

УДК 523.44+523.681

АНОМАЛЬНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ МЕТЕОРИТНОГО КРАТЕРА ЖАМАНШИН: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

© 2024 г. М. Ю. Кузьмичева*, Б. А. Иванов**

*Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия***E-mail: mukuzm@idg.ras.ru****E-mail: ivanov.ba@idg.ras.ru*

Кратеры, образующиеся в результате удара астероида о земную поверхность, характеризуются наличием аномалии магнитного поля. Численное моделирование аномального магнитного поля позволяет изучить кратер наряду с методами, применяемыми в геологоразведке. Кратеры, близкие по размеру, обладают морфологическим сходством, что позволяет проводить сравнительный анализ магнитных аномалий разных кратеров. В статье представлены результаты численного моделирования магнитной аномалии метеоритного кратера Жаманшин (Казахстан, 48°20' с.ш., 61° в.д., диаметр 8.6 км, возраст 0.9 млн лет). Показано, что они соответствуют общей картине магнитной аномалии изучаемого кратера и приводят к выводу о наличии слоя импактитов в ложе кратера и в центральной горке, погребенной под осадочным чехлом. На основании результатов моделирования усредненная магнитная восприимчивость пород мишени оценивается на уровне $3 \cdot 10^{-4}$ SI.

Ключевые слова: численное моделирование, ударный кратер, аномальное магнитное поле, Жаманшин.

Для цитирования: Кузьмичева М.Ю., Иванов Б.А. Аномальное магнитное поле метеоритного кратера Жаманшин: численное моделирование // Динамические процессы в геосферах. Т. 16. № 4. С. 46–53. https://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_4_46

Введение

Катастрофический удар астероида о земную поверхность запускает целый ряд процессов в геосферах на разных временных масштабах, одним из процессов является образование ударного кратера. Метеоритные кратеры характеризуются наличием гравитационной и магнитной аномалий [Pilkington, Hildebrandt, 2003]. На сегодняшний день на Земле обнаружено порядка 190 подтвержденных импактных структур (Earth Impact Database: http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/New%website_05-2018/Index.html). Размеры диаметров промежуточного и финального кратеров важны для оценки энергии, выделившейся при ударе. Данные магнитных наблюдений показывают, что размер области полости разрушения может быть получен из характера магнитной аномалии. Главным образом, кратеры характеризуются круговым понижением магнитного поля и коротковолновыми интенсивными аномалиями, произведенными слоями ударного расплава и/или отложениями зювитов, представляющих собой один из видов импактитов. Отрицательная магнитная аномалия, предположительно, вызвана разрушением магнитных носителей в породах, в то время как слои расплава и обогащенные расплавом брекчии приобретают повышенную магнитную восприимчивость и/или намагниченность. Аномальное магнитное поле (АМП) ударного метеоритного кратера, то есть аномалия магнитного поля, связанная с кратером, формируется как породами, измененными в результате удара астероида – импактитами, так и породами, перемещенными в результате удара. При моделировании морфология каждого возникшего кратера зависит от скорости, угла падения и массы падающего тела – ударника и от свойств поверхности, о которую ударяет астероид, – мишени. Зависимость от других свойств падающего астероида, таких как состав, прочность, мы не рассматриваем. В данной работе моделировался вертикальный удар. Проведенное ранее авторами численное моделирование процесса образования ударного кратера и

аномального магнитного поля кратера Босумтви (Гана) [Кузьмичева, Иванов, 2020; 2021], близкого по размеру и возрасту к кратеру Жаманшин, дает возможность провести анализ аномального магнитного поля кратера Жаманшин. Кратер Жаманшин находится в Казахстане, в Северном Приаралье. Его координаты – 48°20' с.ш., 61° в.д., диаметр составляет 8.6 км, возраст оценивается как 0.9 млн лет. Более подробное (базовое) описание кратера можно найти в книге В. Л. Масайтиса [Масайтис и др., 1980]. Методы численного моделирования позволяют изучить кратер наряду с методами бурения, гравиметрии, сейсморазведки, каротажа, магнитометрии и другими, комплексно применяемыми в геологоразведке.

