

8. Рихтер Я.А. Аномальная литосфера и перспективы нефтегазоносности недр Прикаспийской впадины // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 266-275. – DOI: 10.18500/1819-7663-2017-17-4-266-275.
9. Blinova T. Application of geological and geophysical data for identification of geodynamically unstable zones to the orenburg region // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM: 20th SGEM 2020, Bulgaria, Albena, 18-24 August 2020. – V. 2020, № 1.2. – P. 443-450. – DOI: 10.5593/sgem2020/1.2/s05.057.

УДК 550.834

DOI:10.7242/echo.2022.1.12

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ В РАМКАХ НЕПРОДОЛЬНЫХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЙ

В.Ю. Бобров

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Оценка применимости непродольных систем наблюдений для реализации мониторинга в условиях урбанизированных территорий возможна путем анализа интерпретационных возможностей регистрируемых с их помощью волновых полей на основе теоретического моделирования.

Ключевые слова: непродольные системы наблюдений, сейсморазведка, полномасштабное моделирование.

Города Соликамск и Березники расположены над горными выработками Верхнекамского месторождения. Промышленная разработка и добыча полезных ископаемых здесь ведется с тридцатых годов прошлого столетия. Для обеспечения безопасности как самих рудников, так и городских территорий со зданиями и инфраструктурой над отработанными территориями, необходим контроль состояния породного массива и перекрывающей толщи. Среди всех геофизических методов, направленных на изучение подобного рода объектов, наиболее информативным является сейсморазведка [1-5].

При работах на урбанизированных территориях технические возможности проведения классических сейсморазведочных работ существенно ограничены. В подобных условиях целесообразно применение непродольных систем наблюдений [6]. Данные системы организуются путем разноса линий пунктов возбуждения (ПВ) и линий пунктов приема (ПП), что позволяет проводить исследования на территориях, недоступных для прямого профилирования.

Для оценки применимости непродольных систем наблюдений применен программный пакет «Tesseral Engineering» [7]. Сформирована геологическая модель, представляющая собой четырехслойную среду с разными величинами пластовых скоростей в каждой толще (Рис. 1). Задана система наблюдений, параметры которой (Таб. 1) адаптированы для сейсмогеологических условий Верхнекамского месторождения [3, 4] и успешно применяются на практике.

На данной модели в районе 590-1050 метров и в интервале глубин 0-130 метров присутствует зона нарушения породного массива, характеризующаяся пониженными скоростями продольных и поперечных волн.

На практике при проведении сейсморазведочных работ в пределах урбанизированных территорий в связи с плотной застройкой или другими непредвиденными факторами зачастую сложно добиться оптимального постоянного разноса линии пунктов возбуждения и (или) линии пунктов приема. В связи с этим для

оценки интерпретационных возможностей непродольной системы наблюдений необходимо проанализировать изменения волновой картины при смещенных линиях пунктов возбуждения и приема на различные дистанции. Для имитации непродольности по сформированным в результате моделирования сейсмограммам с помощью программного комплекса «SPS-PC» [8] задан набор удалений ПВ от ПП (Таб. 2).

