

УДК 523.44+523.681

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ СЛОЖНОГО МЕТЕОРИТНОГО КРАТЕРА БОСУМТВИ (ГАНА) С УЧЕТОМ УДАРНОГО РАЗМАГНИЧИВАНИЯ И МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ

© 2021 г. М. Ю. Кузьмичева^{1, *}, Б. А. Иванов^{1, **}

¹Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: mukuzmgm@gmail.com

**E-mail: boris_a_ivanov@mail.ru

Поступила в редакцию 22.03.2021 г.

После доработки 29.03.2021 г.

Принята к публикации 01.04.2021 г.

Образование ударных кратеров на поверхности Земли сопровождается воздействием ударных волн на горные породы. Ударно-волновое сжатие приводит к возникновению нагрева горных пород вплоть до плавления и испарения при разгрузке. Прямое механическое действие ударного сжатия и остаточный нагрев изменяют магнитные свойства горных пород. Геофизическое моделирование используется для определения источников магнитной аномалии по интерпретации полей, измеренных на поверхности, но при таком моделировании не учитывается ударное размагничивание пород. В данной работе представлен пример анализа магнитной аномалии над хорошо изученным кратером Босумтви (Гана, диаметр 10.5 км, возраст 1 млн лет), включающего численное моделирование процесса образования кратера и построение модели магнитной аномалии на основании смоделированных параметров ударного сжатия и данных бурения кратера. Показано, что морфологические особенности кратера – кратерный вал и центральное поднятие – формируют положительные магнитные аномалии вокруг и внутри кратера.

Ключевые слова: численное моделирование, метеоритный кратер Босумтви, магнитная аномалия.

DOI: 10.31857/S0002333721050124

ВВЕДЕНИЕ

Космические полеты с целью исследования планет земной группы позволили измерить магнитные поля на их поверхностях и сделать на основании их геометрии выводы о строении и эволюции этих планетных тел [Spohn, 2015]. Эти данные показали, в частности, что у Луны когда-то было глобальное долгоживущее магнитное поле с напряженностью, близкой к земной [Wieczorek, 2018]. Нынешнее отсутствие магнитных источников на большей части поверхности Луны и Марса объясняется процессами ударного размагничивания [Mohit, Arkani-Hamed, 2004], то есть изменением магнитных свойств горных пород в процессе образования ударных кратеров.

Метеоритные кратеры на Земле позволяют изучать ударные магнитные аномалии как путем определения магнитных полей над ударными структурами, так и лабораторными исследованиями магнитных свойств исходных и измененных горных пород и составляющих их минералов. Вследствие эрозии, геодинамических процессов и наличия геомагнитного поля магнитные аномалии, связанные с земными кратерами, сложнее

интерпретировать, чем кратерные аномалии на Луне и Марсе, где эти факторы отсутствуют. Для оценки геометрии источников магнитных аномалий по измерению полей на поверхности используется геофизическое моделирование. Однако при таком моделировании, как правило, принимается во внимание влияние пород с высокой намагниченностью и не рассматривается ударное размагничивание [Plado et al., 2000; Artemieva et al., 2004; Ugalde et al., 2005; 2007; Elbra et al., 2007; Kontny et al., 2007].

В некоторых случаях данные по магнитным аномалиям кратеров позволяют оценить размер кратера, связанного с ним промежуточного кратера, и энергию, выделившуюся при ударе космического тела, независимым образом [Pilkington, Hildebrand, 2003].

Кратер Босумтви (Гана, 6°30'26" с.ш. 1°24'24" з.д.), изучаемый в данной работе, является одним из самых молодых (возраст ~1 млн лет) среди известных земных метеоритных кратеров диаметром свыше 10 км [Schmieder, Kring, 2020]. Кратер хорошо изучен геологическими и геофизическими

методами, включая бурение вблизи центрального поднятия кратера [Koeberl et al., 2007].

В данной работе представлены результаты исследования, начальный этап которого описан в работе [Кузьмичева, Иванов, 2020]. Здесь представлен пример комплексного анализа магнитной аномалии над Босумтви, включающего численное моделирование процесса образования кратера, построение модели магнитной аномалии на основании смоделированных параметров ударного сжатия, данных бурения кратера, его морфологии.

ИЗМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ПОРОД, ХАРАКТЕРНЫЕ ДЛЯ МЕТЕОРИТНЫХ КРАТЕРОВ

Ударные кратеры характеризуются наличием аномалий физических полей, определяемых совокупностью ударных процессов и послеподударной модификации среды. На Земле магнитная аномалия, связанная с кратером, характеризуется пониженным магнитным полем, с отдельными положительными аномалиями, которые часто связаны с центральным поднятием, если оно существует [Pilkington, Hildebrand, 2003].

В настоящее время принято выделять три стадии образования кратерной полости – стадии сжатия, экскавации и модификации [Мелош, 1994]. При высокоскоростном ударе в ударнике и мишени образуются ударные волны, приводящие к испарению, полному разрушению ударника, выбросу его вещества (стадия сжатия), образование полости в мишени (так называемому промежуточному кратеру, стадия экскавации), которая затем модифицируется в конечный кратер большего диаметра и меньшей глубины с валом (стадия модификации).

Нагретые в результате удара магнитные минералы горных пород земной коры затем остывают ниже температуры Кюри и приобретают термоостаточную намагниченность с величиной, пропорциональной напряженности окружающего магнитного поля [Ugalde et al., 2005]. Уже существующая намагниченность минералов может уменьшиться или исчезнуть под воздействием ударной волны [Ugalde et al., 2005]. Затвердевший расплав и брекчии приобретают повышенную, по сравнению с исходной породой, магнитную восприимчивость и новую остаточную намагниченность [Ugalde et al., 2005]. Существует также динамическая остаточная намагниченность, которая возникает в результате ударов [Храмов и др., 1982]. В результате кратерообразующего удара магнитные свойства поверхности мишени также изменяются за счет выброса грунта и его перемещения [Ugalde et al., 2005].

Ударное размагничивание пород мишени вызвано прохождением ударной волны при образо-

вании ударного кратера в стадии сжатия и экскавации. Частичное размагничивание происходит уже при давлениях нескольких ГПа [Mohit, Argkani-Named, 2004]. Породы мишени, подвергшиеся ударной нагрузке более 3.5 ГПа, в данном моделировании рассматриваются как размагниченные. Эти породы и полость кратера названы “магнитной каверной”. Выбросы приповерхностного вещества, образующие кратерный вал, за счет взаимодействия ударной волны с поверхностью не подвергаются высоким давлениям и поэтому не размагничены, но мы полагаем, что в результате выбрасывания они перемешиваются, их магнитные моменты, обусловленные естественной остаточной намагниченностью, становятся разнонаправленными. В дальнейшем моделировании мы учитываем их индуктивную намагниченность.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗНИКНОВЕНИЯ КРАТЕРА БОСУМТВИ

Ранее уже были опубликованы несколько работ о моделировании образования кратера Босумтви как для ранней стадии образования тектитов [Artemieva et al., 2004], так и для оценки ударного сжатия образцов из кернов скважин ([Ferriere et al., 2008] и приложения к ней).

Для оценок ударного размагничивания мы провели дополнительные расчеты распределения затухания ударной волны под кратером с использованием кода SALEB [Ivanov, 2005; Ivanov et al., 2010] в приближении вертикального удара. На рис. 1 для иллюстрации показано образование кратера с конечным диаметром по гребню вала порядка 10 км в одном из вариантов моделирования. Для воспроизведения коллапса переходного кратера с образованием центрального поднятия использована модель акустической флюидизации [Melosh, 1979; Melosh, Ivanov, 1999].

Мы сравнили удары со скоростью 10 и 20 км/с для материала мишени с уравнением состояния Тиллотсона и ANEOS [Tillotson, 1962; Pierazzo et al., 1997]. Прочностные свойства гранита, использованные в модели, описаны в работе [Collins et al., 2004]. Пространственное разрешение, определяемое числом ячеек на радиус ударника CPPR (Cells Per Projectile Radius), изменялось от 18 до 30. Изначально мишень находилась в равновесии в вертикальном поле тяжести Земли.

На рис. 2 сравниваются модельные профили конечных кратеров в трех вариантах расчетов (из, примерно, 20 опробованных вариантов) с наиболее удачным воспроизведением профиля ударного кратера. Путем эмпирического подбора параметров модели было достигнута приемлемая повторяемость формы конечного кратера.

