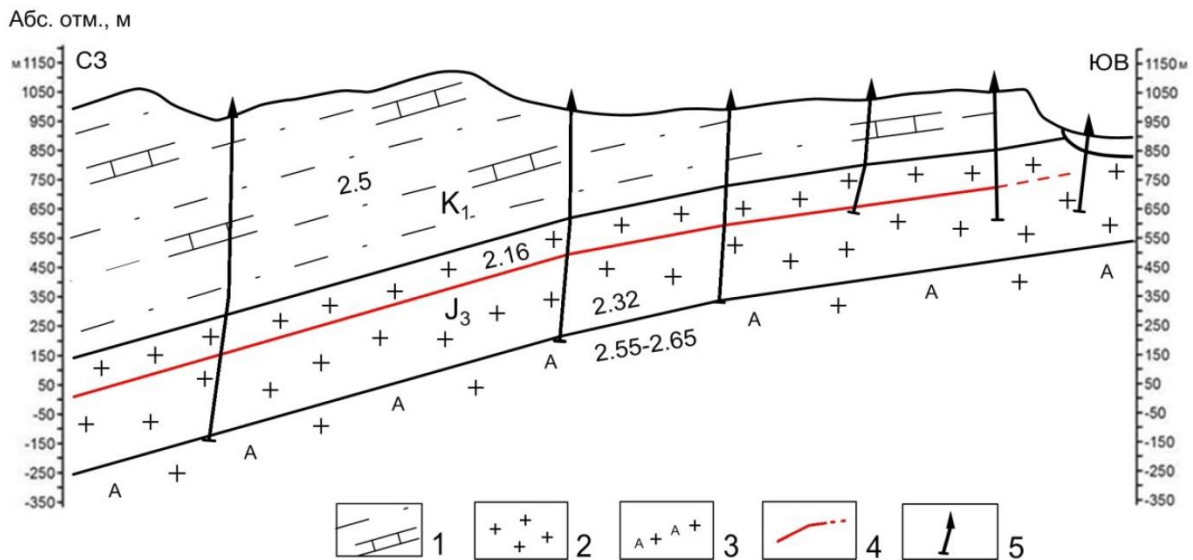
Изучаемое месторождение калийных солей находится в пределах горно-складчатого сооружения Тянь-Шань Альпийско-Гималайского пояса, в пределах западного Гиссара. К началу триаса (240 млн. лет назад) на Тянь-Шане завершился герцинский этап тектогенеза. Затем в течение триаса, юры, мела, палеогена до начала олигоцена (34 млн. лет назад) – т.е. в течение почти 200 млн лет продолжался этап платформенного спокойного развития территории [1]. В это время происходило накопление слоистого разреза, в том числе юрской соленосной толщи. В олигоцене начался неотектонический этап развития Тянь-Шаня, приведший к возрождению горообразовательных движений. Кульминации нарастание рельефа достигло в середине четвертичного периода (около 1 млн лет назад). Следовательно, триас, юрские отложения, содержащие соляные слои, и вышележащая меловая толща с начала олигоцена испытывали складчатые тектонические деформации.

В результате на Западном Гиссаре сформировалась антиклинальная зона, включающая одну из мелких тектонических единиц – складку северо-восточного простирания. К северо-западному крылу складки приурочено месторождение калийных солей. В ядре складки длиной 20 км и шириной 9 км на земную поверхность выходят подсоляные верхнеюрские отложения (рис. 1), представленные ангидритами. В наземном рельефе ядро складки представляет отрицательную форму, которая окаймляется со всех сторон повышенным рельефом из терригенно-глинистых отложений мелового возраста, представляющих надсоляную толщу.