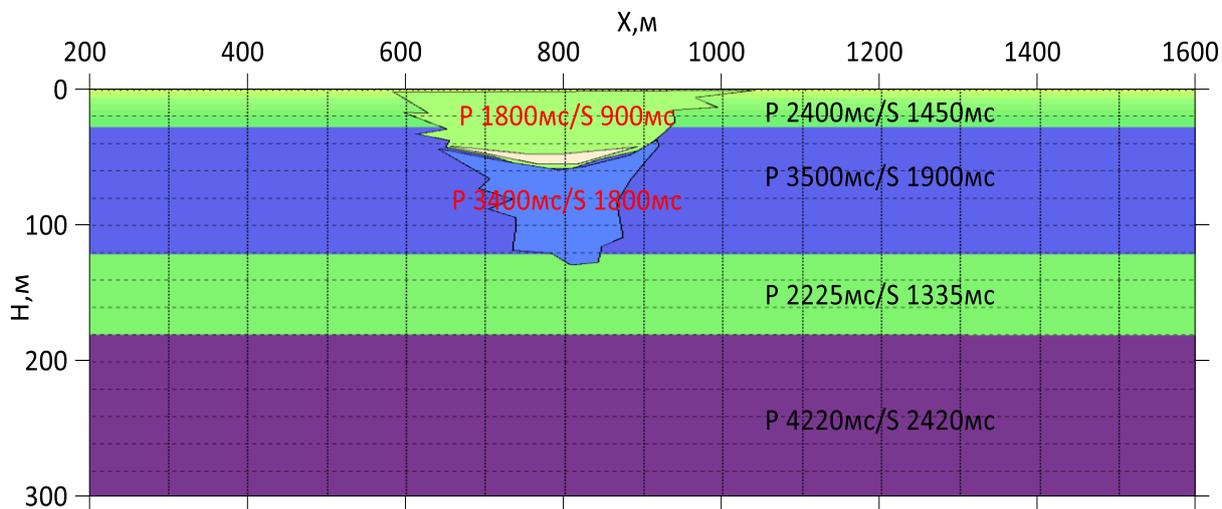


Рис. 1. Синтетическая геологическая модель

Таблица 1

Параметры системы наблюдений

Минимальное удаление ПВ от ПП (X_{min}), м	0
Максимальное удаление ПВ от ПП (X_{max}), м	504
Шаг ПП ($\Delta X_{ПП}$), м	8
Шаг ПВ ($\Delta X_{ПВ}$), м	8
Количество активных каналов	64

Таблица 2

Расстояние выноса линии возбуждения, м	X_{min} , м	X_{max} , м
0 (продольный профиль)	0	504
100	104	608
200	200	704
300	304	800
400	400	800

На полученных сейсмограммах (Рис. 2.) при отдалении линии пунктов возбуждения помимо выполаживания годографа наблюдается потеря сейсмической записи в начале сейсмограммы. Очевидна потеря информации о верхней части разреза, что вследствие этого может повлиять на интерпретационные заключения.

Размер волновой аномалии определяется искажением или отсутствием горизонтально-слоистого залегания осей симфазности. При увеличении разноса размеры аномалии увеличиваются по простиранию и уменьшаются по вертикальной составляющей:

- 0 метров: 587-982 м, глубина 262 м;
- 100 метров: 557-1000 м, глубина 250 м;
- 200 метров: 525-1062 м, глубина 160 м;
- 300 метров: 460-1150 м, глубина 157 м;
- 400 метров: 435-1221 м, глубина 146 м.

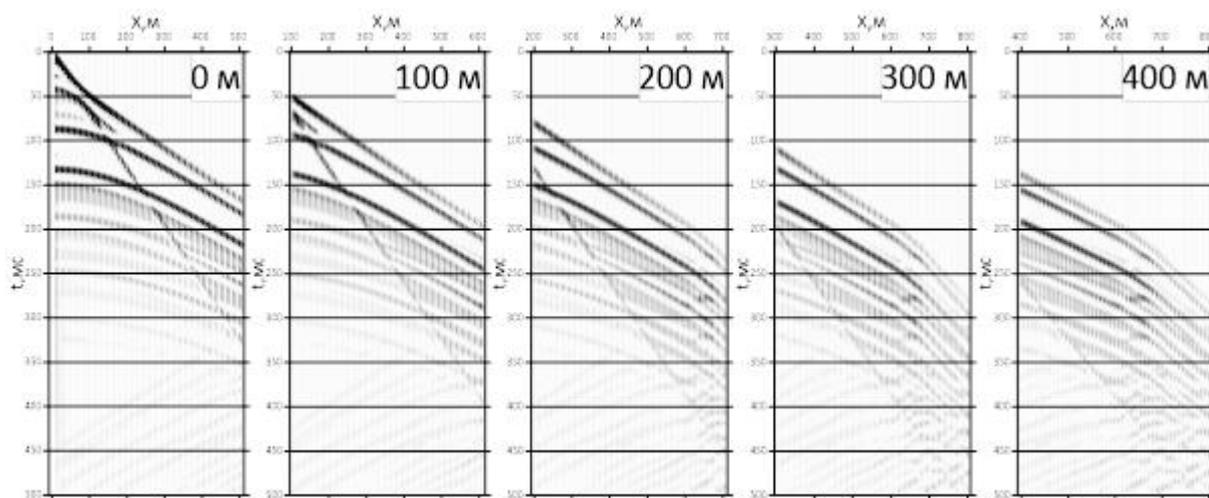


Рис. 2. Синтетические сейсмограммы полученные при разных смещениях линии возбуждения. Без предварительной цифровой обработки

С помощью программного комплекса «SPS-PC» по имеющимся сейсмограммам проведена цифровая обработка, включающая в себя пространственно-временную фильтрацию (20 – 150 Гц), ввод кинематических поправок (без автомьютинга), узкополосную линейную ФК фильтрацию по сортировке ОПВ (ширина режекции 10 Гц, скорости режекции: 250, 100, 150, 70 дс/100 трасс) (Рис. 3).