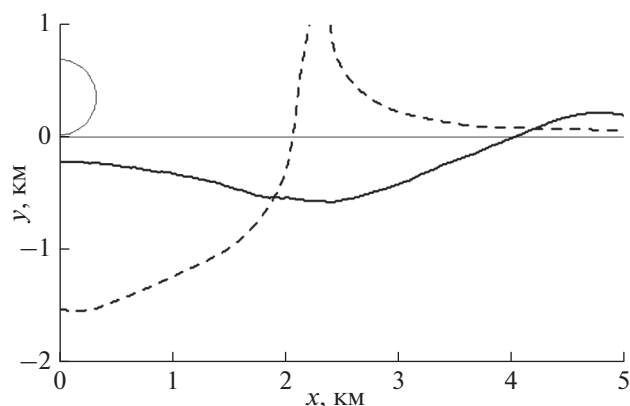


Рис. 1. Общая схема образования сложного кратера при вертикальном ударе. Тонкими линиями показан контур сферического ударника, пунктирной кривой — контур переходной полости кратера (4 с после удара), жирной кривой — финальный профиль сложного кратера с центральным поднятием. Левая вертикальная ось является осью цилиндрической симметрии.

Подгонка параметров модели под наблюдаемую геометрию кратера позволяет надеяться, что и картина распределений максимальных давлений в ударной волне в горных породах под кратером будет близка к наблюдаемой в природном явлении. Для определения положения линий максимального ударного давления применялась стандартная процедура внедрения в каждую счетную ячейку безмассовой частицы-маркера, пере-

мещающейся вместе с окружающим ее материалом через Эйлерову сетку. В момент прохода ударной волны для каждой частицы запоминалось значение максимального ударного давления. После окончания перемещений материала под кратером, значения конечных координат маркеров и записанных в них давлений позволяют строить “изобары” — линии, соединяющие частицы с одинаковым ударным сжатием. На рис. 3 показаны два примера положения изобар в горных породах под финальным кратером.

Как видно на рис. 3, хорошее совпадение профилей модельных кратеров (рис. 2) не гарантирует идеального совпадения изолиний максимального ударного давления в породах под кратером. Однако в целом картина распределения ударных давлений в пространстве довольно постоянна — в центре максимальная глубина пород, испытавших ударное сжатие до 3–3.5 ГПа, составляет около 3 км, а радиус зоны такого давления под дном кратера не превышает 2.5–3 км. Другие расчетные варианты, не показанные на рис. 1–рис. 3, дают похожую картину распределения пород по максимальному давлению в ударной волне при условии нормирования расстояний на размер модельного кратера.

МЕТОД РАСЧЕТА МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ

Моделирование магнитного поля проводилось путем решения трехмерной задачи магнитостатики

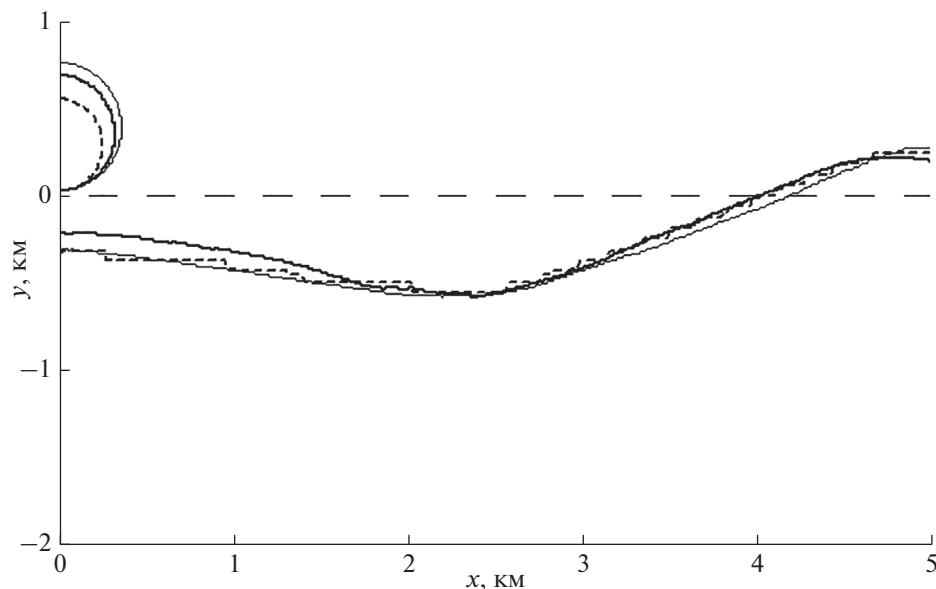


Рис. 2. Профили модельных кратеров, полученные в трех вариантах расчетов: жирная черная кривая — (021) ударник диаметром 0.65 км (CPPR = 27) со скоростью 10 км/с, уравнение состояния ANEOS; (04) тонкая черная кривая — ударник диаметром 0.72 км (CPPR = 30) со скоростью 10 км/с, уравнение состояния Тиллотсона; (03) пунктирная кривая — ударник диаметром 0.5 км (CPPR = 18) со скоростью 20 км/с, уравнение состояния Тиллотсона. Длинный горизонтальный пунктир обозначает изначальный уровень свободной поверхности мишени.