Моделирование процесса образования кратера: определение зоны размагничивания

Метеоритные кратеры бывают разной морфологии. Рассматриваемый нами кратер с центральной горкой – это один из видов кратеров. Физика кратерообразования и виды ударных кратеров описаны в книге Г. Д. Мелоша [Мелош, 1994]. Численное моделирование процесса образования сложного кратера с центральной горкой, примерами которого являются кратеры Жаманшин и Босумтви, подробно описано в работе [Кузьмичева, Иванов, 2020]. В породах, несущих магнитные минералы типа титаномагнетита, прохождение ударной волны вызывает разрушение микроструктур, ответственных за магнитную восприимчивость [Reznik et al., 2016]. Основной ферромагнитный минерал в импактитах кратера Жаманшин – это титаномагнетит (Fe_2TiO_4) [Bobrov et al., 2022]. В первом приближении можно допустить, что при давлениях выше 3.5 ГПа магнитная восприимчивость падает до нуля, мы говорим, что образуется магнитная каверна. С целью уточнить распределение ударных давлений в породах под кратерами были проведены расчеты для оценки зоны магнитной каверны [Кузьмичева, Иванов, 2020; 2021]. Задача решалась методами численного моделирования с использованием кода SALEB [Ivanov, 2005] в приближении вертикального удара.

Моделирование аномального магнитного поля

Магнитная каверна порождает отрицательную магнитную аномалию, ее размер по уровню несколько нТ для пород мишени с магнитной восприимчивостью 10^{-4} SI близок к диаметру кратера [Кузьмичева, Иванов, 2020; 2021]. Также в результате удара образуются импактиты – породы, обладающие повышенной магнитной восприимчивостью и остаточной намагниченностью за счет быстрого охлаждения расплава пород, способные создавать положительную магнитную аномалию в пределах кратера. Для кратера Босумтви глубины залегания слоев импактитов, их размеры, магнитные свойства задавались по данным образцов керна, полученных в результате бурения [Кузьмичева, Иванов, 2020; 2021].

Кратерный вал и более дальние выбросы породы, происходящие за счет взаимодействия ударной волны с поверхностью мишени, порождают положительную магнитную аномалию.

При моделировании АМП сначала рассчитывалось магнитное поле мишени, затем поле мишени с кратером, их разница – магнитная аномалия, вызванная образованием кратера [Кузьмичева, Иванов, 2020; 2021]. Учитывались наличие магнитной каверны, центральной горки, слоев импактитов с разной остаточной намагниченностью, кратерного вала [Кузьмичева, Иванов, 2021].

Из-за различного географического положения величина и направление локального геомагнитного поля для кратеров Жаманшин и Босумтви различаются. Локальное геомагнитное поле для центра кратера Жаманшин составляет 54950 нТ с наклоном 67° и склонением 10° соответственно, для них также различается магнитный момент пород, связанный с магнитной восприимчивостью. Магнитные свойства импактитов в моделировании АМП кратера Жаманшин взяты такими же, как и для Босумтви, так как магнитные свойства импактитов Жаманшина мало изучены. Морфология кратера, использовавшаяся при моделировании АМП, приведена на рис. 1 и в работе [Кузьмичева, Иванов, 2021], магнитные свойства пород, размеры и глубины залегания областей и слоев приведены в Таблице 1.

Таблица 1.

