

---

# ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ НЕДР

УДК 550.831

DOI:10.7242/echo.2021.4.10

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГОВЫХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ВЕРХНЕКАМСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

С.Г. Бычков

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация.** Мониторинговые гравиметрические наблюдения проводятся с целью выявления неприливых вариаций силы тяжести, связанных с техногенным воздействием на геологическую среду, при добыче полезных ископаемых. В работе обобщен опыт проведения мониторинговых гравиметрических наблюдений на Верхнекамском месторождении калийных солей. Показано, что по результатам мониторинговых гравиметрических наблюдений можно прогнозировать участки опасных геологических процессов и осуществлять контроль за оседаниями земной поверхности.

**Ключевые слова:** гравиразведка, мониторинг, аномалия гравитационного поля, динамическая гравитационная аномалия, калийные соли, провал земной поверхности, безопасность горных работ.

### Введение

Разработка месторождений полезных ископаемых нарушает природный баланс физических параметров в недрах, создавая предпосылки к возникновению природно-техногенных процессов, зачастую приводящих к катастрофическим последствиям. Одним из методов контроля техногенного воздействия на геологическую среду являются мониторинговые гравиметрические наблюдения. По результатам повторных гравиметрических наблюдений рассчитывается динамическая аномалия силы тяжести, определяемая как разность между последующими и предыдущими значениями силы тяжести. Поскольку гравитационное поле является аддитивным, отдельные составляющие его, обусловленные породами, в которых не происходили изменения плотности, будут иметь нулевые значения в динамических аномалиях. Отрицательные аномалии динамического поля будут обусловлены только фрагментами геологического разреза, где произошли процессы разуплотнения пород, обусловленные техногенными процессами, связанными с добычей полезного ископаемого или карстовыми явлениями.

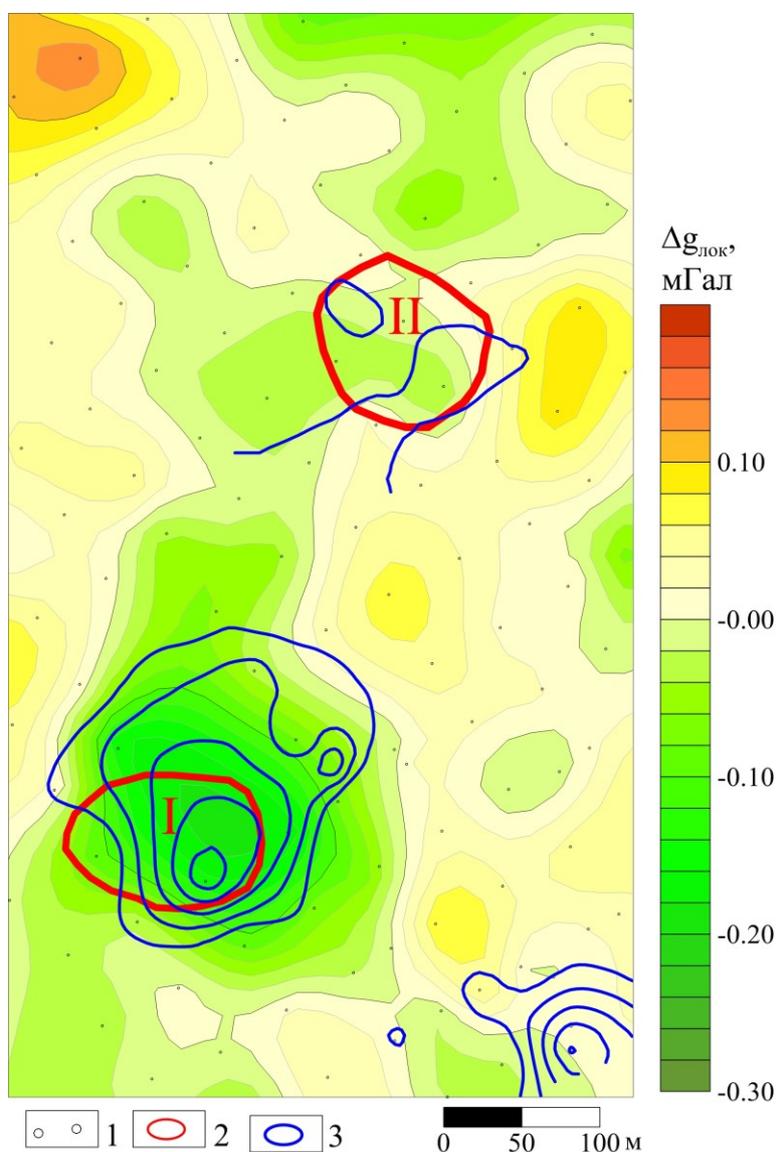
Для создания и опробования технологии проведения, обработки и интерпретации мониторинговых гравиметрических наблюдений в 2016 г. над затопленными шахтными полями на территории г. Березники был создан гравиметрический полигон [7]. Разработана методика высокоточных полевых работ с измерением как гравитационного поля, так и высот пунктов [8]. Для интерпретации результатов разработаны геологическая [3] и динамическая [6] модели гравиметрического мониторинга. Для интерпретации данных адаптирована методика синтеза качественных и количественных методов [9]. Интерпретация данных осуществляется в два этапа. На первом этапе производится разложение поля на составляющие с построением 3D модели поля и выбора начального приближения для количественной интерпретации. Решение обратной задачи осуществляется аддитивными методами с построением функции локализации источников поля, которая объединяет допустимые решения некорректной и неоднозначной задачи [1] и определяет вероятные интервалы положения, глубины и изменения плотности горных пород, произошедшего между двумя парами измерений поля.