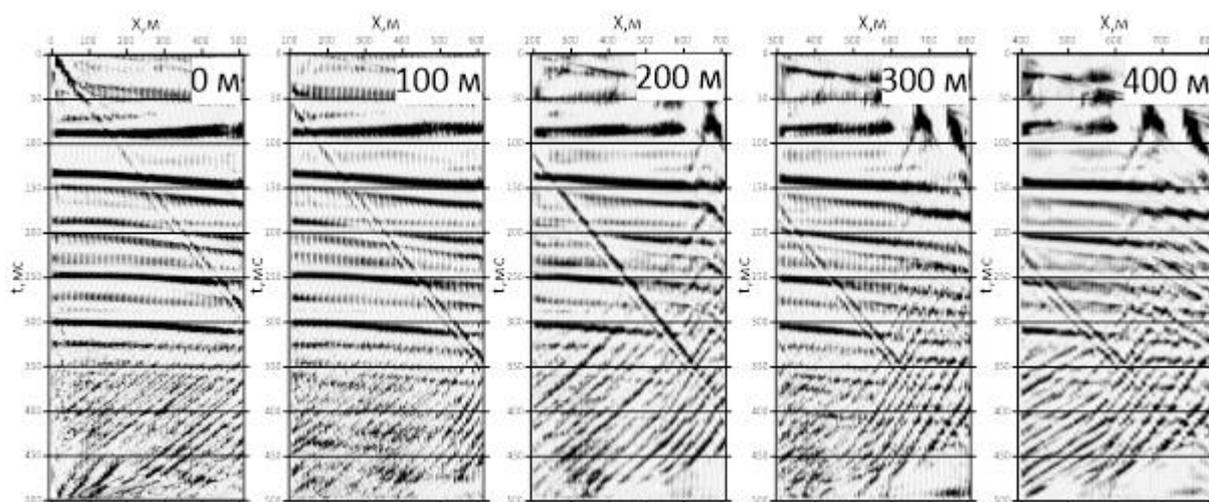


Рис. 3. Синтетические сейсмограммы после цифровой обработки

На итоговых глубинных разрезах (Рис. 4) выделяются участки с осложнениями волнового поля, связанные с влиянием зоны нарушения породного массива.