Магнитные свойства пород и их расположение, использовавшиеся при моделировании АМП
[Kontny et al., 2007]

Среда	Магнитная восприимчивость, ед SI	Термо-остаточная намагниченность, А/м	Глубина залегания, мощность или высота, м	Наклонение, скло- нение, град	Форма, размер, км
Породы мишени	$3 \cdot 10^{-4}$	0	0(3850)	67, 10	Прямоугольный параллелепипед $30 \times 20 \times 4$
Магнитная полость 1	0	0	0(2900)	не используется	Форма размагниченной области, максимальный радиус 4
Импактиты I 2	0	0.037	-375(100)	67, 10	Прямой круговой цилиндр, радиус 3.1
Импактиты II 3	0	3.0	-375(3)	67, 10	Кольцо: внутренний радиус 0.5, внешний 1.7
Кратерный вал 4	$3 \cdot 10^{-4}$	0	0(140), высота	67, 10	Профиль по высоте задан кривой 4
Центральная горка 5	0	0.037	-375(140), высота	67, 10	Основание: круг с радиусом 1.4, профиль задан кривой 5

Серая кривая отделяет область магнитной каверны 1 от пород мишени, показана только верхняя часть магнитной полости 1, слой импактитов 2 и центральная горка 5 выделены штриховой линией, слой импактитов 3 показан жирной сплошной линией с треугольниками, 4 – кратерный вал. Слой импактитов 3, отличающийся большим значением остаточной намагниченности, примыкает к слою импактитов 2.

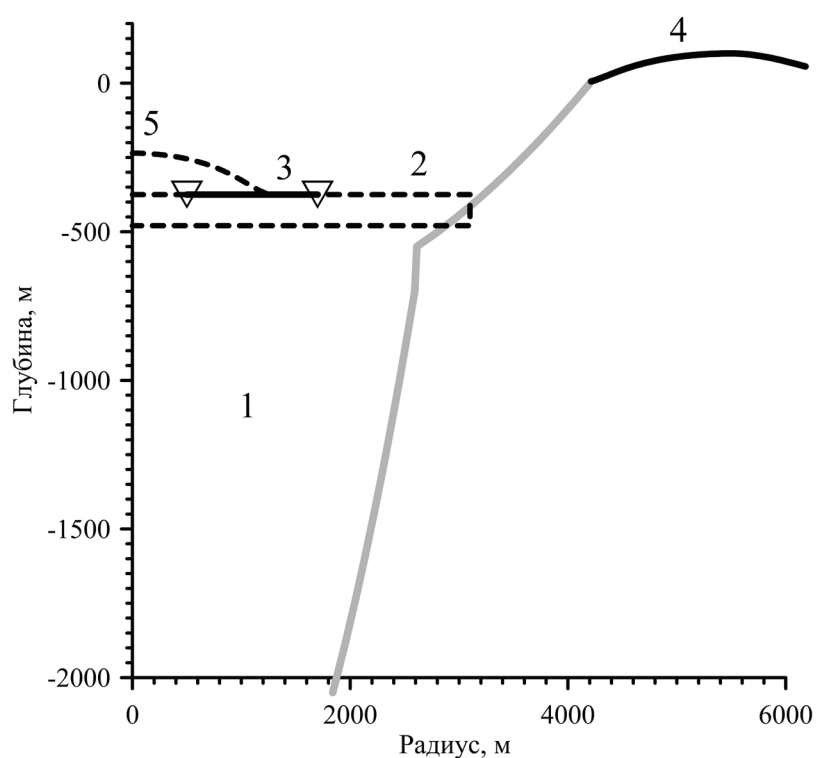


Рис. 1. Схема морфологии сложного кратера, использовавшаяся для моделирования АМП. 1 – область магнитной каверны, 2 – слой импактитов I, 3 – слой импактитов II, 4 – кратерный вал, 5 – центральная горка

Морфология и породы кратера Жаманшин

Кратер Жаманшин в рельефе не виден, данные о его морфологии получены геофизическими методами, проводилось также бурение [Сергиенко и др., 2023]. Можно надеяться, что погребенное состояние и сравнительно молодой возраст 0.9 млн лет способствовали хорошей сохранности кратера.