**Рис. 1.** Геологическая карта: А – ядро антиклинальной складки, Б – северо-западное крыло складки. 1 – разрывные нарушения: достоверные (а), предполагаемые (б), 2 – контур соляного месторождения, 3 – линия геологического разреза (из отчета А.И. Кудряшова «Геологические исходные данные для проектирования ...», Пермь, 2007)

Соленосная толща мощностью до 400 м сложена каменной солью с прослоями калийных солей (рис. 2). Один из прослоев является промышленным. Его мощность изменяется от 1 до 10 м. Кровля галитовой толщи погружается в северо-западном направлении под углом 10-15°. Размеры месторождения (в пределах рассматриваемой части) составляют 14×3,5 км. Юго-восточная граница месторождения проходит вблизи линии выклинивания меловых отложений на своде складки (рис. 1, 2). Глубина залегания кровли соляной толщи здесь составляет около 200 м (а.о. около +1000 м). На северо-западной границе месторождения в погруженной части крыла глубина залегания соли около 1 км (а.о. около +200 м).



**Рис. 2.** Геологический разрез по линии 1: 1 – надсоляная глинисто-терригенная толща с прослоями известняков 2 – соленосная подсвита, 3 – ангидритовая подсвита (подсоляные отложения), 4 – условное положение калийного пласта, 5 – скважины (из отчета А.И. Кудряшова «Геологические исходные данные для проектирования ...», Пермь, 2007)

На геологическом разрезе (рис. 2) видно, что надсоляная толща у юго-восточной границы имеет небольшую мощность и исчезает с размывом в сторону ядра складки. В северо-западном направлении по мере углубления залегания соляной толщи мощность надсоляных отложений значительно увеличивается. Надсоляная толща сложена глинисто-обломочными породами (песчаниками, алевролитами, глинами) с прослоями карбонатных пород. Породы слабо литифицированы, на что указывает наличие прослоев глин, а не аргиллитов.

Поэтому надсоляную толщу можно охарактеризовать в силу ее литологического состава и относительно молодого возраста (менее 145 млн. лет) как относительно механически слабую. Кроме того, ослабленное состояние надсоляной толщи усугубляют горообразовательные деформации при альпийских складчатых движениях, которые продолжают согласно [1] и в настоящее время. Это привело к дополнительному понижению прочностных свойств надсоляных пород.

Приземная часть надсоляной толщи находится в условиях высокогорного выветривания. Отметки рельефа земной поверхности на территории месторождения изменяются от 850 м до 1350 м. Зона выветривания, предположительно, имеет изменчивую по площади глубину в зависимости от литологии пород, степени их деформированности и разрушенности в конкретной геологической ситуации. При бурении скважин в надсоляных отложениях встречены участки повышенной трещиноватости, дробления пород. На интенсивное проявление процессов выветривания оказывают влияние также совре-

менные горообразовательные движения. В верхней части крыла складки (юго-восточная граница месторождения) на земную поверхность выходят соленосные отложения (рис. 1, 2). На участках их выхода в зону гипергенеза фиксируется соляной карст, сформирована гипсовая шляпа.

На земной поверхности в результате неоднородного выветривания слоев разного состава сформировался рельеф, отражающий складчатое строение массива. Рельеф состоит из хребтов и долин. В их угловатой форме отражается строение надсоляной толщи, которое, вероятно, повторяет морфологию соляной поверхности. В верхней части крыла рассматриваемой складки на юго-восточной границе месторождения в районах скважин 1 и 4 наблюдается аномальная степень денудации отложений с понижением рельефа земной поверхности. Это предполагает наличие в районах этих скважин соляных поднятий из следующих соображений. При горообразовательных движениях в толщах пород появляются участки с дифференцированными тектоническими напряжениями в зависимости от конкретной геологической ситуации. Пластичные соляные массы выдавливаются в места, характеризующиеся низкими напряжениями. Так, в районах перечисленных скважин формировались участки повышенной мощности соли, т.е. соляные подушки-поднятия. Рост соляных поднятий вызывал приподнимание надсоляной толщи с формированием в ней повышенной трещиноватости. Это способствовало усиленной денудации надсоляных пород и образованию над вершинами соляных поднятий отрицательных форм в наземном рельефе, а на геологической карте вклиниваний поля юрских отложений в поле меловых. Соляные поднятия, таким образом, проявились на геологической карте (рис. 1) и карте наземного рельефа угловатыми формами, заходящими от свода складки в сторону погружающегося крыла.