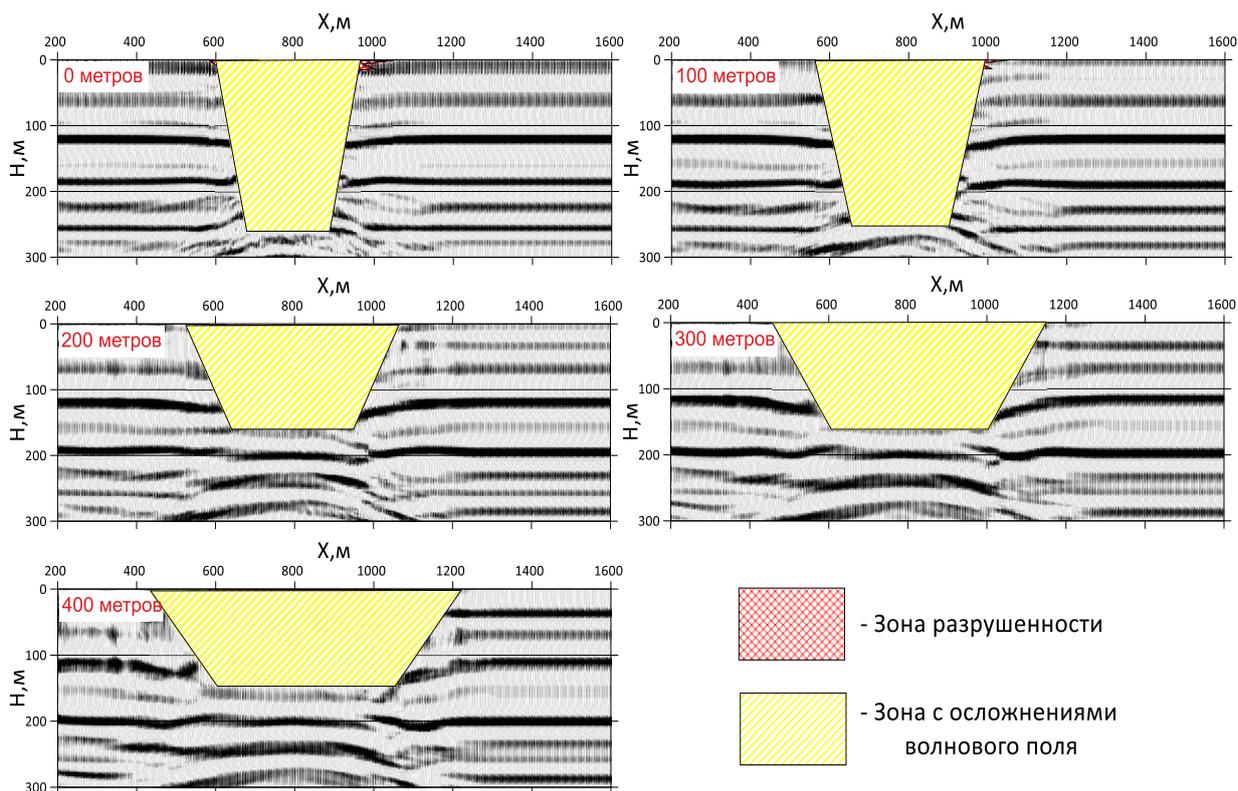


Рис. 4. Глубинные разрезы полученные при разных смещениях линии возбуждения

Для количественной оценки сходимости локализации участка с осложнениями волнового поля с зоной нарушенияности рассчитано отклонение по формуле:

$$\sigma = \frac{\text{Границы аномалии} - \text{Границы зоны нарушенияности}}{\text{Центр зоны нарушенияности}} * 100 \tag{1}$$

Также произведена корреляция размеров аномалии к зоне нарушенияности по площади (Рис. 5).

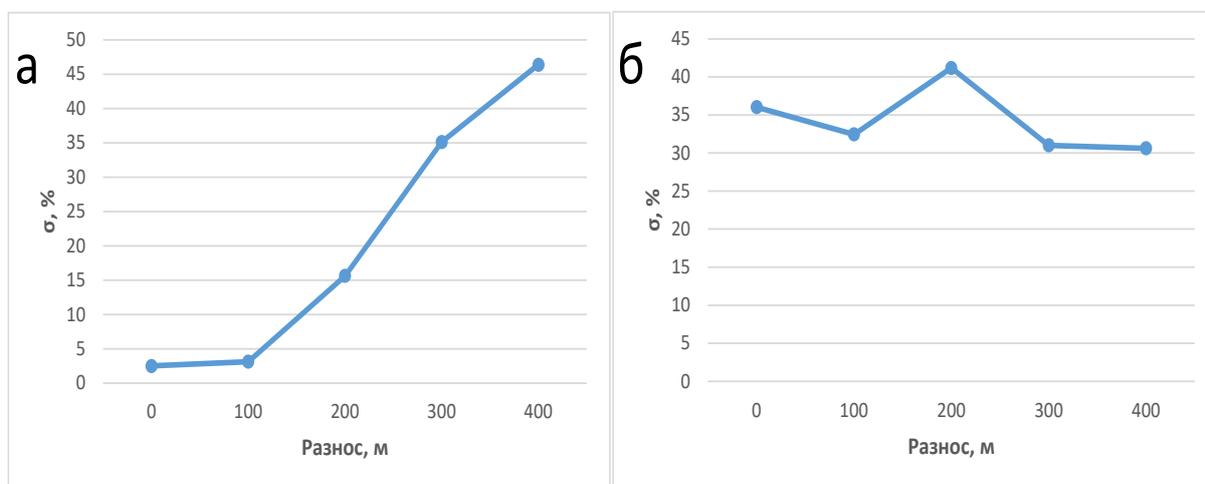


Рис. 5. а – график ошибки определения границ зоны нарушенияности;
 б – график отношения площади аномалии к площади зоны нарушенияности

Очевидно, что при увеличении разноса снижается точность определения границ зоны нарушения по простиранию (Рис. 5а). С увеличением разноса размер аномалии уменьшается по глубине, но ее площадь относительно площади нарушения менее подвержена изменениям (Рис. 5б). В данном случае разнос 100 метров является наиболее оптимальным для выделения зон нарушения в интервале глубин от 0 до 130 метров.