По геофизическим данным [Сергиенко и др., 2023] в кратере Жаманшин выделяются две воронки – внутренняя и внешняя, как бы вложенные одна в другую. Внутренняя воронка кратера, локализованная в породах складчатого фундамента, имеет диаметр около 5.5–6 км и максимальную глубину более 700 м. Она осложнена центральным поднятием (амплитуда около 250 м), которому соответствует положительная гравитационная аномалия. Борты воронки приподняты, образуя кольцевой вал фундамента (до 50 м), которому отвечает подковообразная положительная гравитационная аномалия. Между центральным и кольцевым поднятием располагается кольцевой желоб, которому соответствует цепочка отрицательных аномалий. Ложе кратера сложено деформированными силурийскими и нижнекаменноугольными породами складчатого фундамента, которые сочленяются по разлому северо-восточного простирания.

Карта АМП кратера Жаманшин представлена на рис. 2 (по [Bobrov et al., 2022]).

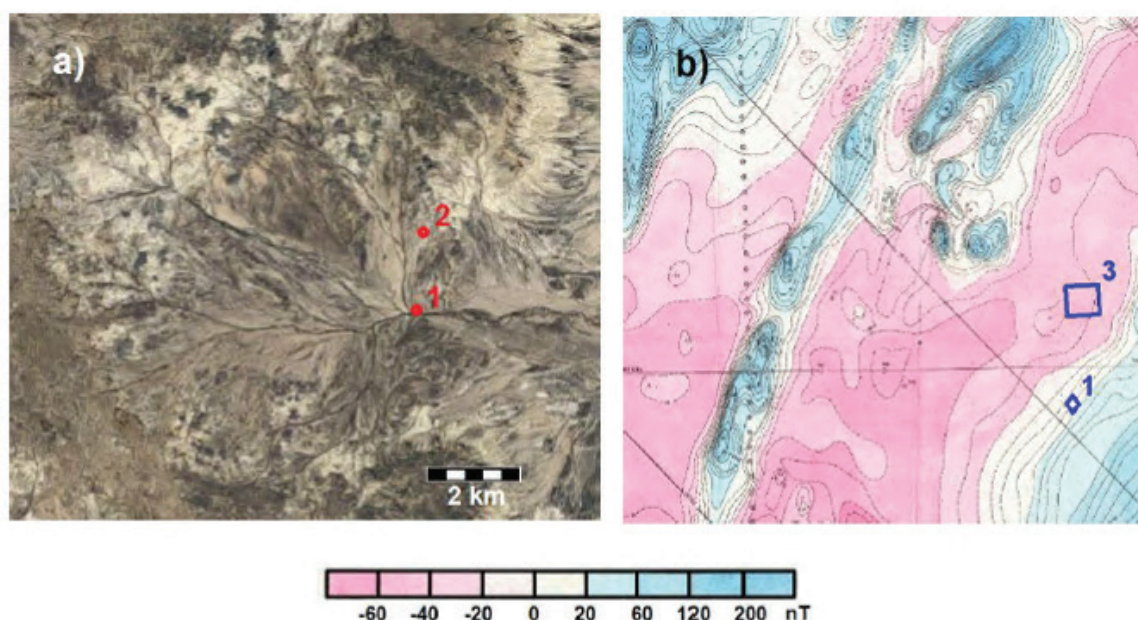


Рис. 2. Изображение кратера Жаманшин, полученное со спутника (а), карта АМП кратера Жаманшин по данным ПГО «Запазгеология» (b): 1 – полевой лагерь, 2 – выход зювитов, 3 – область магнитной съемки 2019 г. (магнитометр Минимаг)

Аномальное магнитное поле представляет собой отрицательную магнитную аномалию размером до 10 км, внутри которой и по краям находятся положительные магнитные аномалии. Величина отрицательной аномалии доходит до -80 нТ, величина положительной аномалии – до 200 нТ. На карте аномалия не выведена на нулевой уровень по краю, поэтому непонятно, насколько точны эти значения, но можно ориентироваться на их контраст. По данной картине можно предположить [Кузьмичева, Иванов, 2021], что отрицательная аномалия связана с образованием магнитной полости, положительная аномалия в центре связана с залеганием в ложе кратера слоя импактитов и наличием центрального поднятия, содержащего импактиты. Положительная магнитная аномалия на краю кратера также может быть связана с кратерным валом под чехлом осадочных пород.