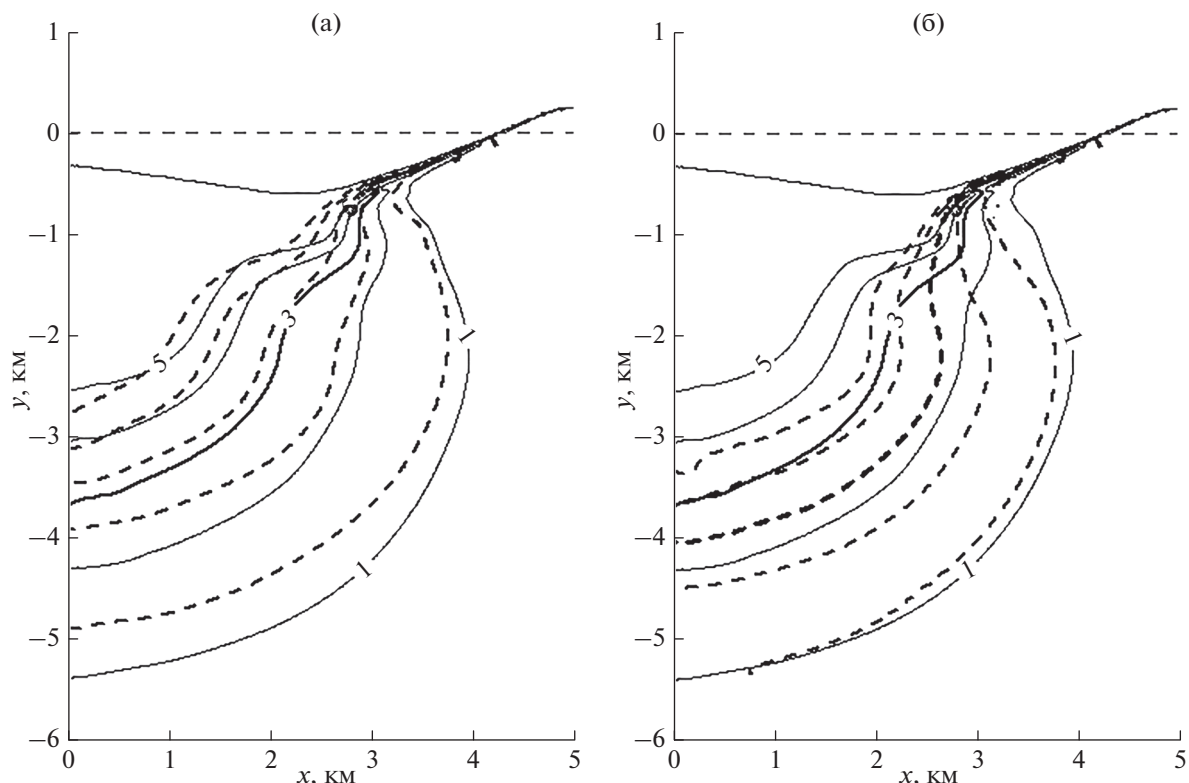


Рис. 3. Изобары максимального давления под модельными кратерами: (а) – уравнение состояния Тиллотсона, сплошные кривые – скорость удара 10 км/с, пунктирные кривые – скорость удара 20 км/с; (б) – удары со скоростью 10 км/с по мишени с уравнением состояния Тиллотсона (сплошные кривые) и ANEOS (пунктирные кривые). Подробнее профили кратеров показаны на рис. 2. Жирными кривыми показан уровень ударного давления 3 ГПа. Показаны изобары с записанным давлением 1, 2, 3, 4 и 5 ГПа.