В результате обобщения опыта проведения мониторинговых гравиметрических наблюдений на Верхнекамском месторождении калийных солей установлено, что по полученным результатам можно прогнозировать участки опасных геологических процессов и осуществлять контроль за оседаниями земной поверхности.

### Прогнозирование участков опасных геологических процессов

Первый опыт проведения повторных гравиметрических наблюдений на одной и той же площади был получен после провала земной поверхности в районе железнодорожного вокзала г. Березники в ноябре 2010 г.

Целью гравиметрических исследований являлось оконтуривание зоны разуплотнения в районе провала, выяснении его природы, глубины распространения, а также выявление участков разуплотненных пород на прилегающей территории и определение динамики геологических процессов, происходящих в районе провала. Измерения проведены в ноябре 2010 г., феврале 2011 г. и в сентябре 2011 г. по сети 50×50 м с погрешностью ±0.014 мГал.



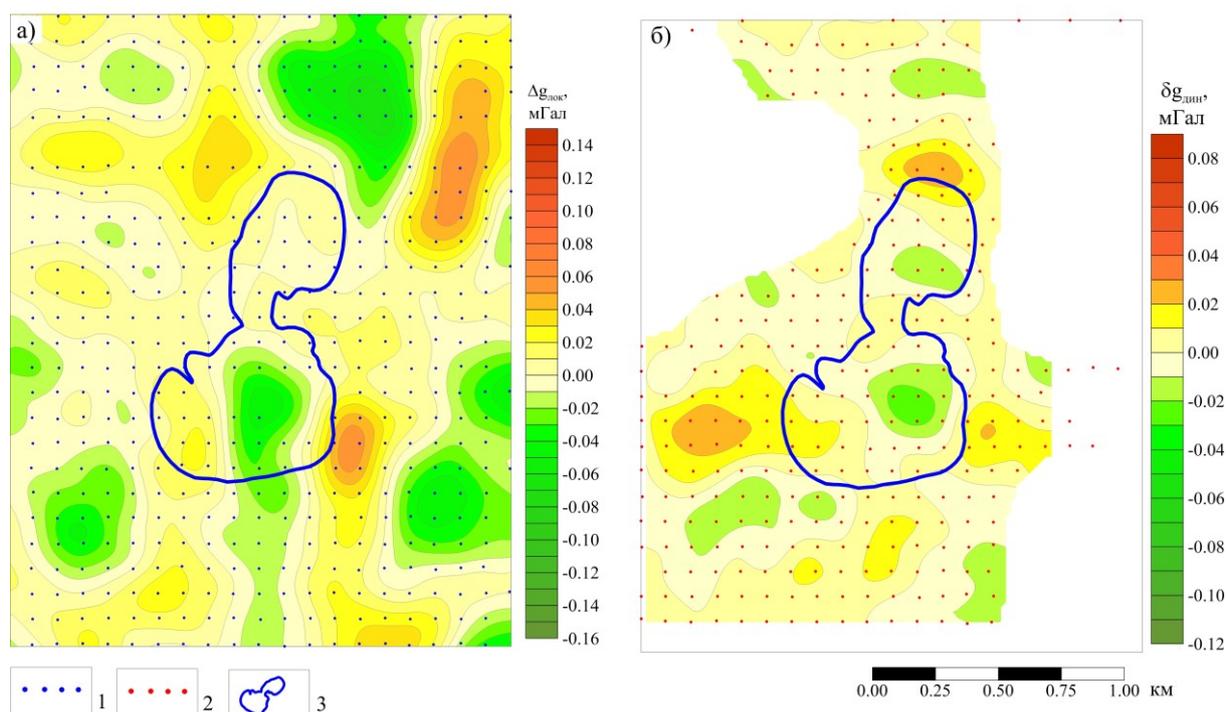
**Рис. 1.** Локальная составляющая и динамические аномалии гравитационного поля в районе провалов земной поверхности: 1 – пункты гравиметрических наблюдений; 2 – провалы земной поверхности (I – 11.2010 г. и II – 12.2011 г.); 3 – динамические аномалии силы тяжести