Обсуждение результатов численного моделирования АМП кратера Жаманшин

На рис. 3 представлено аномальное магнитное поле, полученное для пород мишени с магнитной восприимчивостью 10^{-4} SI и свойствами импактитов такими же, как представлено в Табл. 1. Амплитуда АМП в кратере больше, чем полученная в расчетах с магнитной восприимчивостью пород мишени 10^{-4} SI. По величине магнитной аномалии можно оценить среднюю магнитную восприимчивость мишени как $3 \cdot 10^{-4}$ SI, так как величина магнитной аномалии пропорциональна магнитной восприимчивости. В дальнейших расчетах использовалось это значение магнитной восприимчивости, превышающее значение магнитной восприимчивости пород мишени кратера Босумтви.

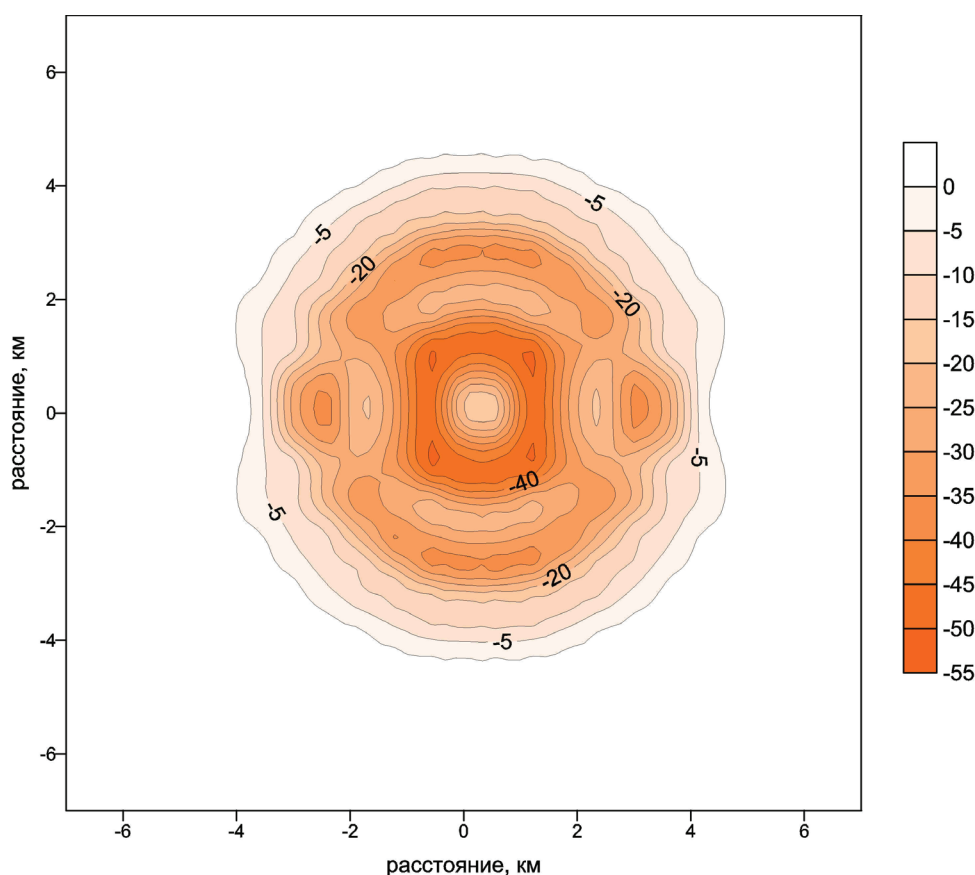


Рис. 3. АМП (нТ), магнитная восприимчивость пород мишени 10^{-4} SI

На рис. 4 представлено аномальное магнитное поле магнитной каверны, полученное для пород мишени с магнитной восприимчивостью $3 \cdot 10^{-4}$ SI. Здесь максимальные отрицательные аномалии близки к наблюдаемым.

