

XXVI Уральская молодежная научная школа по геофизике

АНАЛИЗ ГРАВИТАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ МОДЕЛЕЙ АСТРОБЛЕМ

Автор: *Ситникова Екатерина Алексеевна,*

Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: Доц., к.т.н. Кузнецов Кирилл Михайлович

Пермь, 2025

Цели и задачи

С современным развитием технологий задача изучения строения Луны и Марса остаётся актуальной и на сегодняшний день. При этом их геофизическая изученность остаётся слабой, а единственным полем, информация о котором представлена на всю площадь Луны или Марса является гравитационное.

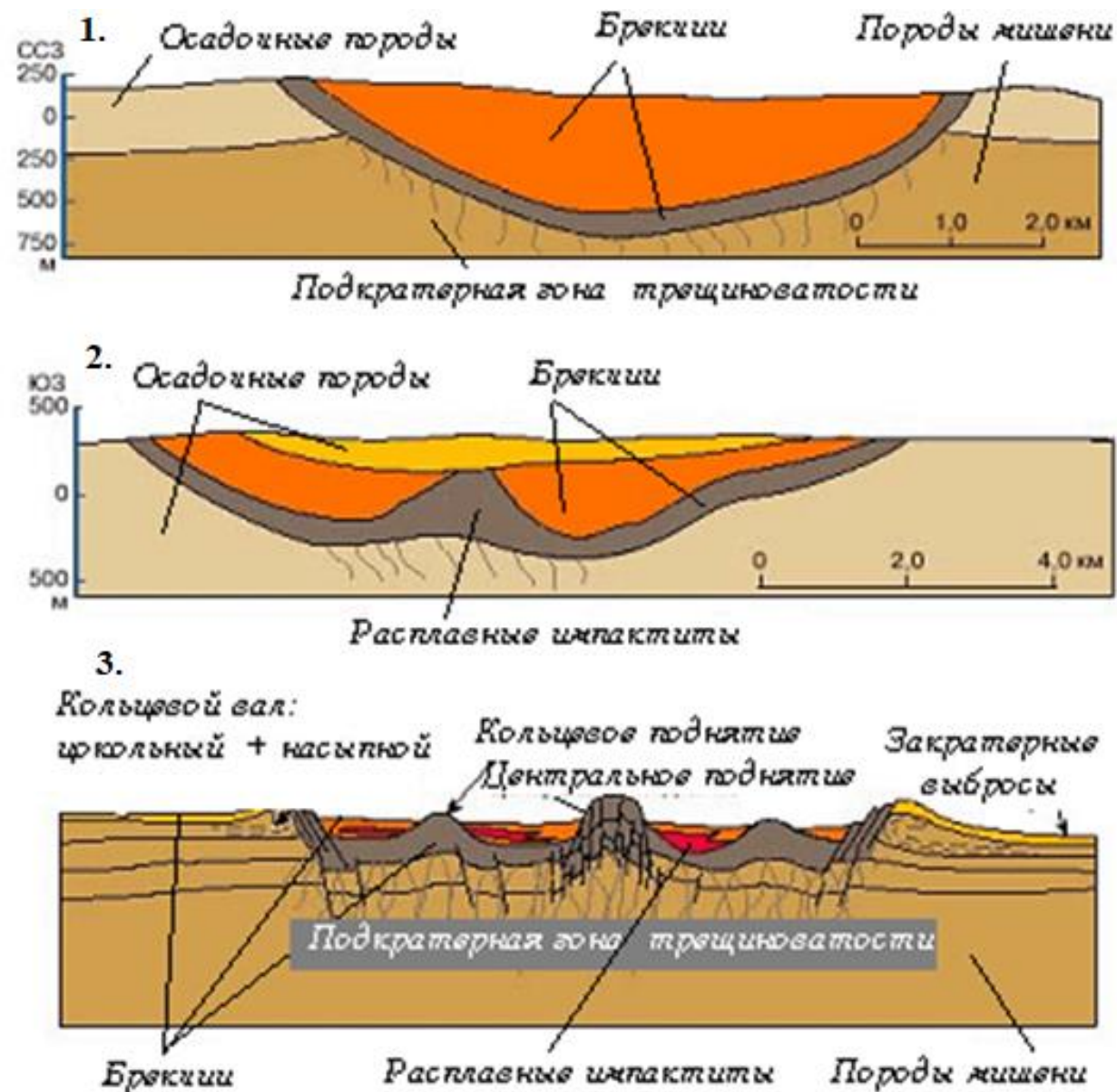
Гравитационные поля Луны и Марса сильно осложнены изометричными аномалиями, природа которых может быть связана с **астроблемами**. Для анализа поля, с целью изучения глубинного строения небесных тел, необходимо разработать подходы, позволяющие исключить из гравитационного поля такие аномалии.

Цель: разработать подход к построению моделей астроблем по аномалиям силы тяжести.

Задачи:

- 1) Создание физико-геологических (ФГМ) моделей астроблем;
- 2) Расчет гравитационных эффектов двухмерных и трехмерных моделей (ПО GravMagInv2D и GravMagInv3D) и их анализ;
- 3) Создание модели маскона Гримальди (Grimaldi) Луны.

Прототипы построенных моделей

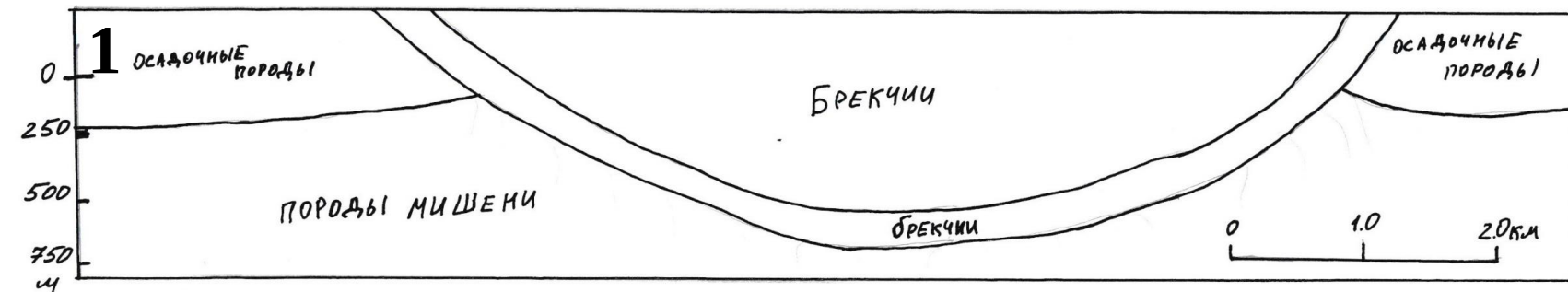


По классификации в работе Белюстовых* выделены 3 типа астроблем:

1. Небольшие (обычно диаметром до 3–4 км) астроблемы имеют простую **чашеобразную форму**. Их глубина составляет около трети диаметра.
2. При больших диаметрах **в центре кратера возникает поднятие** (центральная горка) благодаря упругой отдаче пород мишени в области их максимального сжатия.
3. При диаметре воронки более 14–15 км **появляются кольцевые поднятия**. Иногда в кратере наблюдаются и центральное, и кольцевое поднятия одновременно.

*В.Н.Белюстов, И.В.Белюстова, Журнал «Физика»: «Астроблемы – звёздные раны Земли», 1999

Построенные модели астроблем



На основании моделей из статьи созданы 4 модели:

1: простая чашеобразная форма;



2: кратер с центральным поднятием;

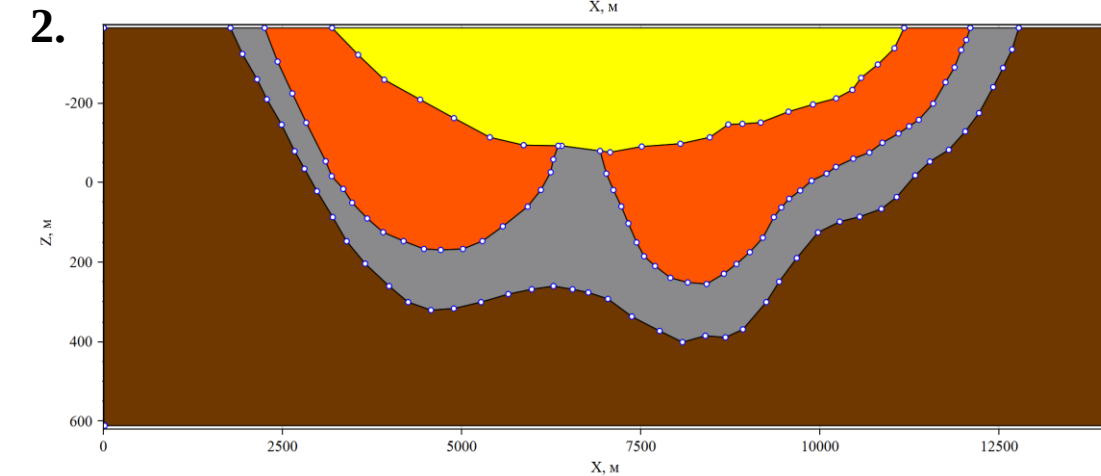
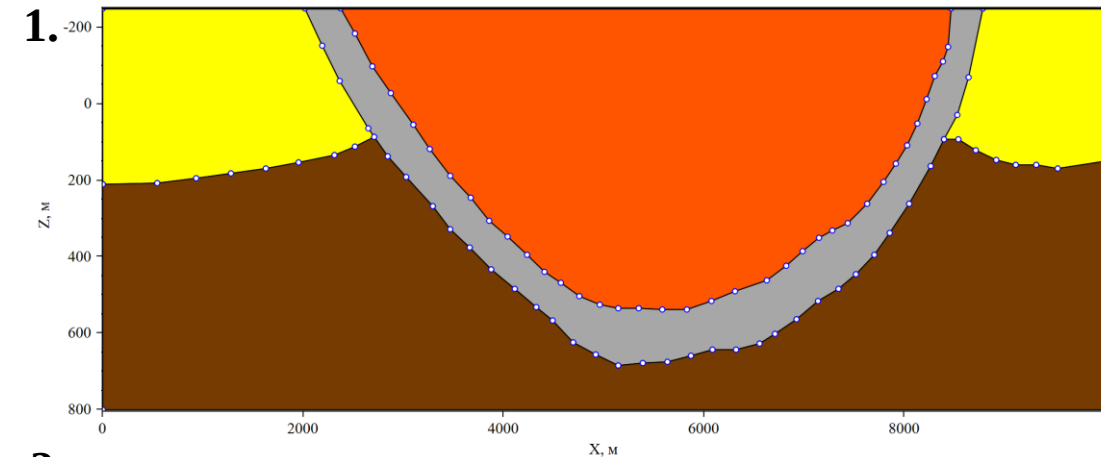