Интерпретационные заключения свидетельствуют о возможности применения непродольных систем наблюдений, обеспечивая достоверную информацию об особенностях распределения структурно-физических параметрах породного массива. Опираясь на результаты теоретического моделирования при интерпретации полевых данных для локализации и уточнения границ опасных участков на разных удалениях необходимо закладывать соответствующий процент погрешности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 19-45-590015 р_а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Санфиоров И.А., Ярославцев А.Г. Опыт применения сейсморазведки ОГТ для решения инженерно-геологических задач // Геофизика. – 2004. – № 3. – С. 27-30.
2. Санфиоров И.А., Ярославцев А.Г., Бабкин А.И. О результатах применения малоглубинной сейсморазведки МОГТ на территории ВКМКС // ГеоЕвразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии: тр. Междунар. геолого-геофизич. конф., 05-08 февр. 2018 г. / ООО «Центр анализа сейсмологич. данных МГУ». – М., 2018. – С. 664-668.
3. Методические рекомендации по проведению инженерно-геологических изысканий на карстоопасных территориях (на примере Пермского края) / ГИ УрО РАН, ОАО «ПНИИИС»; [сост.: Красноштейн А.Е. и др.]. – М.: ОАО «ПНИИИС», 2009. – 154 с.
4. Санфиоров И.А. Рудничные задачи сейсморазведки МОГТ / ГИ УрО РАН. – Екатеринбург, 1996. – 168 с.
5. Санфиоров И.А., Бабкин А.И., Ярославцев А.Г., Прийма Г.Ю., Фаткин К.Б. Сейсморазведочные исследования условий разработки калийной залежи // Геофизика. – 2011. – № 5. – С. 53-58.
6. Санфиоров И.А., Бобров В.Ю., Бабкин А.И., Ярославцев А.Г., Жикин А.А. Интерпретационные возможности непродольной системы наблюдений в малоглубинной и инженерной сейсморазведке // ГеоЕвразия 2019. Современные технологии изучения и освоения недр Евразии: тез. Междунар. геолого-геофизич. конф. – М., 2019. – С. 697-701.
7. Tesserat Engineering. Программное обеспечение для моделирования сейсмических данных. – Текст электронный. – URL: <https://geodevice.co/product/tesserat-engineering>. (дата обращения 12.04.2022).
8. SPS-PC. Комплекс полевой и камеральной обработки данных сейсморазведки 2D и 3D. – Текст электронный. – URL: <http://www.sps-pc.ru/opisanie-sps-pc> (дата обращения: 12. 04. 2022).

УДК 550.831

DOI:10.7242/echo.2022.1.13

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ГРАВИМЕТРИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ В г. БЕРЕЗНИКИ

С.Г. Бычков

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Выполнена оценка изменений плотности приповерхностных отложений, происходивших при оседании земной поверхности на гравиметрическом полигоне в г. Березники. Значения плотности пород верхней части разреза вычислены по данным съемок, выполненных в 2016 г. и 2020 г. Установлено, что наибольшие оседания земной поверхности в период 2016-2020 гг. происходили на участке, где в

2016 г. была зона пониженных плотностей пород. В 2020 г. на этом участке отмечаются повышенные значения плотности пород и зафиксирована положительная динамическая аномалия силы тяжести. Подтверждено ранее сделанное предположение о том, что участки повышенных оседаний, сопровождаемые увеличением величины динамической аномалии, объясняются компенсацией значений аномалий увеличением плотности пород.

Ключевые слова: гравиразведка, плотность промежуточного слоя, мониторинг, аномалия гравитационного поля, динамическая гравитационная аномалия, провал земной поверхности.

В 2016 г. вблизи провалов земной поверхности на территории г. Березники был создан полигон, на котором ежегодно до 2020 г. проводились измерения гравитационного и высот гравиметрических пунктов [4].

По результатам наблюдений установлено, что наиболее интенсивные оседания земной поверхности происходили в период с 2018 по 2019 гг. (рис. 1). В этот же период фиксировались экстремальные уменьшения значений силы тяжести – отрицательные динамические аномалии. В период с 2019 по 2020 г. интенсивность оседаний уменьшилась и произошла инверсия динамических аномалий силы тяжести: в зоне наибольших оседаний в юго-западной части полигона значения силы тяжести увеличились. Было высказано предположение о том, что участки повышенных оседаний, сопровождаемые увеличением величины динамической аномалии, объясняются компенсацией значений аномалий увеличением плотности пород вследствие оседаний земной поверхности [2]. В данной работе выполнена оценка изменения плотности приповерхностных отложений по материалам гравиметрических съемок, проведенных в разные годы на данном полигоне.