При учете вклада импактитов, обладающих повышенными по сравнению с породами мишени магнитными свойствами, картина АМП усложняется. На рис. 5 показано АМП, рассчитанное с учетом всех импактитов модели (Табл. 1).

Сравнение карты АМП с результатами моделирования показывает существенную недостаточность эквивалентного магнитного момента рассматриваемых импактитов для описания наблюдаемой положительной аномалии. По данным обобщенного проектного геологического разреза [Сергиенко и др., 2023] объем центрального поднятия может быть больше, а глубина залегания меньше, чем принималось в расчетах, однако данные по магнитным свойствам пород, составляющих центральное поднятие, не представлены. В дальнейшем можно сделать предположения об их свойствах или же они

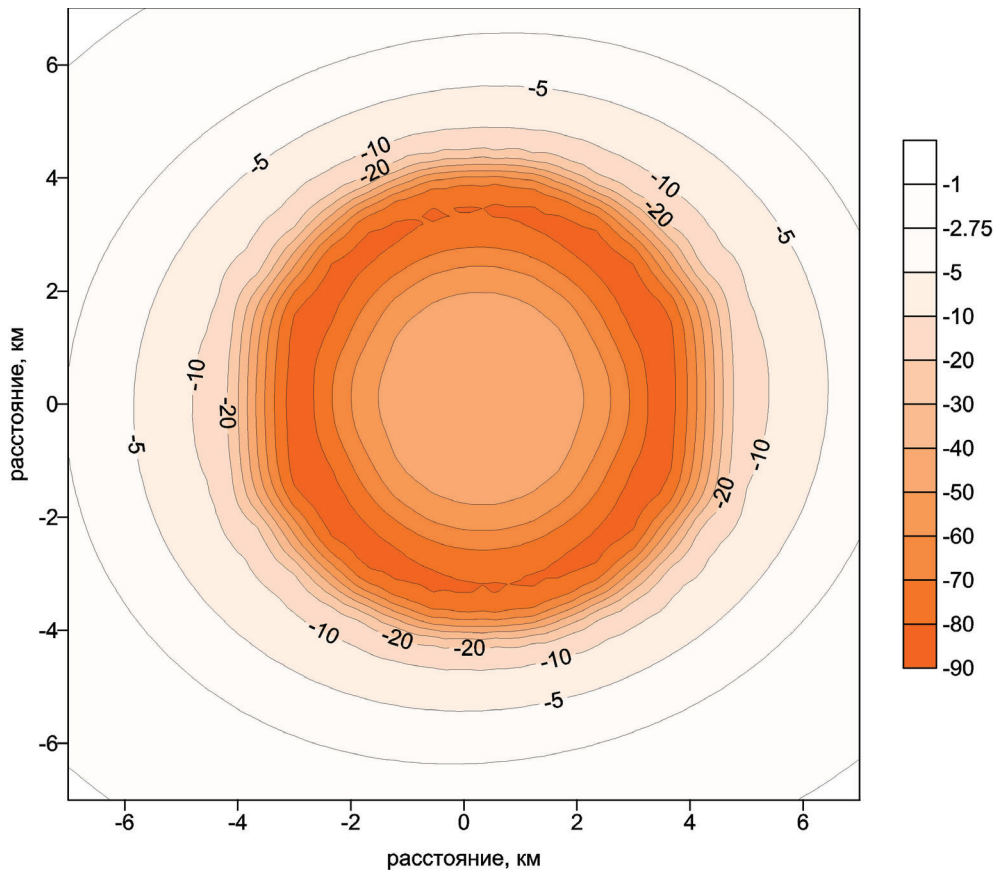


Рис. 4. АМП (нТ), создаваемое магнитной полостью кратера, магнитная восприимчивость пород мишени $3 \cdot 10^{-4}$ SI