Наиболее интенсивная отрицательная аномалия амплитудой до 0.3 мГал изометричной формы на карте локальных аномалий силы тяжести выявлена в районе провала, что свидетельствует о дефиците массы горных пород на данном участке. От данной аномалии на север от провала I простирается субширотная менее интенсивная отрицательная аномалия, которая интерпретировалась как природная разуплотненных пород в верхней части разреза [5].

В период с ноября 2010 г. по февраль 2011 г. отрицательная динамическая аномалия выявлена только в районе провала I, что свидетельствовало о продолжении процесса разуплотнения, приводящем к расширению контура провала. Повторная гравиметрическая съемка в сентябре 2011 г. выявила отрицательную динамическую аномалию к северу от провала I. Через три месяца в декабре 2011 г. здесь сформировался еще один провал земной поверхности (обозначен цифрой II на рис. 1).

Пространственное совпадение динамических и локальной отрицательной аномалии силы тяжести в районе провалов I и II однозначно интерпретируется как существование природной разуплотненной зоны, в которых продолжается техногенный процесс, обусловленный затоплением рудника [2].

Аналогичное соотношение локальной и динамической отрицательных аномалий выявлено в западной части СКРУ-2, где в 2016 и 2018 гг. проводились работы с целью анализа геологической ситуации, связанной с оседанием земной поверхности и образованием техногенного озера (рис. 2).



**Рис. 2.** Карта локальных (а) и динамических (б) аномалий силы тяжести 1 – пункты наблюдений, 2 – пункты повторных наблюдений, 3 – контур техногенного озера

В южной части озера выявлена интенсивная отрицательная аномалия силы тяжести (рис. 2а). Моделирование гравитационного поля показало, что плотность пород здесь понижена относительно соседних участков на 0.05-0.08 г/см<sup>3</sup>. Данная аномалия отражает разуплотнение подработанной толщи от подошвы продуктивной толщи (кровли ненарушенного массива) до земной поверхности. Причем к земной поверхности об-