3: усложнённая модель с центральным поднятием и телами импактитов;

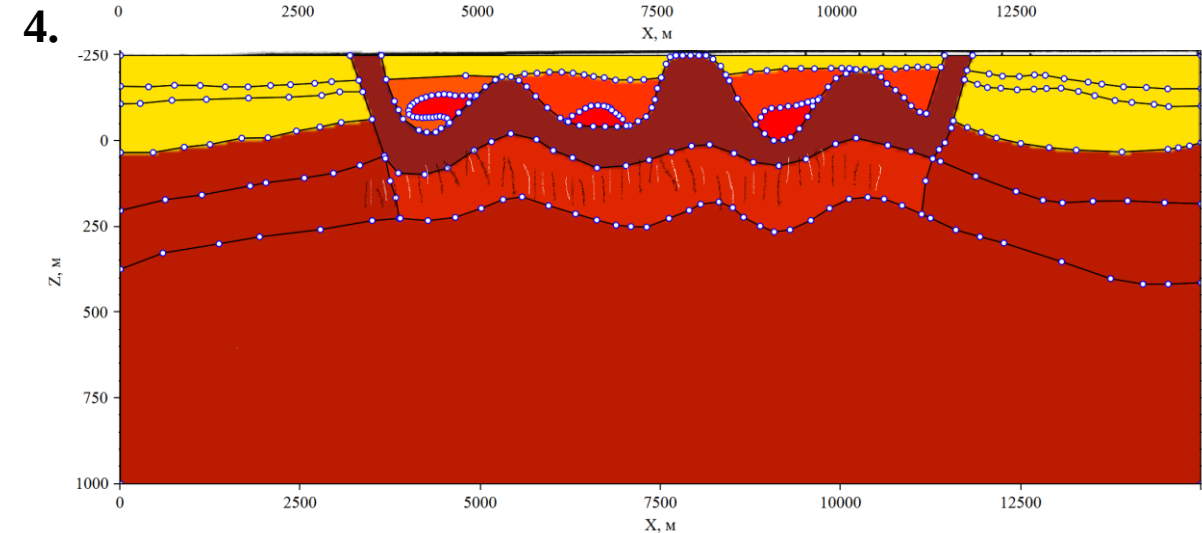
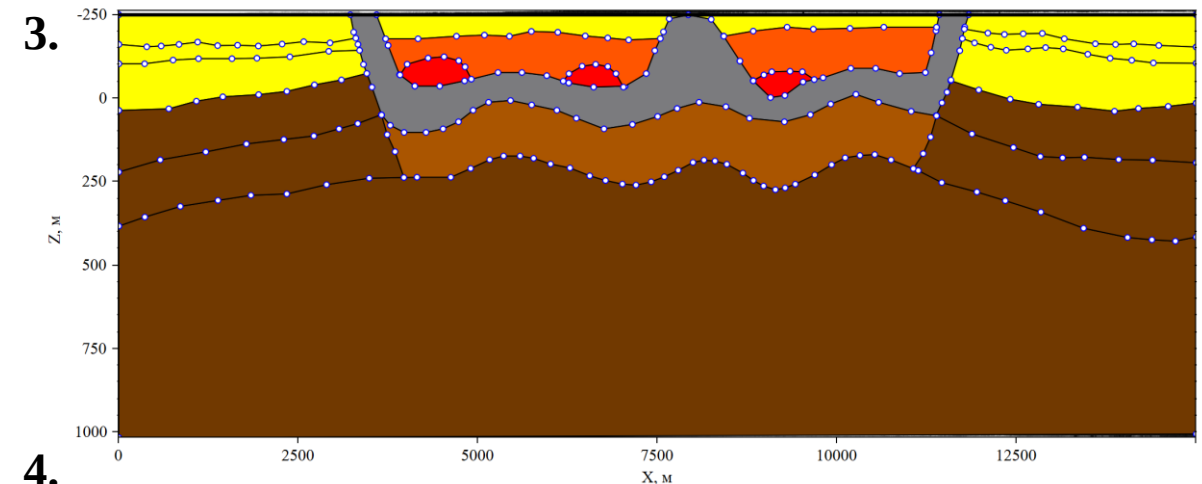
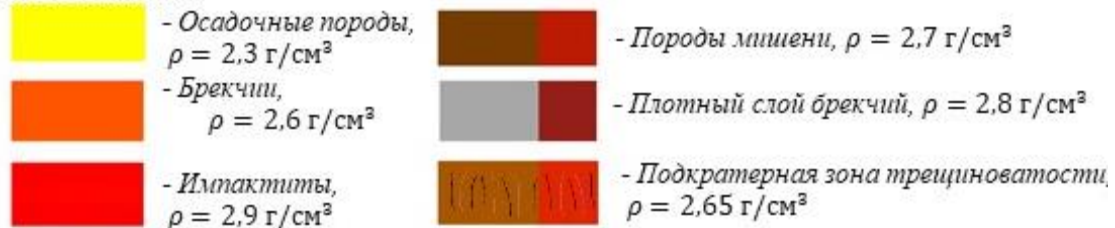
4: к модели 3 добавлены кольцевые поднятия.