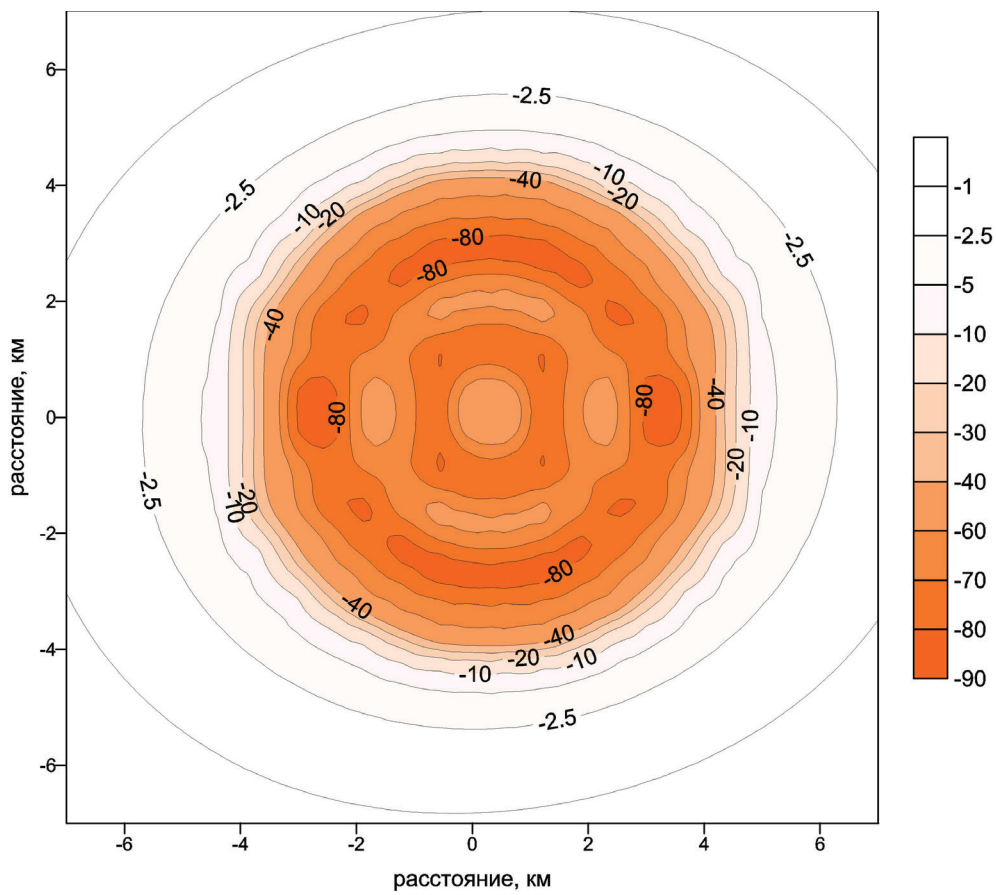


Рис. 5. АМП (нТ), рассчитанное с учетом вклада всех импактивов модели кратера

будут изучены. В экспедиции 2019 г. [Bobrov et al., 2022], проведенной учеными Санкт-Петербургского Государственного и Казанского Федерального университетов, были изучены приповерхностные зювиты, показавшие магнитную восприимчивость, достигающую до $3 \cdot 10^{-4}$ SI. Эти породы расположены в области сильной отрицательной магнитной аномалии (-60 нТ), их вклад проявляется в ближайшей окрестности, так что они не могут дать заметного вклада в положительную аномалию в центре кратера.

Выводы

Общая картина АМП кратера Жаманшин согласуется с результатами численного моделирования. Картина магнитного поля указывает на наличие слоя импактитов в глубине кратера. Высокие значения положительной магнитной аномалии также, как и результаты изучения выходов зювитов на поверхности кратера, свидетельствуют о значительном магнитном моменте импактитов. Область залегания, объем, магнитные свойства импактитов в глубине кратера нуждаются в уточнении.

Средняя магнитная восприимчивость пород мишени оценивается как $3 \cdot 10^{-4}$ SI по величине отрицательной магнитной аномалии.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900176-3).