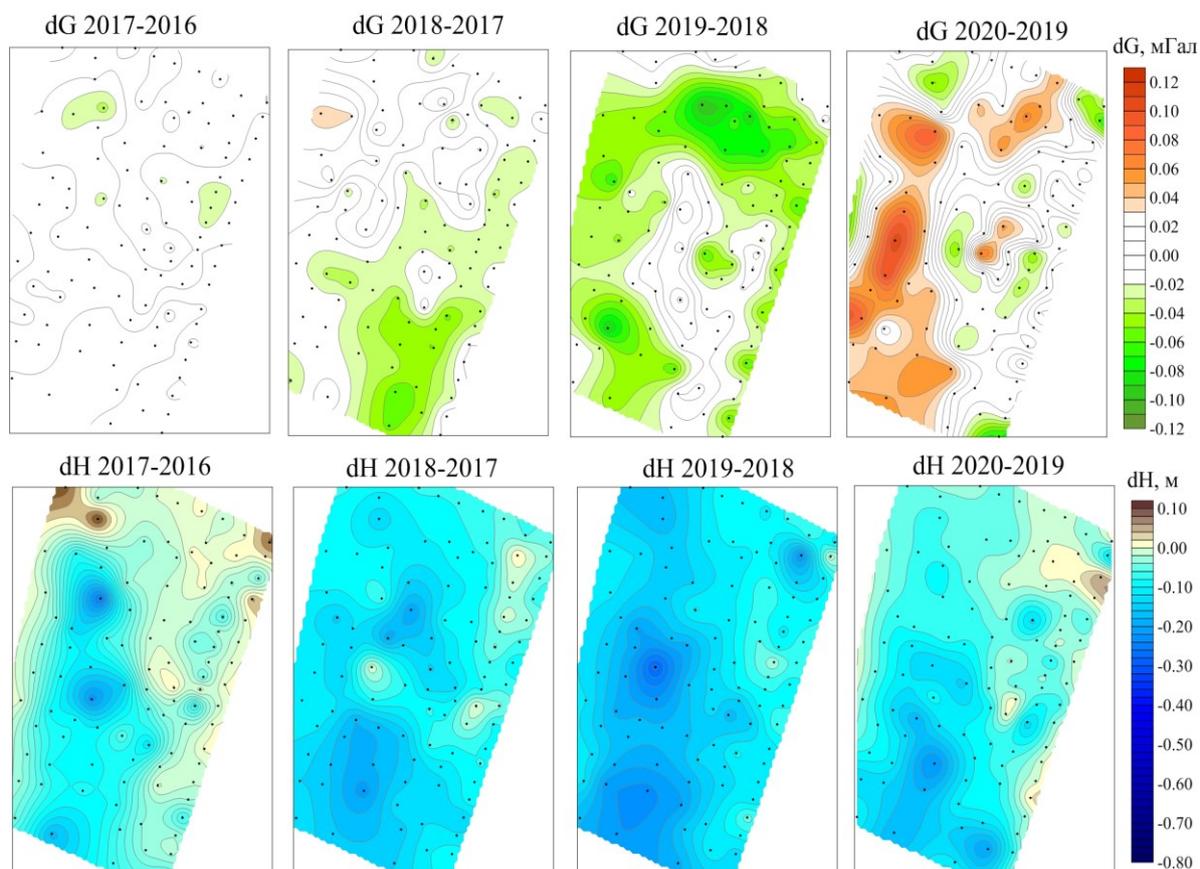
ласть разуплотнения выходит в виде нескольких «рукавов» небольших горизонтальных размеров. В северной части озера интенсивные отрицательные аномалии отсутствуют, плотность пород здесь более выровнена.

По результатам анализа динамических аномалий силы тяжести за период 2016-2018 гг. видно, что отрицательные аномалии, т.е. зоны, где происходит процесс разуплотнения пород, расположены в южной и северной частях озера (рис. 2б). Аномалии с более контрастными амплитудами наблюдаются в южной части площади, где, видимо, динамические процессы в массиве протекали более контрастно. Очевидно, что здесь в зоне с изначально пониженными плотностями пород происходят интенсивные процессы техногенного разуплотнения, обусловленные горными работами, что приводит к оседанию земной поверхности. В северной части озера ситуация менее опасная, однако наличие динамической аномалии свидетельствует о возможном оседании здесь земной поверхности и необходимости продолжения контроля за состоянием недр.

### Контроль оседаний земной поверхности

На гравиметрическом полигоне г. Березники работы выполнялись ежегодно на закрепленных пунктах. В каждом цикле измерений определялись не только значения силы тяжести, но и фиксировались изменения высот пунктов.

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. Как видно из рисунка, амплитуда, размеры и местоположение динамических аномалий существенным образом меняются в различных циклах мониторинга.