Изменчивая мощность соляной толщи в верхней части крыла складки описана в работе [2]. На геологическом разрезе, построенном вдоль верхней части крыла складки, в районах скважин 1 и 4 наблюдаются участки раздува соляной толщи приблизительно на 30%, с 300 м до 420 м. Амплитуда поднятий на разрезе около 100-120 м.

Можно предполагать следующий механизм формирования данных структур в условиях проявления активных тектонических движений. Повышенная денудация пород в районе наблюдаемых поднятий приводила к уменьшению мощности надсоляной толщи. Это вызывало снижение ее веса на данных участках и, соответственно, уменьшение нагрузки на поверхность соли, что способствовало нагнетанию туда соляных масс. Рост соляных поднятий сопровождался дополнительным разрыхлением надсоляных пород и последующей усиленной денудацией, т.е. денудация и галокинез в этих местах стимулировали друг друга.

Такая геодинамическая обстановка и интенсивное выветривание юрских и меловых толщ на своде складки обусловили высокую степень разрыхленности и снижение плотностных и прочностных свойств пород вдоль юго-восточного края месторождения. Усугубляет ситуацию также то, что здесь на земную поверхность выходит контакт проницаемой терригенно-глинистой толщи и непроницаемых солей, что имеет специфическое влияние на гидрологические процессы, происходящие в зоне контакта.

Все это определило здесь высокую плотностную неоднородность толщ, которая фиксируется гравиметрической съемкой.

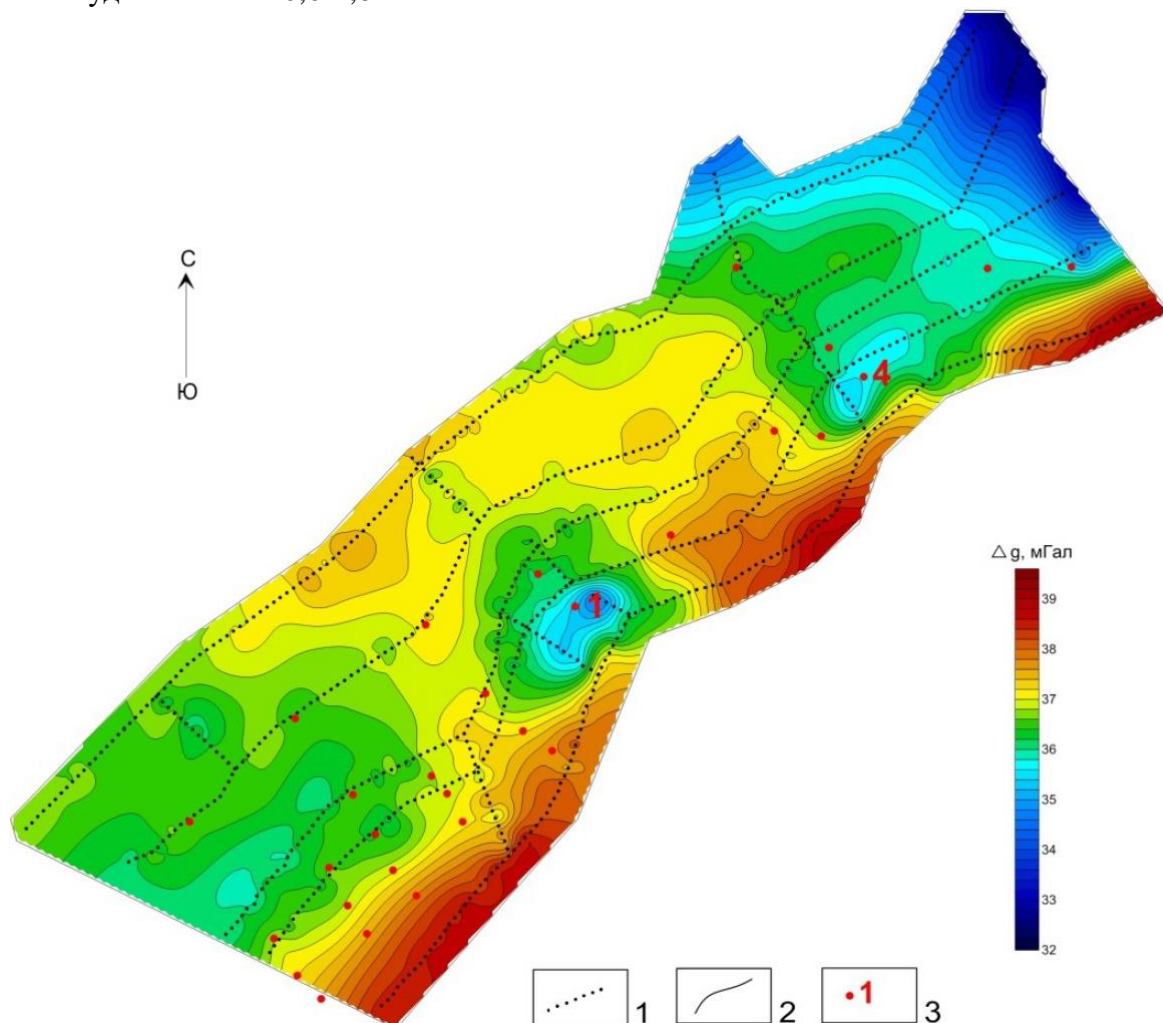
По мере углубления залегания кровли соли в северо-западном направлении и увеличения мощности надсоляных отложений амплитуда соляных поднятий, очевидно, уменьшается, и на крутом склоне они выглядят в виде структурных носов. Степень выветрелости, измененности соляного разреза и перекрывающей надсоляной толщи по мере погружения соляной толщи, очевидно, уменьшаются и продуктивная толща постепенно выводится из зоны выветривания.