Благодарности

Авторы благодарят рецензента за проявленное внимание и ценные замечания.

Список литературы

- Масайтис В.Л., Данилин А.Н., Мащак М.С. и др. Геология Астроблем. Ленинград : Недра. 1980.
- Мелош Г.Д. Образование ударных кратеров. Геологический процесс. Москва : Мир. 1994. – 336 с.
- Кузьмичева М.Ю., Иванов Б.А. Моделирование магнитной аномалии, связанной со сложным кратером, на примере кратера Босумтви // Астрономический Вестник. 2020. Т. 54. № 5. С. 397–408. <https://doi.org/10.31857/S0320930X20050059>
- Кузьмичева М.Ю., Иванов Б.А. Моделирование магнитной аномалии сложного метеоритного кратера Босумтви (Гана) с учетом ударного размагничивания и морфологических особенностей // Физика Земли. 2021. № 5. С. 242–253. <https://doi.org/10.31857/S0002333721050124>
- Сергиенко Е.С., Янсон С.Ю., Бобров Н.Ю., Карпинский В.В., Харитонский П.В. Геофизические исследования структуры Жаманшин: история и нерешенные проблемы: Всероссийская конференция с международным участием «Палеомагнетизм и магнетизм горных пород» (2–7 октября 2023 г. Казань). 2023.
- Bobrov N., Sergienko E., Yanson S., Kostrov A., Karpinsky V., Kharitonskii P., Ralin A. Magnetic Viscosity of Suevites from the Zhamanshin Impact Crater. In: Kostrov A., Lyskova E., Mironova I., Apatenkov S., Baranov S. (eds) Problems of Geokosmos. 2022. ICS 2022. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham, 2023, P. 85–107. https://doi.org/10.1007/978-3-031-40728-4_7
- Kontny A., Elbra T., Just J., Pesonen L.J., Schleicher A.M., Zolk J. Petrography and shock-related remagnetization of pyrrhotite in drill cores from the Bosumtwi Impact Crater Drilling Project, Ghana // Meteorit. and Planet.Sci. 2007. Vol. 42 (4–5). P. 811–827. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2007.tb01077.x>
- Ivanov B.A. Numerical modeling of the largest terrestrial meteorite craters // Sol. Syst. Res. 2005. Vol. 39. P. 381–409. <https://doi.org/10.1007/s11208-005-0051-0>
- Pilkington M., Hildebrand A.R. Transient and disruption cavity dimensions of complex terrestrial impact structures derived from magnetic data // Geophysical Research Letters. 2003. Vol. 30 (21). P. 2087–2090. <https://doi.org/10.1029/2003GL018294>
- Reznik B., Kontny A., Fritz J. Effect of moderate shock waves on magnetic susceptibility and microstructure of a magnetite-bearing ore // Meteoritics & Planetary Science. 2016. P. 1–10. <https://doi.org/10.1111/maps.12787>

ANOMALOUS MAGNETIC FIELD OF THE ZHAMANSHIN METEORITE CRATER: NUMERICAL SIMULATION

© 2024 M. Y. Kuzmicheva*, B. A. Ivanov**

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: mukuzm@idg.ras.ru*

***E-mail: ivanov.ba@idg.ras.ru*

Craters formed by an asteroid impact on the Earth's surface are characterized by the presence of an anomaly in the magnetic field. Numerical modeling of the anomalous magnetic field allows us to study the crater along with the methods used in geological exploration. Craters that are close in size have morphological similarities, which allows for a comparative analysis of magnetic anomalies of different craters. It is shown that they correspond to the general picture of the magnetic anomaly of the crater under study and lead to the conclusion that there is a layer of impactites in the crater bed and in the central hill buried under the sedimentary cover. Based on the modeling results, the average magnetic susceptibility of the target rocks is estimated at $3 \cdot 10^{-4}$ SI.

Keywords: numerical modeling, impact crater, anomalous magnetic field, Zhamanshin.