В гравиразведке существует несколько способов определения плотности пород верхней части разреза, которые основаны на зависимости наблюдаемых значений силы тяжести от формы поверхности рельефа местности [1, 3]. Наибольшее распространение имеют способы решения системы линейных уравнений относительно плотности σ (точные способы):

$$0.0419 h_i \sigma_i = g_i + 0.3086 h_i, \quad (1)$$

где h_i и g_i – соответственно высоты и наблюдаемые значения силы тяжести в гравиметрических пунктах, 0.3086 и 0.0419 – коэффициенты поправок Фая (нормальный вертикальный градиент) и Буге (промежуточный слой). Если использовать наблюдаемые значения поля и высоты в N пунктах на профиле или площади, то получим:

$$\sigma_i = 7.365 + \frac{\Delta^{N-1} g_i}{0.0419 \Delta^{N-1} h_i}, \quad (2)$$

где Δ^{N-1} – конечная разность $N-1$ порядка (например, при $N=3$: $\Delta^2 g_i = g_{i-1} - 2g_i + g_{i+1}$). Двухточечный вариант этой формулы используется при наблюдениях на участках рельефа, имеющих форму обрыва или близкую к ней. Трехточечная формула более точные результаты дает для выпуклых (типа холма) или вогнутых форм рельефа.

Выражение (1) предполагает, что гравитационное поле в интервале N пунктов создается только одним источником – слоем, заключенным между высотами пунктов наблюдений и уровнем относимости (уровень моря или уровень нижней отметки рельефа). В нашем случае это допущение несущественно, поскольку при расстоянии между гравиметрическими пунктами на полигоне 30-50 м, глубинные источники аномалий (на уровне кровли соляной толщи и ниже) создают плавно меняющийся региональный фон.