Профили гравиметрических наблюдений прокладывались по долинам. В результате сеть точек наблюдения оказалась весьма неравномерной. Расстояние между профилями

изменяется от 0,5 км до 1,5 км. Расстояние между точками на профиле составляет 0,1 км. Данный факт накладывает свои особенности на интерпретацию гравитационного поля и его трансформант и осмысление полученных результатов.

Интерпретация материалов гравиметрической съемки, проведенной на месторождении, базировалась на использовании данных о плотностных свойствах пород. О плотностном строении разреза можно судить только по справочным данным [3, 4]. Так средняя плотность надсоляной толщи в соответствии с литологическим составом принята  $2,50 \text{ г/см}^3$ , галитовой калиеносной подсветы –  $2,16 \text{ г/см}^3$ , некалиеносной и переходной подсветы –  $2,32 \text{ г/см}^3$ , подсоляной ангидритовой подсветы –  $2,55\text{-}2,65 \text{ г/см}^3$ . Галитовая калиеносная подсвета, таким образом, отличается заметно пониженной плотностью по сравнению с перекрывающей и подстилающей толщами, а ее кровля и подошва являются интенсивными гравиактивными границами.

Из изложенного выше следует, что повышенная степень плотностной неоднородности пород [5], проявляющаяся в гравитационном поле наличием локальных аномалий, будет наблюдаться вдоль юго-восточной границы месторождения. Карта измеренного поля силы тяжести приведена на рис. 3. Вдоль юго-восточного края изучаемой территории в соответствии с выводами, полученными из анализа геологических данных, наблюдаются две отрицательные аномалии, которые соответствуют в плане вышеописанным соляным поднятиям. Горизонтальные размеры аномалий 1,5 км и 2,5 км, амплитуда аномалий 0,6-1,8 мГал.