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

В период 2019-2020 гг. произошла инверсия знака динамических аномалий. В юго-западной части площади, где за период 2018-2019 гг. происходили наибольшие оседания земной поверхности, отрицательные динамические аномалии сменились положительными. По нашему мнению, участки повышенных оседаний, сопровождаемые увеличением величины динамической аномалии, объясняются компенсацией значений аномалий увеличением плотности пород, обусловленной оседанием. Например, в 2018 г. наиболее интенсивные динамические аномалии силы тяжести проявлялись на юге участка, в 2018-19 гг. здесь произошли повышенные оседания земной поверхности, что подтвердило сделанный нами ранее [4] прогноз оседаний. Одновременно с оседанием в этой части участка произошло «затухание» динамической аномалии. Инверсия динамических аномалий в период 2019-20 гг. свидетельствует о прекращении процесса разуплотнения пород или начале нового цикла «разуплотнение – оседание».

Более наглядно данный процесс иллюстрируется динамической моделью гравиметрического мониторинга [6]. Если в период времени  $T1 - T2$  (рис. 4а, б) произошли изменения плотностного строения горного массива, например, образовалась карстовая полость или произошел процесс разуплотнения пород вследствие затопления горных выработок, то данный процесс отразится отрицательными динамическими аномалиями силы тяжести (рис. 4г). Последующее оседание земной поверхности над зоной разуплотнения в период времени  $T2 - T3$  (рис. 4в) приводит к уплотнению пород, что будет зафиксировано положительной динамической аномалией силы тяжести (рис. 4д).