Созданные модели (1. – 4.) дополнены плотностными характеристиками

Карской астроблемы

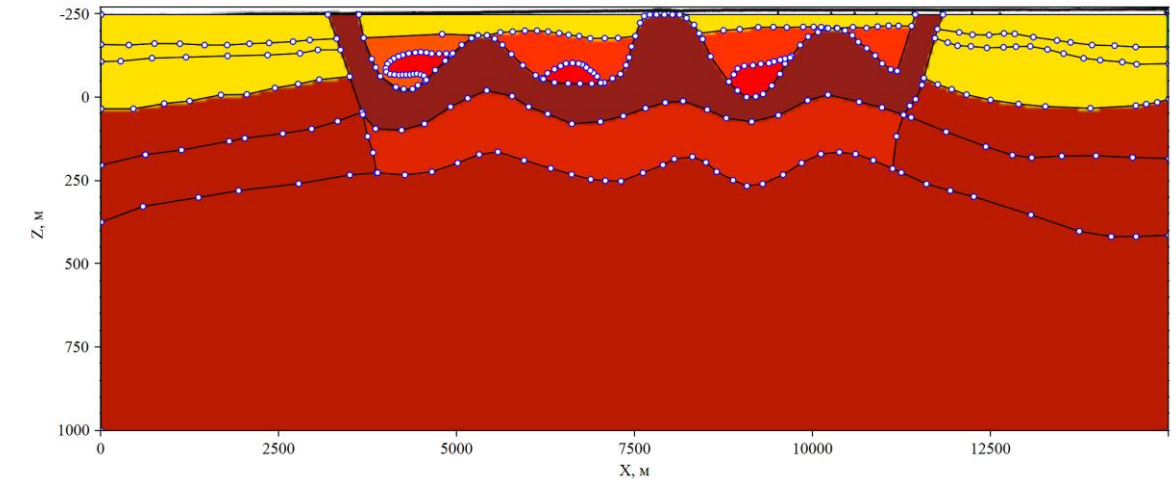
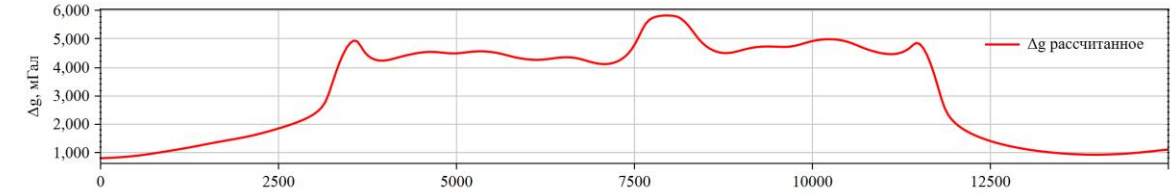
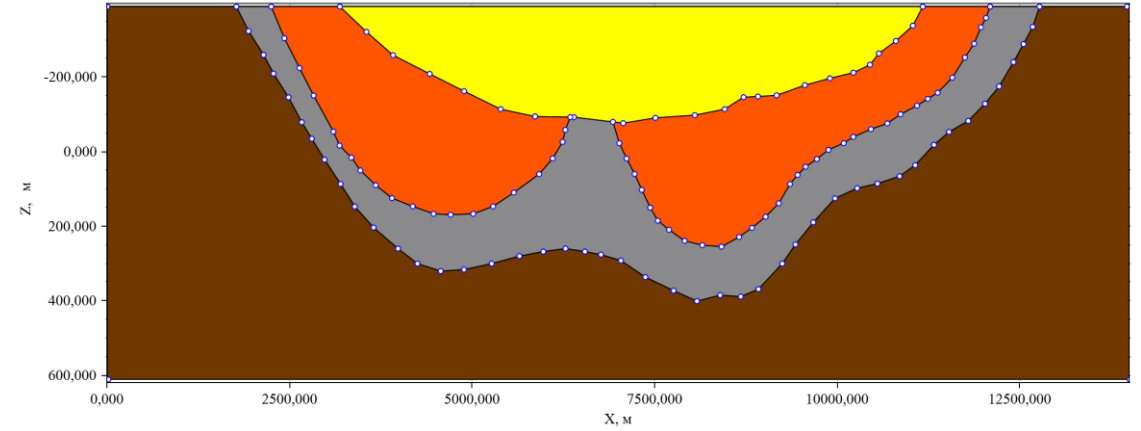
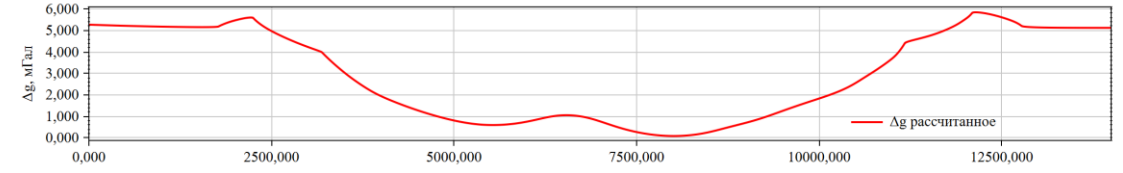
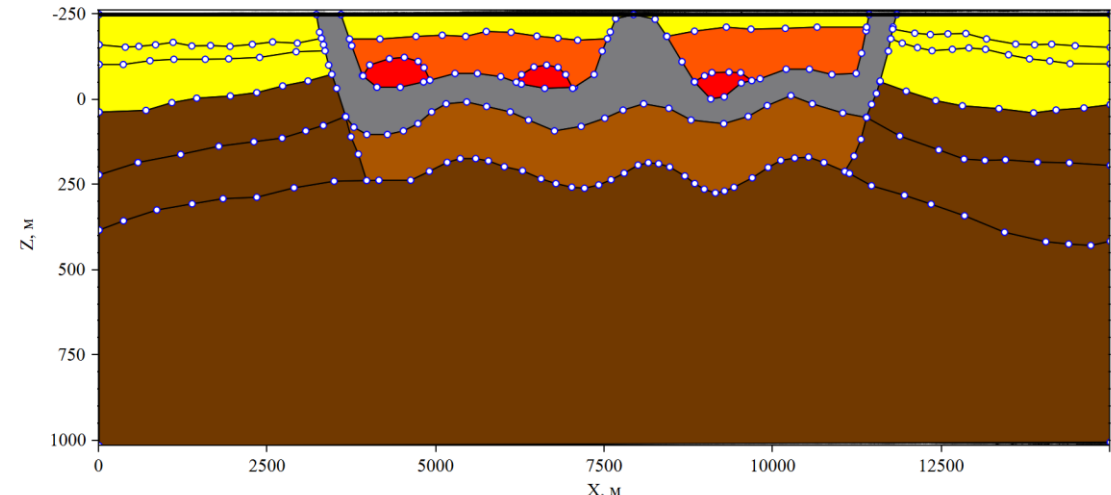
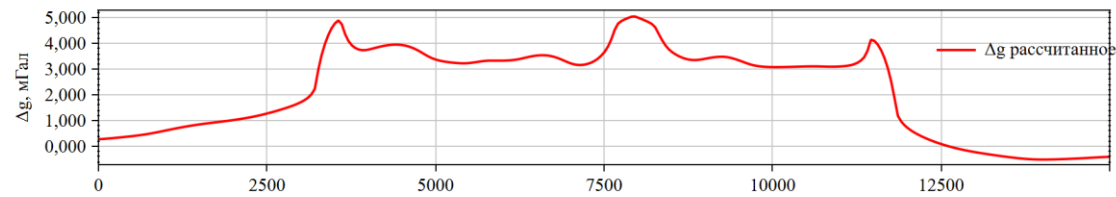
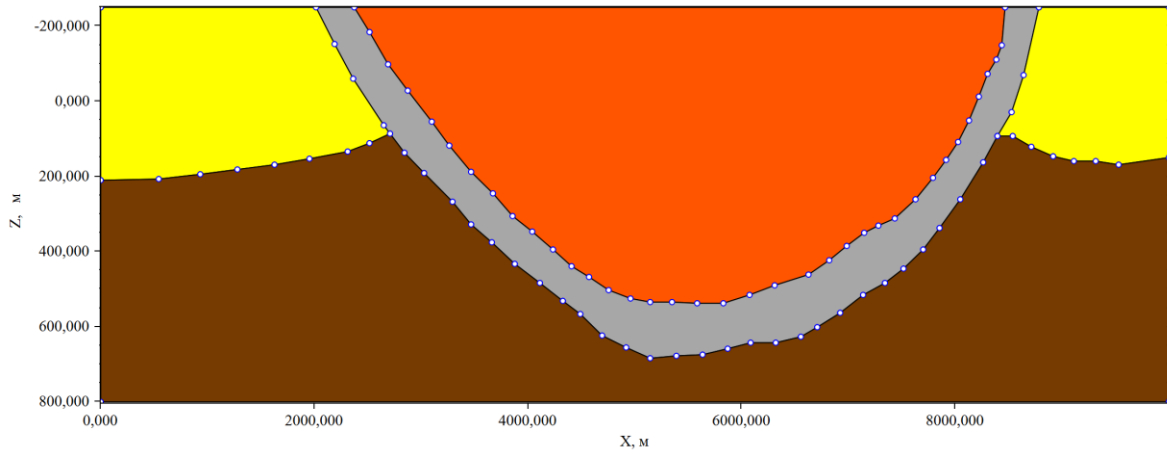
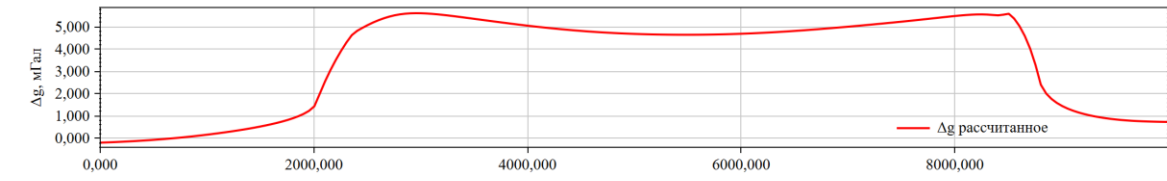


Условные обозначения:



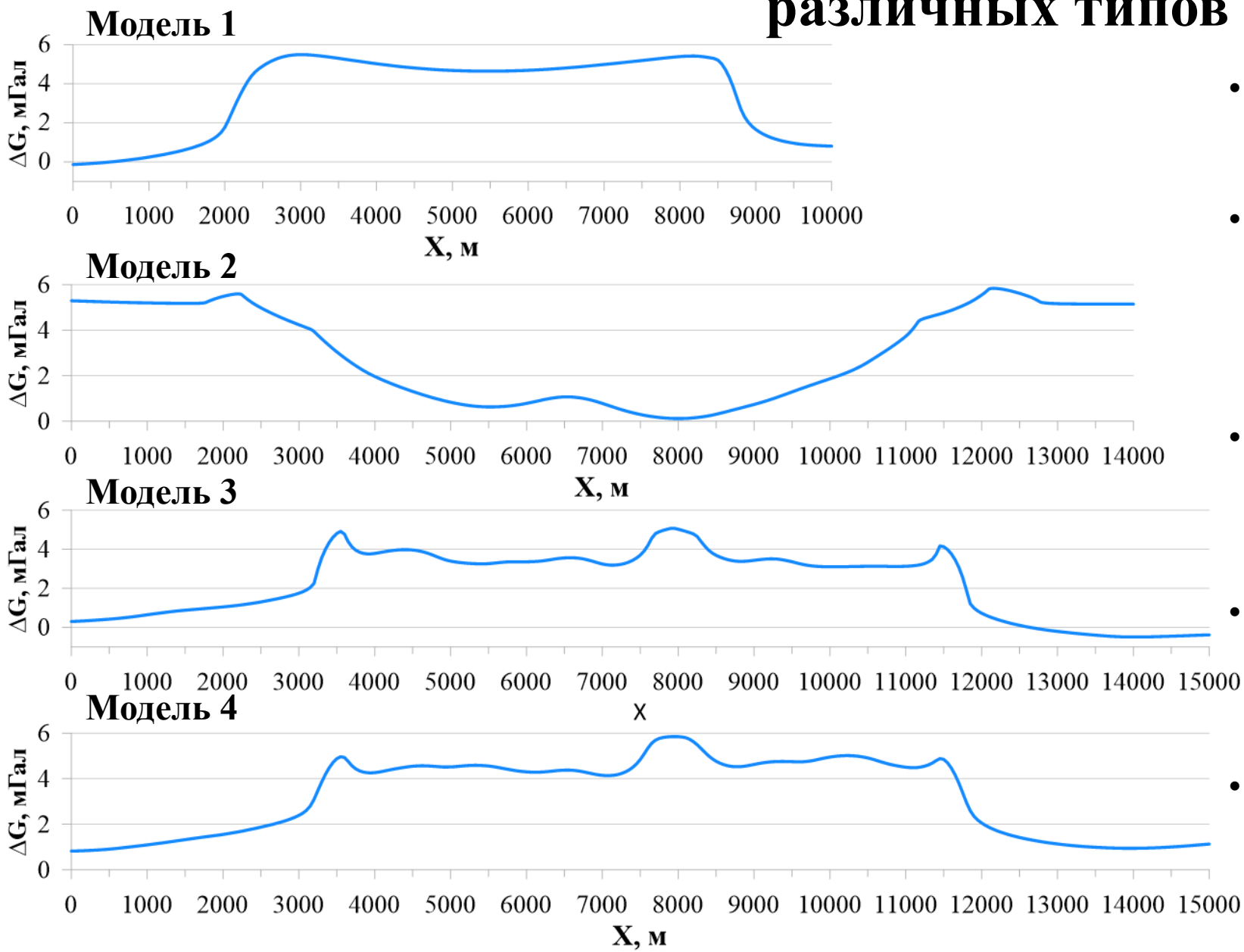
* Зархидзе Д.В., Пискун П.П., Красножен А.С. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Издание второе. Серия Вайгачско-Пайхойская. Листы R-41-XXVIII, XXIX (Усть-Кара). Объяснительная записка. – М.: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2017. 180 с.

Рассчитаны гравитационные эффекты 4 моделей астроблем



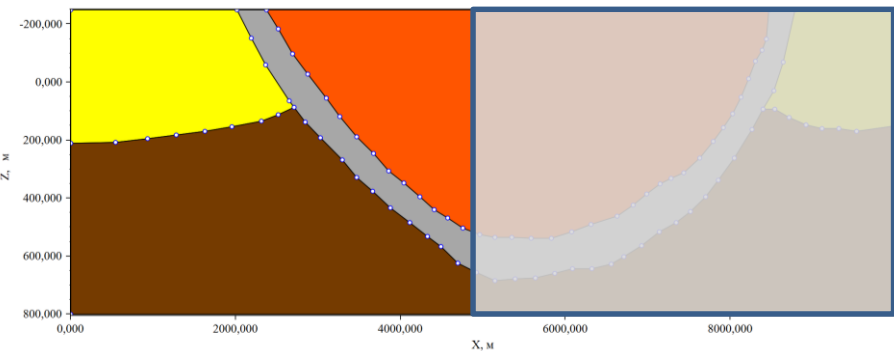
Гравитационные эффекты двухмерных моделей астроблем

различных типов

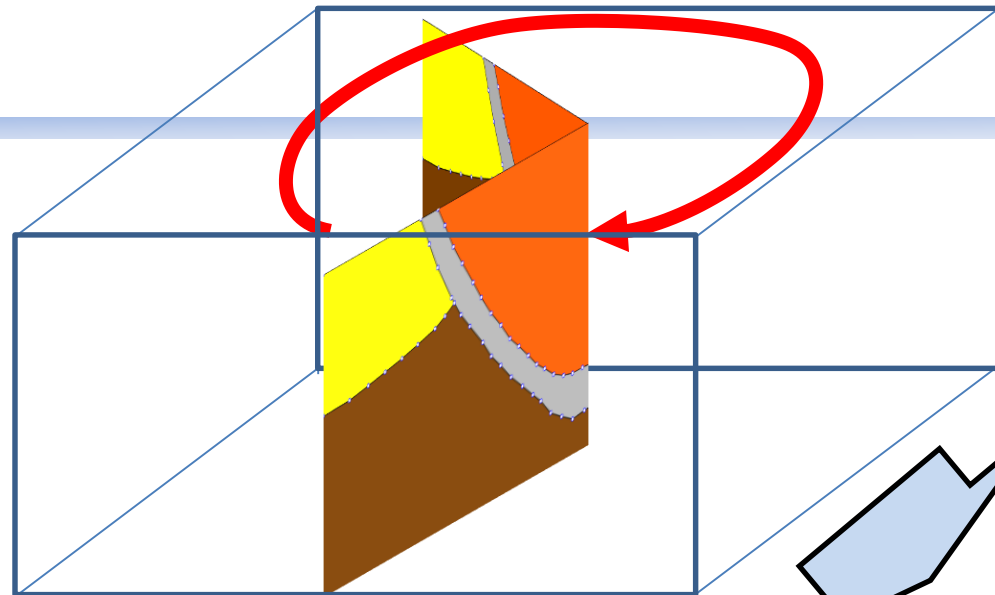


- Амплитуды аномалий всех моделей сопоставимы и составляют порядка 5 мГал;
- Общее тело астроблем проявляется в виде положительной аномалии силы тяжести, которая приурочена к слою плотных пород, отражающих ударный фронт;
- В случае наличия осадочного чехла, в месте залегания которого возникает отрицательная избыточная плотность, наблюдается отрицательная аномалия;
- Для моделей 2, 3, 4 в поле проявлено центральное поднятие положительной аномалией, амплитудой порядка 2 мГал.
- В поле модели 4 проявлены положительные аномалии от кольцевых поднятий.

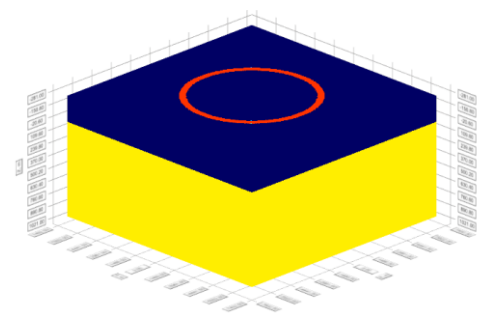
Создание 3D моделей



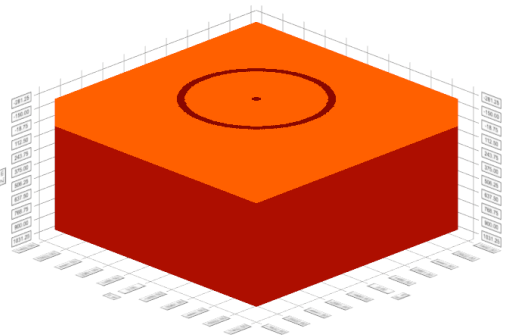
1. Разделение двухмерной модели пополам



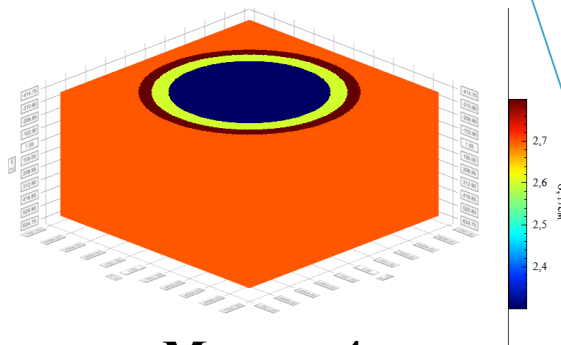
2. Вращение вокруг вертикальной оси в ПО GravMagInv3D