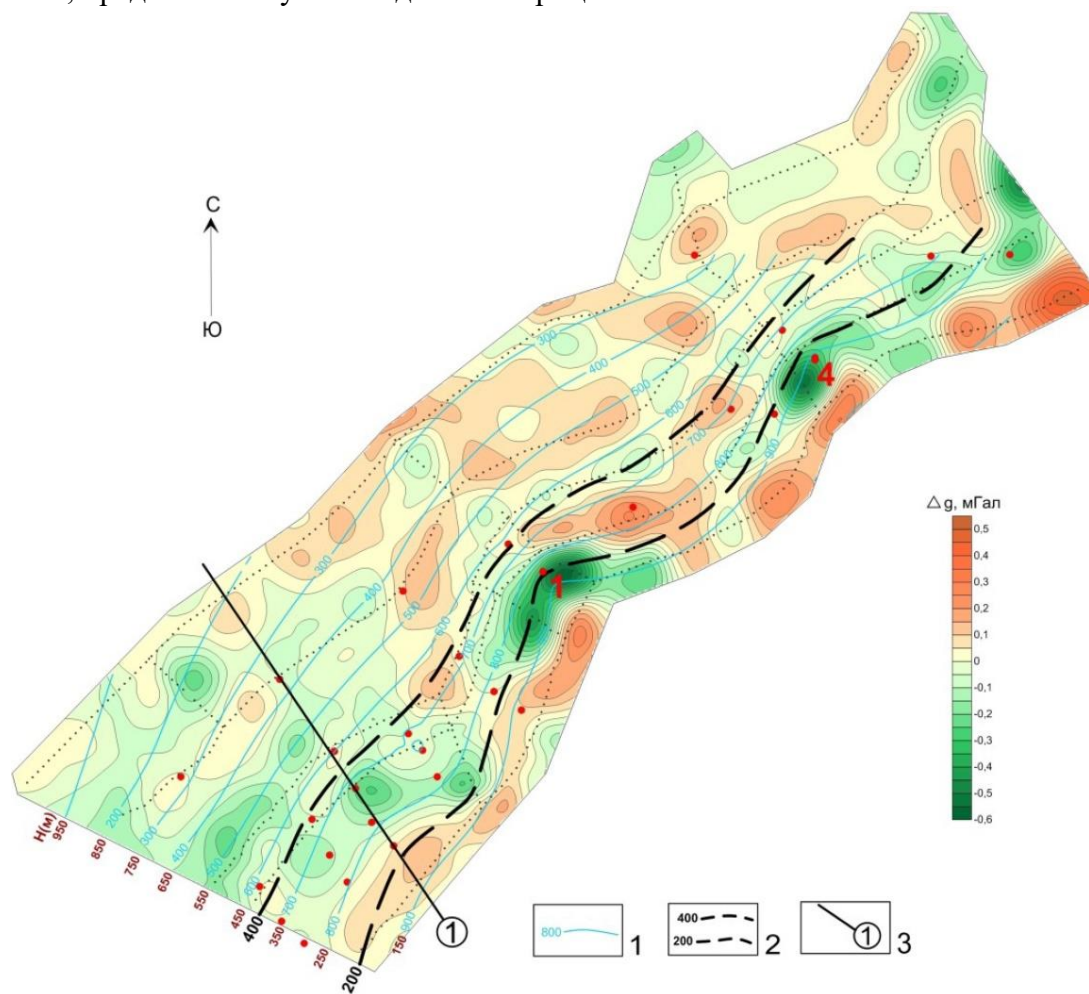


**Рис. 3.** Карта поля силы тяжести в редукции Буге (в условном уровне): 1 - пункты гравиметрических наблюдений, номер профиля, 2 - изоаномалы, сечение 0,2 мГал, 3 – скважины

Наблюдаемое гравитационное поле интерпретировалось с применением программы векторного сканирования [6]. Была построена 3D-модель гравитационного поля, представляющая куб эффективной избыточной плотности, и несколько ее вертикальных сечений. Трехмерная трансформанта гравитационного поля составляется из серии разностных гравитационных эффектов. Он характеризует объемное плотностное строение породного массива.