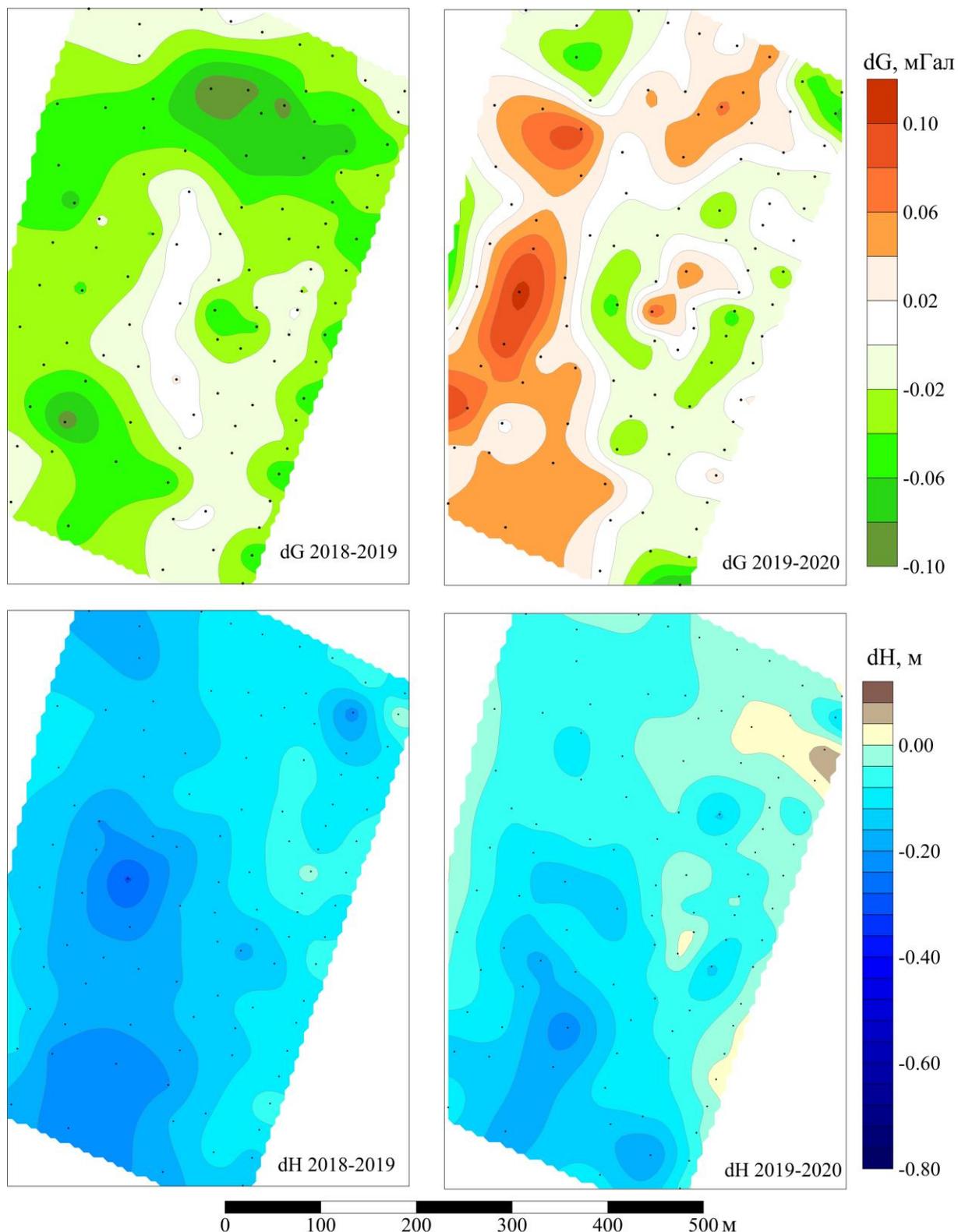


Рис. 1. Изменения аномалий силы тяжести и высот пунктов на гравиметрическом полигоне в периоды 2018-2019 гг. и 2019-2020 гг.

Основные погрешности формулы (2) связаны с тем, что в знаменателе находятся разности высот пунктов и для надежного определения плотности необходимы значительные превышения рельефа. В нашем случае при наблюдениях в черте города, диапазон высот на пунктах полигона не превышает 15 м. Для повышения надежно-

сти вычислений использован способ, предложенный в работе [5], который сводится к следующему:

- отбраковка значений, где превышения рельефа меньше заданной величины (в нашем случае 1 м);
- применение критерия тройного стандартного отклонения при отбраковке;
- интерполяция и осреднение в скользящем окне при построении регулярной сетки;
- минимизация корреляции аномалий силы тяжести с рельефом.

Плотности пород вычислены для съемок, выполненных в начале и конце работ на полигоне, т.е. используя наблюдаемые значения силы тяжести и высоты пунктов, измеренные в 2016 и 2020 гг. (рис. 2).