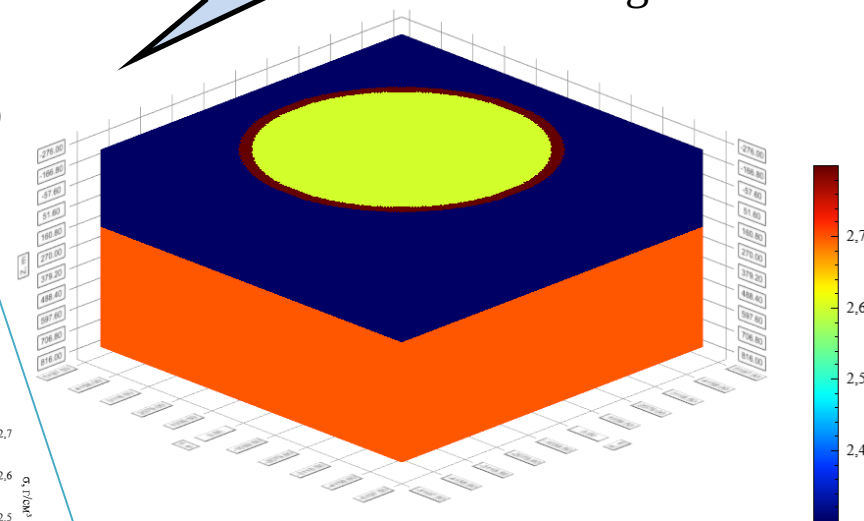
Модель 2



Модель 3



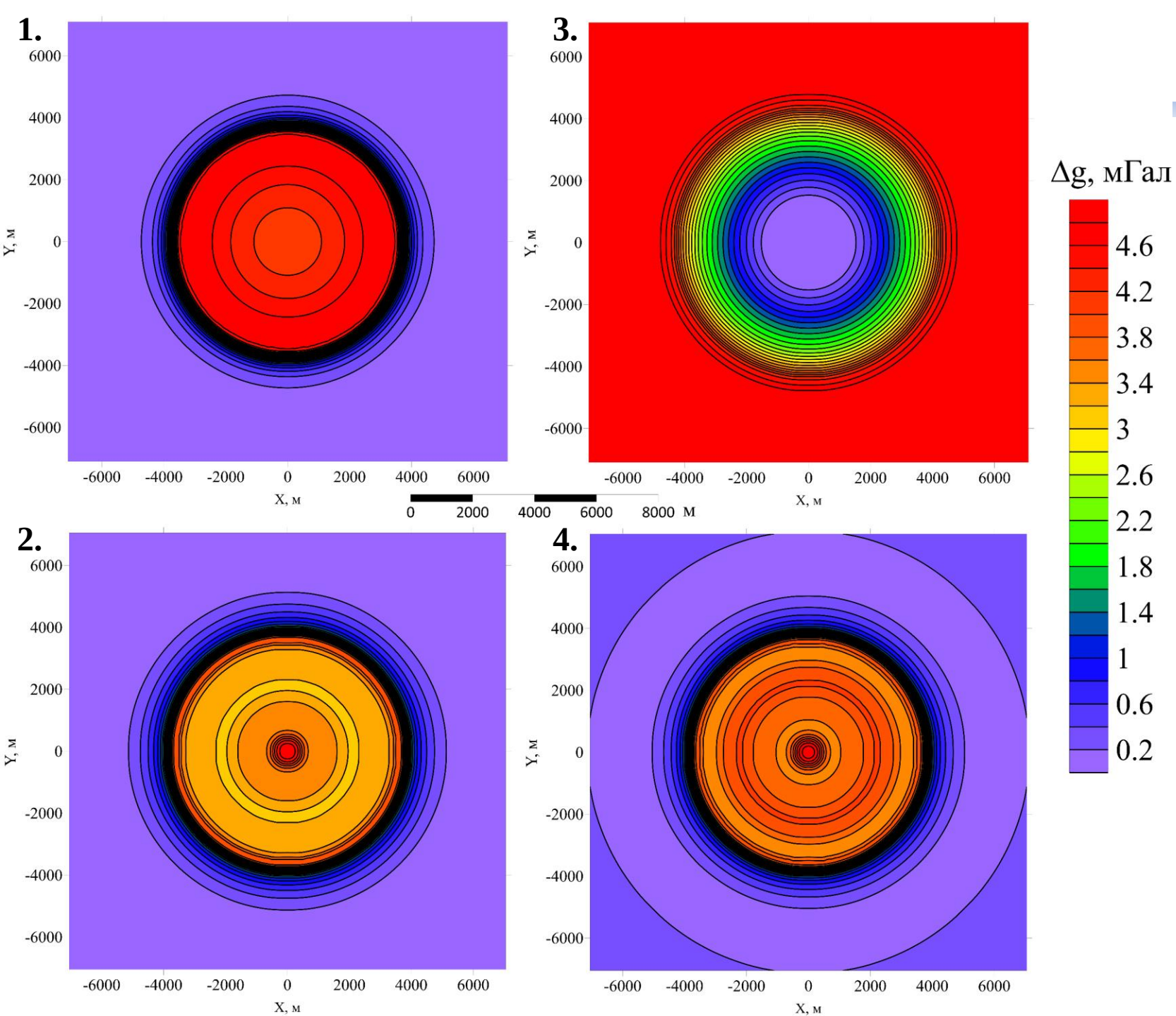
Модель 4



Модель 1

3. Получаем плотностную 3D модель

Гравитационные эффекты трёхмерных моделей астроблем

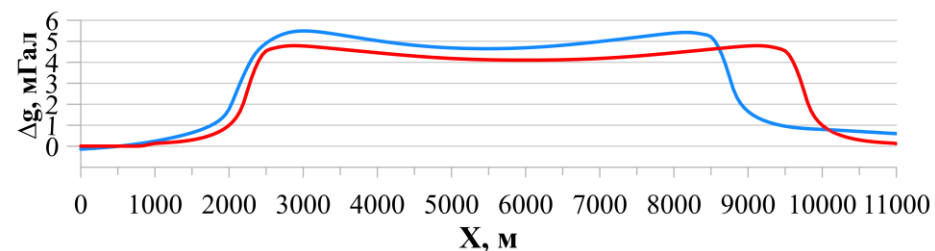


- Кольцевые структуры астроблем проявляются зонами с различными горизонтальными градиентами гравитационного поля.
- Для моделей 1, 3 и 4 в областях, где плотные породы (слой плотных брекчий) расположены у дневной поверхности, изолинии поля сгущаются.
- На моделях 3 и 4 в областях, приуроченных к центральным поднятиям, изолинии также сгущаются. То же можно сказать про кольцевые поднятия для модели 4, однако в этом случае градиент выражен слабее.
- На модели 2 центральное поднятие, перекрытое осадочным чехлом, не проявляется.

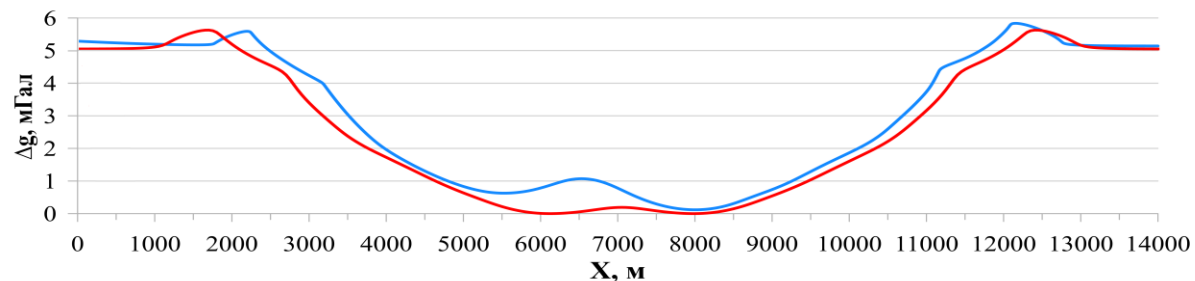
Сопоставление эффектов 2D и 3D моделей



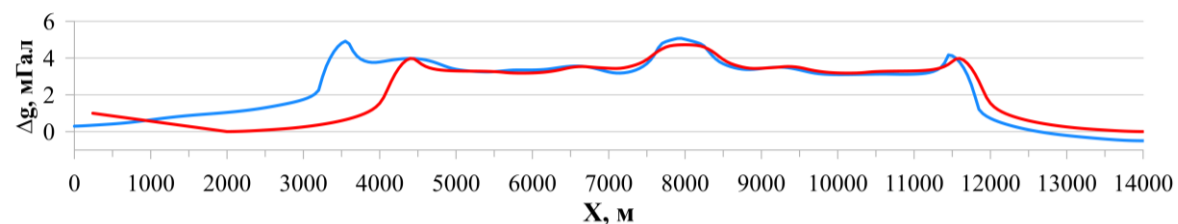
Модель 1



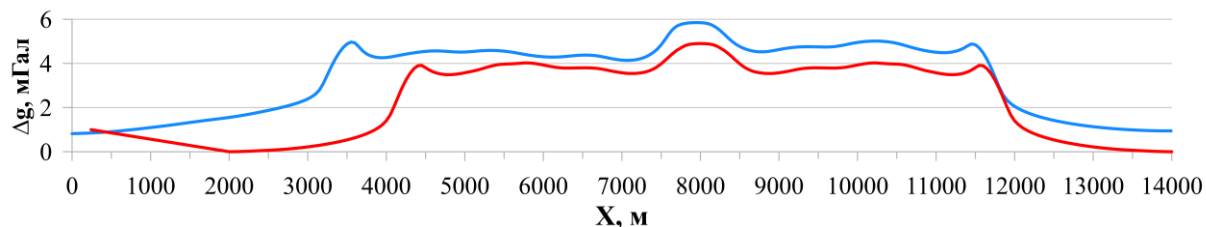
Модель 2



Модель 3



Модель 4



Вывод:

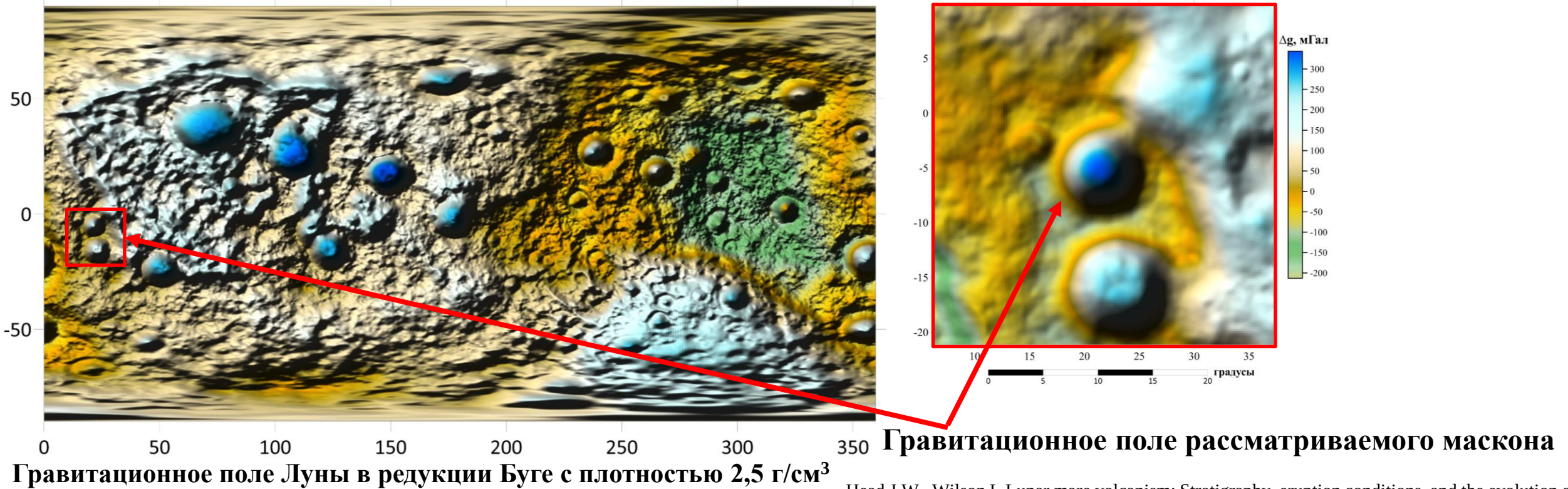
Форма аномалий и их амплитуда не меняются от размерности (2D или 3D) модели.

Амплитуду расходятся не более чем на 15 %.

Это позволяет начинать анализ полей силы тяжести астроблем с построения 2D моделей.

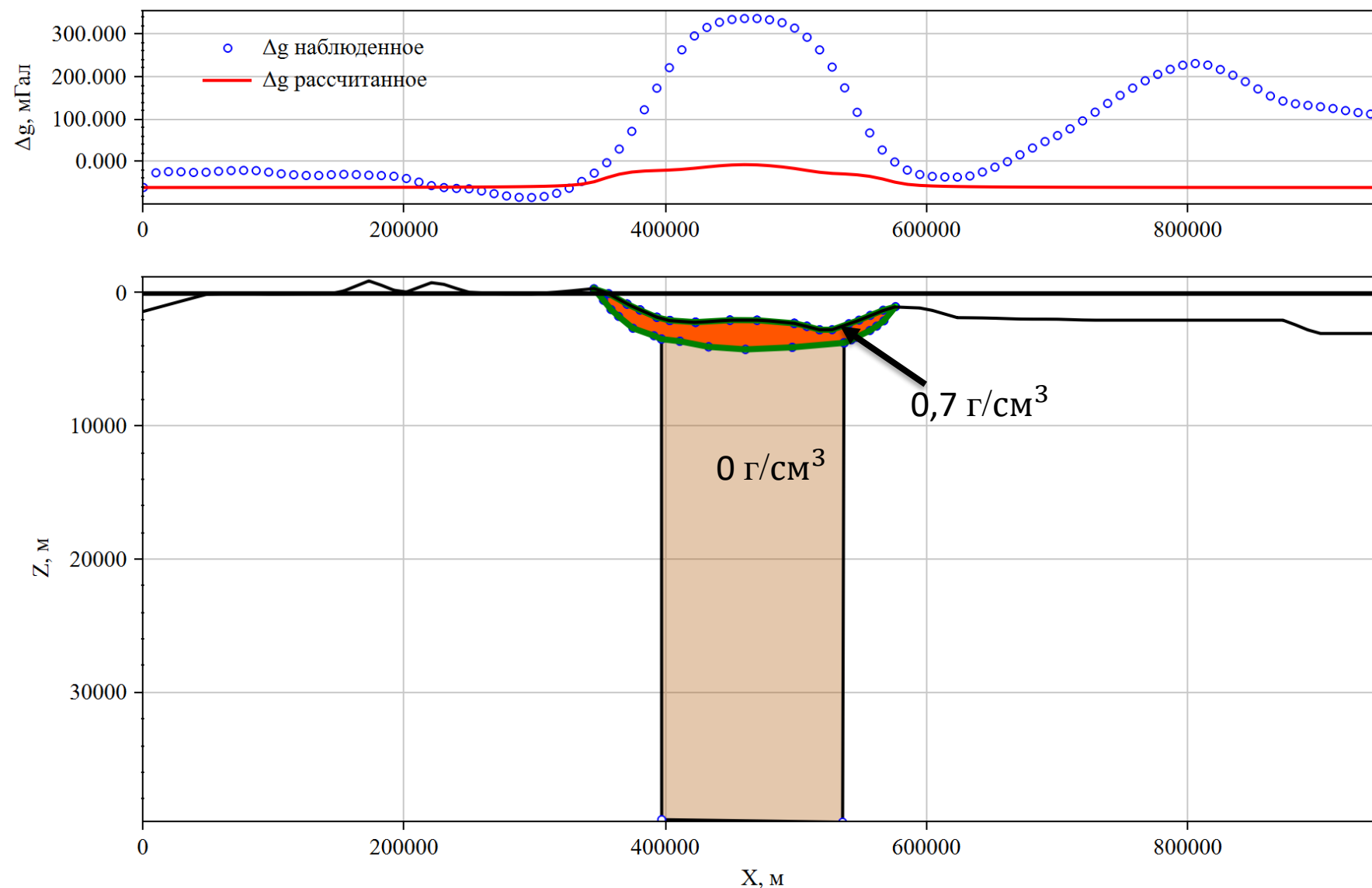
Маскон Гримальди (Grimaldi)

В гравитационном поле Луны проявлены интенсивные изометричные аномалии силы тяжести (амплитудой до 250 мГал), называемые масконами (от англ. mass concentration – концентрация масс). Чаще всего масконы расположены под лунными морями, имеющими округлую форму и заполненными базальтами. Ряд исследователей полагают, что масконы являются результатом крупных ударных событий и последующего заполнения образовавшихся бассейнов плотным базальтовым материалом на ранних этапах истории Луны. [Head, 1992]



Head J.W., Wilson L. Lunar mare volcanism: Stratigraphy, eruption conditions, and the evolution of secondary crusts, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Volume 56, Issue 6, 1992, Pages 2155-2175. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90183-J](https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90183-J).