Трехмерная трансформанта дополнялась построением разностных трансформант гравитационного поля. Разностная трансформанта представляет часть гравитационного поля, формируемая слоем, привязанным коэффициентами к эффективной расчетной глубине. Она отражает плотностное строение задаваемого эффективного слоя. Отрицательные аномалии указывают на разуплотненное состояние пород, относящихся к данному условному слою, положительные – на участки плотных пород.

На рис. 4 приведена разностная трансформанта для слоя, характеризуемого эффективными глубинами 200-400 м. Наиболее пониженными значениями поля – аномалиями 2 и 3, отображаются участки соляных поднятий, выявленных при анализе геологических материалов. Понижение поля в аномалиях обусловлено приближенным положением к земной поверхности отрицательной гравиактивной границы – кровли соляной толщи, а также разуплотненным состоянием надсоляных и соляных пород, деформированных и выветрелых. Наибольшую опасность при производстве горных работ, таким образом, представляют участки данных отрицательных аномалий.



**Рис. 4.** Разностная трансформанта для слоя 200-400 м – гравитационное поле слоя между эффективными глубинами 200 и 400 м (абс. отн. +850 - +650 м): 1 – изогипсы поверхности соли, 2 – пересечение поверхности соли кровлей и подошвой слоя 200-400 м, 3 – линия геологического разреза

Особенностью истолкования трансформант гравитационного поля, построенных для горных территорий с крутым падением слоев, в частности для описываемой территории, является понимание того, что изучаемый наклонно залегающий стратиграфический интервал разреза в связи со свойством программы VECTOR характеризуется на трансформантах разной степенью детальности плотностного строения в зависимости от глубины его залегания. Чем большая глубина залегания пласта, тем с меньшей детальностью отражается на трансформантах его плотностное строение. Это обусловлено тем, что при построении трансформант для глубоких слоев увеличиваются окна осреднения наблюдаемого поля, происходит сглаживание мелких деталей поля. Таким образом, при значительном наклоне изучаемого пласта, характерном для складчатых областей, на трехмерной трансформанте плотностное строение слоя с увеличением глубины отображается все менее детально.

По материалам интерпретации гравиметрической съемки, учитывая результаты анализа геологических материалов и историю развития территории соляного месторождения, получен следующий вывод. Наиболее потенциально опасные для разработки участки находятся вдоль его юго-восточной границы, в верхней части крыла складки. Эта территория представляет наиболее деформированный и измененный в зоне гипергенеза участок с перекрывающей соль толщиной незначительной мощности. В гравитационном поле в виде отрицательных аномалий определяется местоположение разуплотненных механически ослабленных локальных участков, потенциально опасных при производстве горных работ.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (рег. номер 122012000398-0).*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов. – М.: Науч. мир, 2001. – 604 с.: ил.
2. Чайковский И.И. Тектонические особенности района Тюбегатанской антиклинали // Горное эхо. – 2022. – № 2 (87). – С. 38-41. – DOI: 10.7242/echo.2022.2.6.
3. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых: (Петрофизика). Справ. геофизика / под ред. Н.Б. Дортман. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, – 1984. – 455 с.: ил.
4. Кобранова В.Н. Физические свойства горных пород: (Петрофизика): [учеб. пособие]. – М.: Гостехиздат, 1962. – 490 с., 1 л. черт.: ил.
5. Новоселицкий В.М., Простолупов Г.В. Векторная обработка гравиметрических наблюдений с целью обнаружения и локализации источников аномалий // Геофизика и математика: материалы 1-й Всерос. конф. / ОИФЗ РАН [и др.]; под ред. В.Н. Страхова. – М., 1999. – С. 104-107.
6. Чайковский И.И., Калинина Т.А., Коротченкова О.В. Тектонические и эпигенетические процессы в надсолевой толще Верхнекамского месторождения // Литосфера. – 2015. – № 5. – С. 71-80.