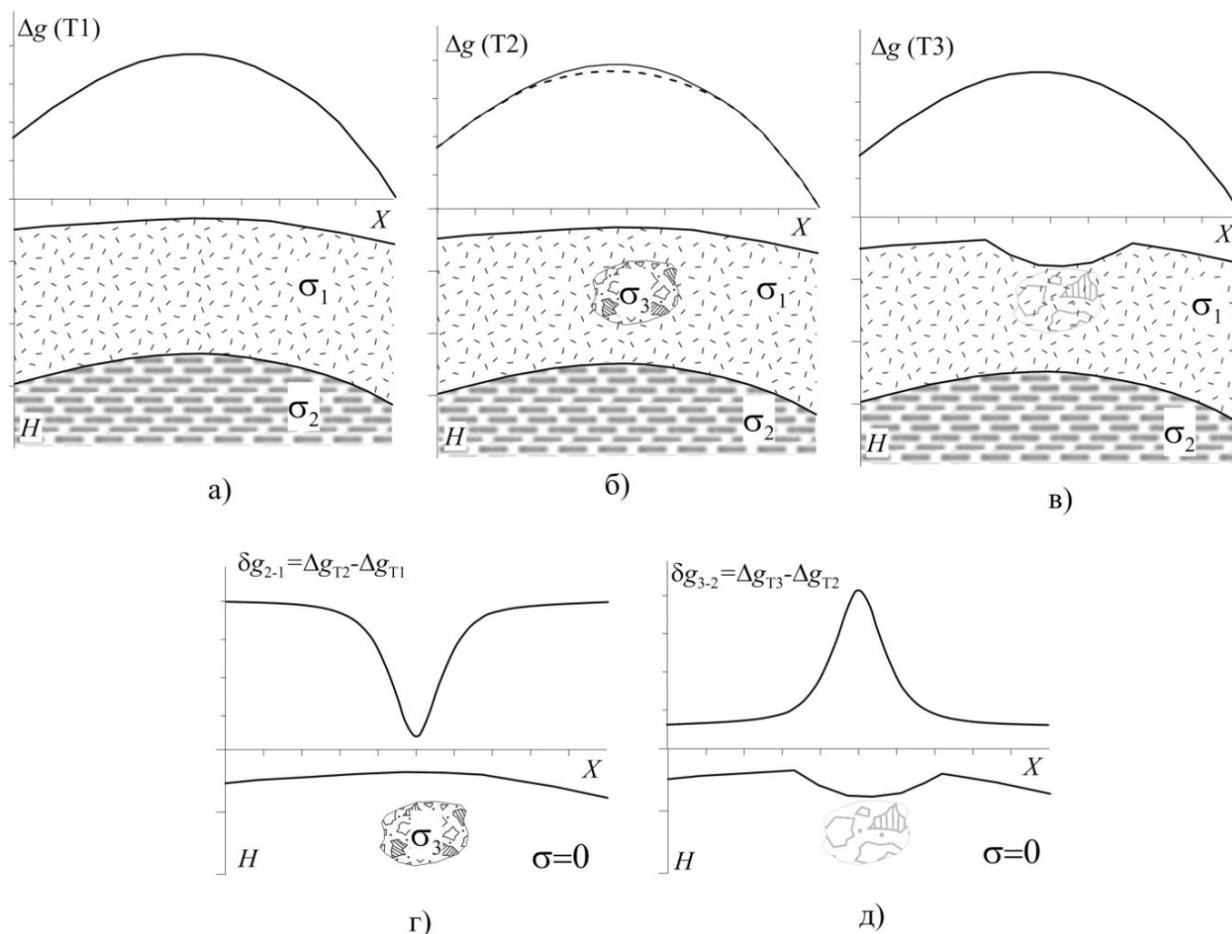


Рис. 4. Динамическая модель гравиметрического мониторинга

### Заключение

Обобщая опыт проведения мониторинговых и повторных гравиметрических наблюдений на Верхнекамском месторождении калийных солей, можно констатировать высокую эффективность метода. По сочетанию отрицательных локальных аномалий силы тяжести, которые интерпретируются как природные ослабленные зоны, с отрицательными динамическими аномалиями, выявленными по мониторинговым гравиметрическим наблюдениям, которые связаны с продолжением процесса разуплотнения, можно успешно прогнозировать участки опасных геологических процессов и повысить безопасность эксплуатации Верхнекамского месторождения.

По результатам долгосрочных периодических наблюдений гравитационного поля можно контролировать процесс оседаний земной поверхности, фиксируя циклы разуплотнения горных пород и последующих оседаний.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 19-45-59001Пр\_а).*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балк П.И., Долгалъ А.С. Аддитивные методы решения обратных задач гравиразведки и магниторазведки. – М.: Науч. мир, 2020. – 456 с
2. Бычков С.Г. Выявление областей природного и техногенного разуплотнения подработанной толщи по гравиметрическим данным // Горное эхо. – 2020. – № 1 (78). – С. 55-58. DOI: 10.7242/echo.2020.1.12.
3. Бычков С.Г. Гравиметрический мониторинг: возможности, задачи, перспективы // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 15 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2017. – С. 146-149.
4. Бычков С.Г., Мичурин А.В., Симанов А.А., Хохлова В.В. Гравиметрические исследования состояния геосреды в районах интенсивного освоения недр // Горный журнал. – 2019. – №12. – С. 90-94. – DOI:10.17580/gzh.2019.12.19.
5. Бычков С.Г., Симанов 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.
6. Бычков С.Г., Симанов А.А., Хохлова В.В. Контроль процесса оседания земной поверхности по мониторинговым гравиметрическим наблюдениям // Инженерная и рудная геофизика – 2021: 17-я науч.-практ. конф. и выставка, 26-30 апр. 2021 г. – Геленджик, 2021. – DOI: 10.3997/2214-4609.202152028.
7. Симанов А.А. Мониторинговые наблюдения на гравиметрическом полигоне в г. Березники // Горное эхо. – 2021. – № 1 (82). – С. 95-99. – DOI: 10.7242/echo.2021.1.17.
8. Симанов А.А. Разработка методики мониторинговых гравиметрических исследований для изучения карстовых процессов // Горное эхо. – 2020. – № 2 (79). – С. 62-66. – DOI: 10.7242/echo.2020.2.12.
9. Bychkov S., Dolgal A., Simanov A. Interpretation of gravity monitoring data on geotechnical impact on the geological environment // Pure and applied geophysics. – 2021. – V. 178, № 1. – P. 107-121. – DOI: 10.1007/s00024-020-02640-8.

УДК 550.8.05

DOI:10.7242/echo.2021.4.11

### СЕЙСМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРОДУКТИВНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СОЛЯНОЙ ТОЛЩИ

А.А. Жикин

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация.** Рассмотрены особенности сейсмического моделирования условий залегания солей в зоне развития гипергенных процессов в пределах Верхнекамского месторождения. Сформирован комплекс