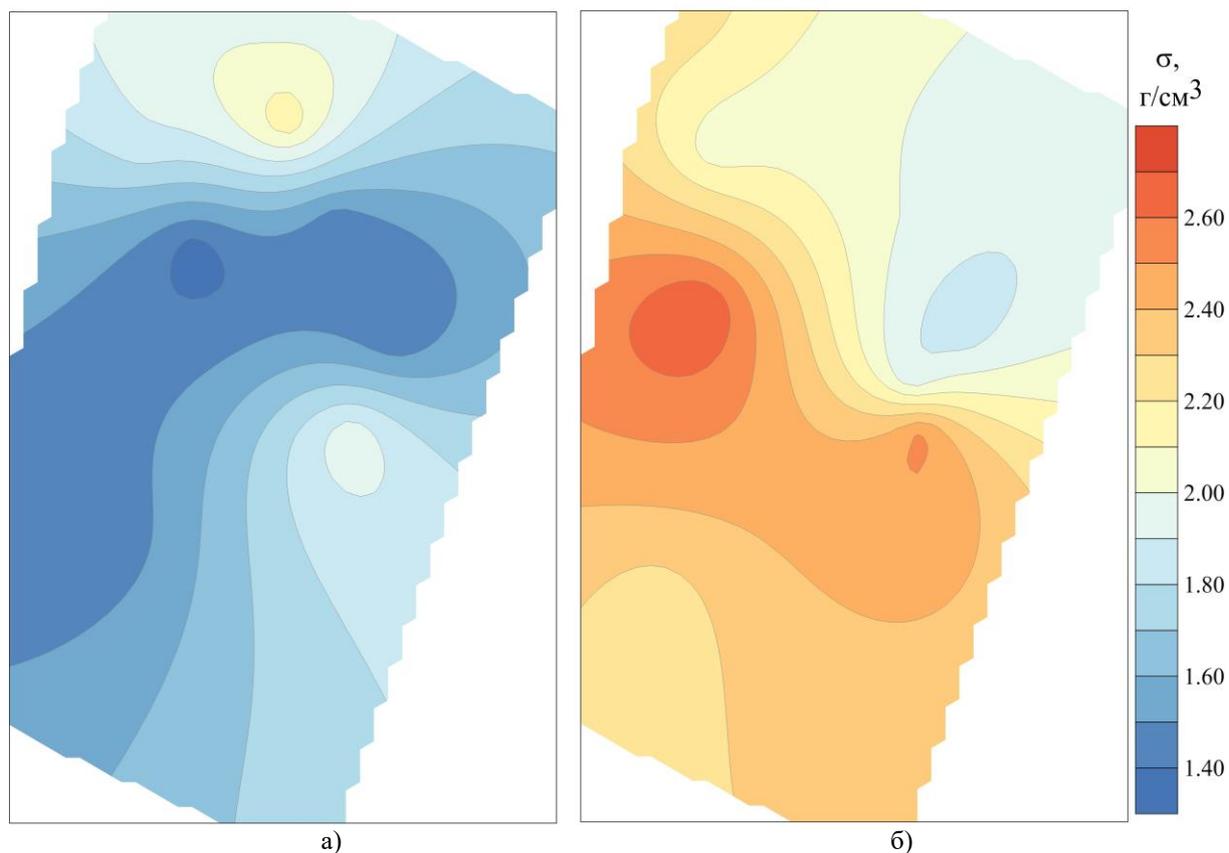


Рис. 2. Плотности пород, вычисленные для гравиметрических съемок 2016 г. (а) и 2020 г. (б)

Как видно из рисунка, минимальные плотности приповерхностных пород в 2016 г. находились в юго-западной части полигона. Здесь же в период до 2019 г. происходили наиболее интенсивные оседания земной поверхности (см. рис. 1), т.е. оседания происходили на участке, где изначально была разуплотненная зона. В 2020 г. на этом участке отмечаются повышенные значения плотности пород и зафиксирована положительная динамическая аномалия силы тяжести. Можно предположить, что процесс разуплотнения или размывания горных пород в нижней части разреза замедляется и происходит процесс уплотнения приповерхностных отложений, что обуславливает увеличение значений силы тяжести.

Таким образом, на основании анализа локальных и динамических аномалий силы тяжести, процесса оседаний земной поверхности и результатов вычисления плотности приповерхностных отложений можно сделать следующие основные выводы.

1. Наиболее интенсивные оседания земной поверхности происходят на участках пониженной плотности горных пород, т.е. в природных разуплотненных зонах. Эти зоны отчетливо фиксируются локальными отрицательными аномалиями силы тяжести.

2. Продолжение процесса разуплотнения определяется по данным гравиметрического мониторинга отрицательными динамическими аномалиями силы тяжести. По плановому совпадению локальных отрицательных аномалий и отрицательных динамических аномалий силы тяжести можно прогнозировать участки опасных геологических процессов.

3. Участки повышенных оседаний, сопровождаемые увеличением величины динамической аномалии, объясняются компенсацией значений аномалий уплотнением пород верхней части разреза, что свидетельствует о замедлении или прекращении процесса разуплотнения пород.

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. Березкин В.М. Учет влияния рельефа местности и промежуточного слоя при детальной гравиразведке. – М.: Недра, 1967. – 117 с.
2. Бычков С.Г. Результаты мониторинговых гравиметрических наблюдений на Верхнекамском месторождении калийных солей // Горное эхо. – 2021. – № 4. – С. 45-50. – DOI 10.7242/echo.2021.4.10.
3. Варламов А.С., Филатов В.Г. Определение плотности горных пород и геологических объектов. – М.: Недра, 1983. – 216 с.: ил.
4. 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.
5. Шелихов А.П. Использование статистического подхода для вычисления аномалий Буге с переменной плотностью промежуточного слоя // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 48-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского – В.Н. Стратова / ВСЕГЕИ, Санкт-Петербургский горн. ун-т. – СПб., 2022. – С. 271-274.

УДК 550.834.05

DOI:10.7242/echo.2022.1.14

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА НА ПОДРАБОТАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

И.Ю. Герасимова

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В рамках изучения свойств верхней части разреза для одного из шахтных полей Верхнекамского месторождения калийных солей сформированы карты статических поправок и скоростей распространения упругих колебаний до уровня приведения, выделены низкоскоростные участки.

Ключевые слова: верхняя часть разреза, статические поправки, Верхнекамское месторождение калийных и магниевых солей, малоглубинная сейсморазведка.

Одной из стандартных процедур обработки и интерпретации данных малоглубинной сейсморазведки является процесс определения и учета априорных статических поправок. При малоглубинных исследованиях, используемых для изучения строения разреза