Гравитационный эффект базальтового бассейна

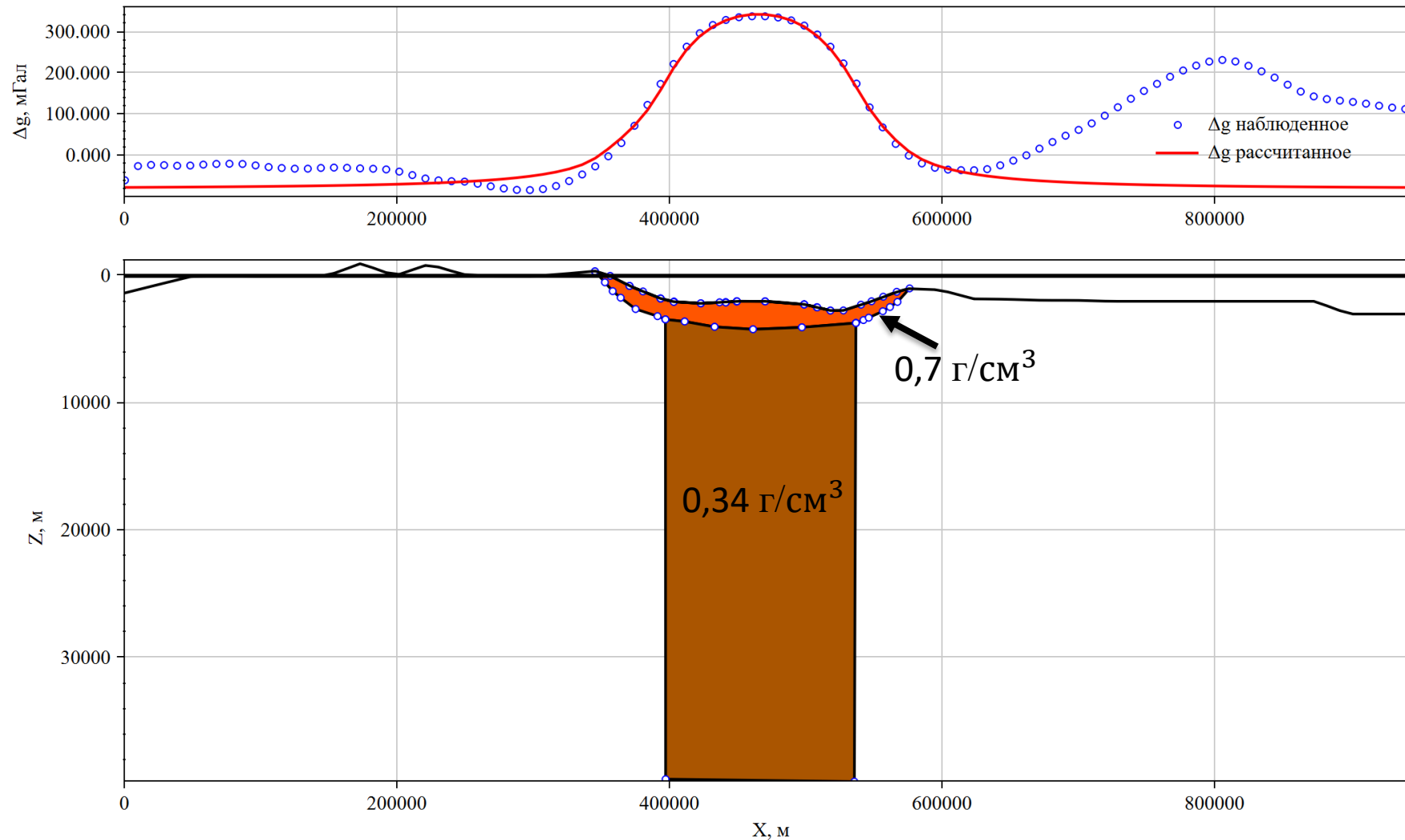


Слой базальтов с избыточной плотностью $0,7 \text{ г/см}^3$, которая является одной из максимально возможных разностей между плотностью лунных базальтов ($3,2 \text{ г/см}^3$) и плотностью лунной коры ($2,5 \text{ г/см}^3$).

Амплитуда аномалии, создаваемой от базальтового слоя мощностью 2 км не превышает 50 мГал, что значительно меньше наблюдаемого поля.

Вывод: только базальтовый слой не может объяснить наличие аномалии.

Модель маскона Гримальди (Grimaldi)



Для объяснения аномалии добавлен блок, отражающий зону проникновения базальтов из мантии Луны к излившемуся на поверхность базальтовому морю. Мощность данного блока равна средней мощности лунной коры, что составляет около 40 км.

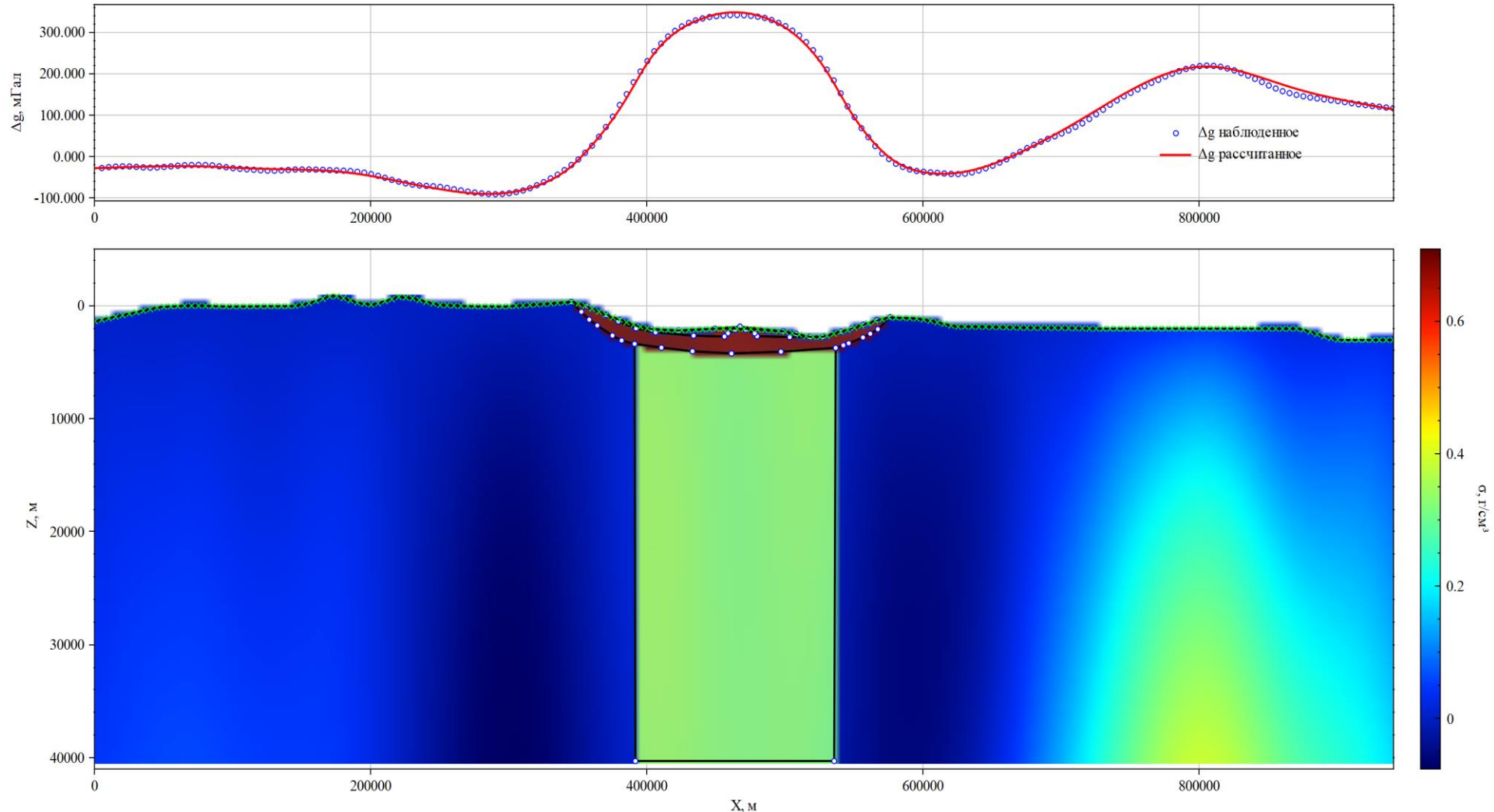
Подобранная избыточная плотность составила $0,34 \text{ г/см}^3$, что является разностью между средней плотностью базальтов на луне и средней плотностью лунной коры.

СКО подбора составило $\pm 4,45 \text{ мГал}$.

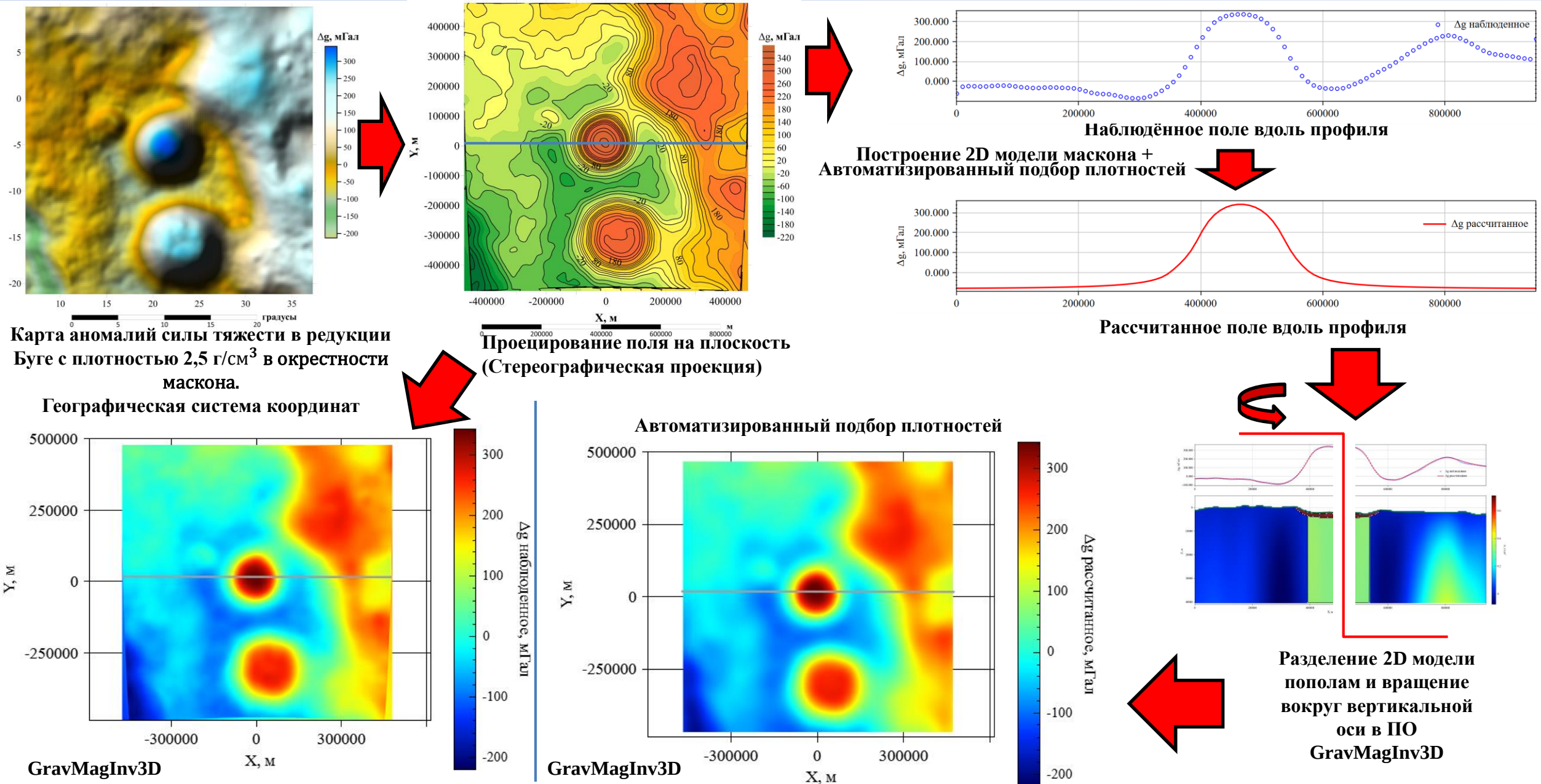
Модель маскона Гримальди (Grimaldi)

На следующем этапе выполнен автоматизированный подбор остаточного поля.

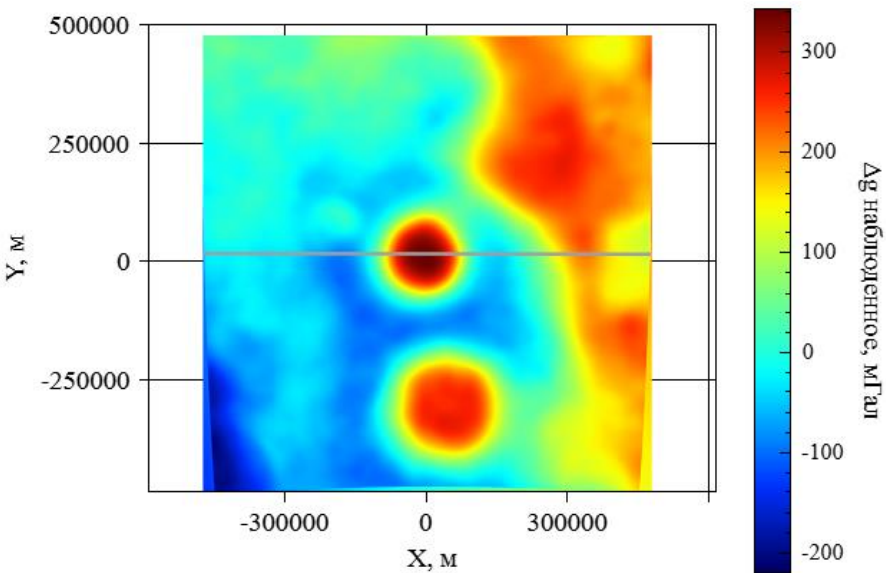
После подбора значений избыточных плотностей СКО (среднеквадратичное отклонение) между наблюдаемым и рассчитанным полем на всем протяжении профиля составило $\pm 4,97$ мГал.



Этапы создания объёмной (3D) модели маскона Гримальди

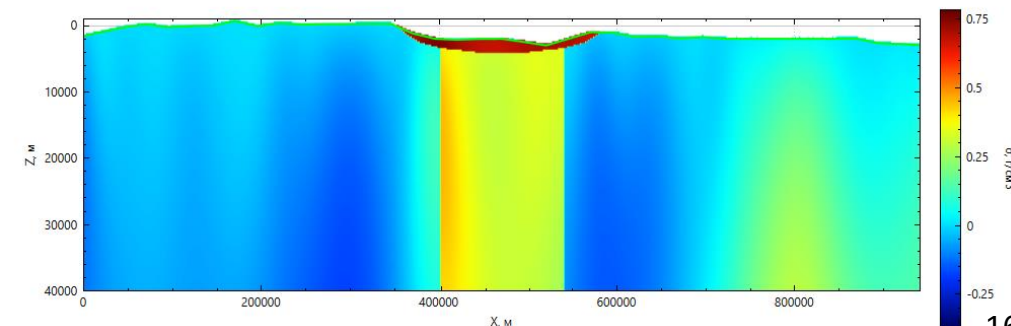
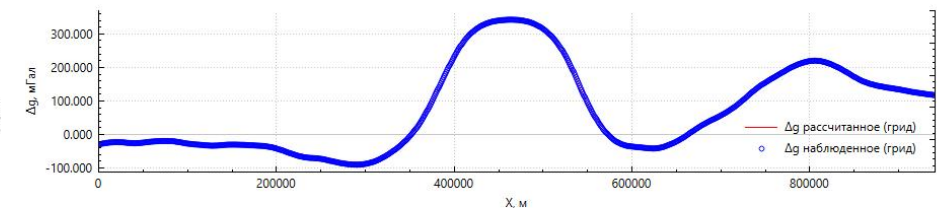
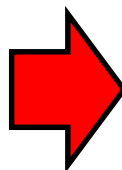
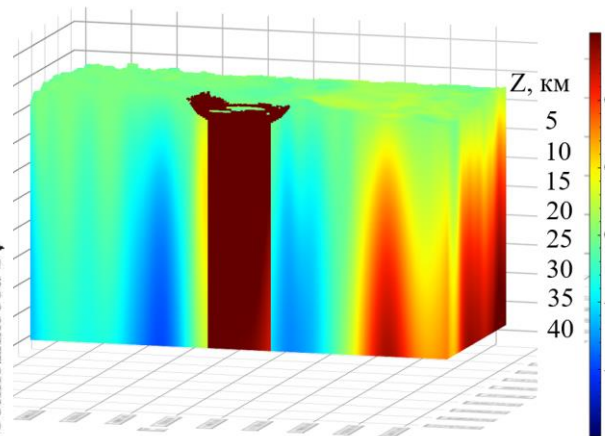
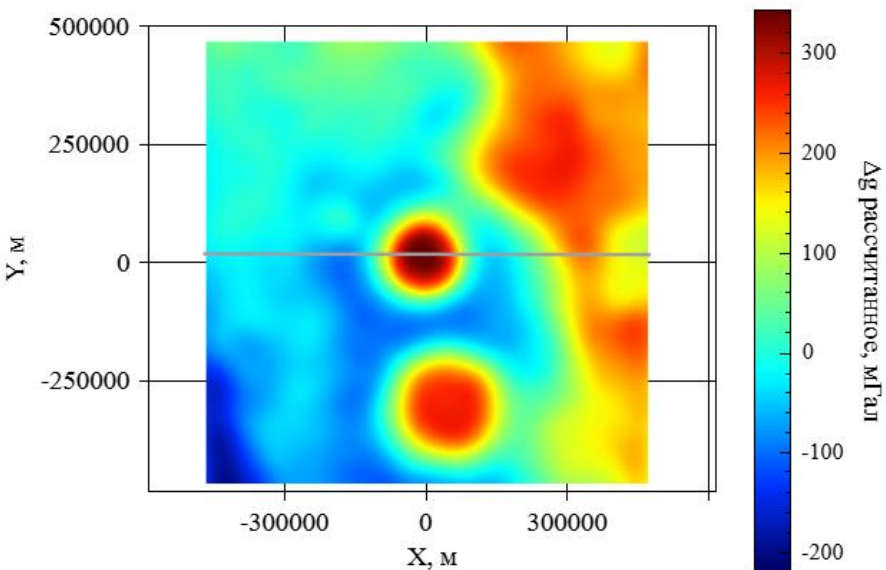


Плотностная модель маскона Гримальди



- Построена объемная модель маскона. Точность подбора составила ± 10 мГал

Выводы: 1) выбранная модель состоятельна и может объяснить наличие положительных аномалий со столь высокими значениями гравитационного поля (около 300 мГал); 2) анализ полей силы тяжести структур, порождающих масконы, можно начинать с построения 2D моделей.



Заключение

1. Созданы 4 концептуальные физико-геологические модели астроблем;
2. Рассчитаны гравитационные эффекты двухмерных моделей астроблем (ПО GravMagInv2D) и проведён их анализ;
3. Созданы объемные модели астроблем и проведён расчет их гравитационных эффектов (ПО GravMagInv3D);
4. Разработан подход к построению объемных моделей источников «астроблемовидных» аномалиям силы тяжести;
5. Создана плотностная модель маскона Гримальди (Grimaldi).

Важно отметить, что анализ полей силы тяжести астроблем можно начинать с построения 2D моделей.

Для аномалии маскона Гримальди (Grimaldi) только наличие базальтового слоя («базальтовое море») не может объяснить наличие аномалии в гравитационном поле Луны. Подобные аномалии объясняет модель, состоящая, преимущественно, из **блока, отражающего зону проникновения базальтов из мантии Луны к лунной поверхности, а также собственно излившихся базальтов и застывших в «базальтовое море».**

Спасибо за внимание!