[Ландау, Лившиц, 1988] на ортогональной сетке, где среда рассматривалась как набор магнитных диполей с известными свойствами. Индукция магнитного поля рассчитывалась по формуле для точечного диполя (например, [Oliveira et al., 2017], формула 3). В работе [Oliveira et al., 2017] подход, подобный нашему, использовался для исследования магнитного поля коры Луны. Для моделирования магнитных аномалий кратеров он ранее не применялся. Если размеры параллелепипедов, на которые разбита среда, малы по сравнению с расстояниями, на которых вычисляется поле, то можно пренебречь эффектом перемагничивания. Перемагничивание подразумевает влияние магнитного поля одной части индуктивно намагниченного тела на другую. Ортогональная сетка дает возможность описывать топологию кратера. Этот подход отличается от подхода, использованного в работах [Plado et al., 1999; 2000; Ugalde et al., 2007], основанного на определении интегральных характеристик источников [Страхов, 1956]. В данной работе для определения магнитной аномалии сначала рассчитывалась картина магнитного поля мишени без кратера, затем – картина магнитного поля после образования кратера, разница

этих полей описывалась как аномалия магнитного поля, связанная с кратером. Для описания морфологических особенностей кратера таких, как центральная горка и кратерный вал, требуется использовать более мелкую сетку, чем та, что использовалась в расчетах в работе [Кузьмичева, Иванов, 2020].

МОДЕЛЬ КРАТЕРА БОСУМТВИ ДЛЯ РАСЧЕТА МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ

В месте, где расположен Босумтви, наклонение геомагнитного поля составляет -12.0 , склонение геомагнитного поля равно -6.0 , величина поля равна 32500 нТ. Соответственно, компоненты геомагнитного поля равны: $B_x = 31600$ нТ, $B_y = -3320$ нТ, $B_z = -6760$ нТ. Магнитная восприимчивость породы мишени была выбрана равной 10^{-4} SI [Kontny et al., 2007], при исследовании влияния неоднородности мишени на магнитную аномалию она варьировалась, остаточная намагниченность не учитывалась. В качестве мишени был выбран прямоугольный параллелепипед с размером 30×20 км в основании и высотой 4 км, также проводились расчеты для мишеней меньшего

размера. Профиль магнитной каверны построен по изобарам максимального давления 3–4 ГПа (рис. 3, левая панель). Глубина ее составляет 2.9 км, радиус на поверхности мишени равен 4 км. Предполагалось, что остаточная и индуктивная намагниченности пород внутри каверны равны нулю.

В 2004 г. было проведено бурение кратера Босумтви в рамках программы ICDP [Koeberl et al., 2007]. Картины магнитного поля приведены в работах [Plado et al., 2000; Ugalde et al., 2007]. Данные по бурению [Elbra et al., 2007; Kontny et al., 2007] были использованы для построения модели для расчета магнитной аномалии.

Скважина LB-08A была пробурена сквозь озерные отложения в центральное поднятие кратера, скважина LB-07A – в углубление вокруг центрального поднятия. Расположение скважин LB-07A и LB-08A, в частности, показано на рис. 20 в работе [Koeberl et al., 2007], скважина LB-08A находится ближе к центру кратера. В работе [Kontny et al., 2007] сообщалось, что слой импактитов начинался с глубин 255 и 347 м, скважины доходили до глубин 447 и 539 м. В среднем, этот слой характеризуется магнитной восприимчивостью $10^{-4} \dots 10^{-3}$ SI, термоостаточной намагниченностью $10^{-2} \dots 10^{-1}$ А/м с преобладающей нормальной полярностью, числом Кенигсбергера порядка 2–3. На глубине 376 м в скважине LB-07A был также выделен слой мощностью примерно 2 м с высоким значением остаточной намагниченности, равной 1–43 А/м.

При моделировании мы задавали одинаковые магнитные свойства вещества в слое импактитов, типичные для образцов керна, извлеченного из скважин. Образцы из скважин имели размеры порядка 10 см. Хотя сами скважины были разнесены на расстояние около километра, образцы имели сходные петрофизические и магнитные свойства (за исключением высокомагнитных импактитов), поэтому такое допущение оправданно.

В данной работе при построении модели кратера Босумтви для расчета магнитной аномалии, огрубляя данные по магнитным свойствам образцов, мы выделили импактиты I и II. Породы, которые обозначены как импактиты I, были идентифицированы в обеих скважинах, импактиты II, с более высокой намагниченностью, были найдены только в скважине LB-07A. Слой импактитов I геометрически описывался как цилиндр и центральная горка, а слой импактитов II – как цилиндрическое кольцо. Также рассматривалось влияние кратерного вала, состоящего из пород мишени. Размеры были выбраны на основе данных по бурению и результатов численного моделирования. Они приведены в таблице. Выбранные размеры слоев обоих видов импактитов достаточно условны. Расположение и размеры магнитной каверны, слоев импактитов, центрального поднятия

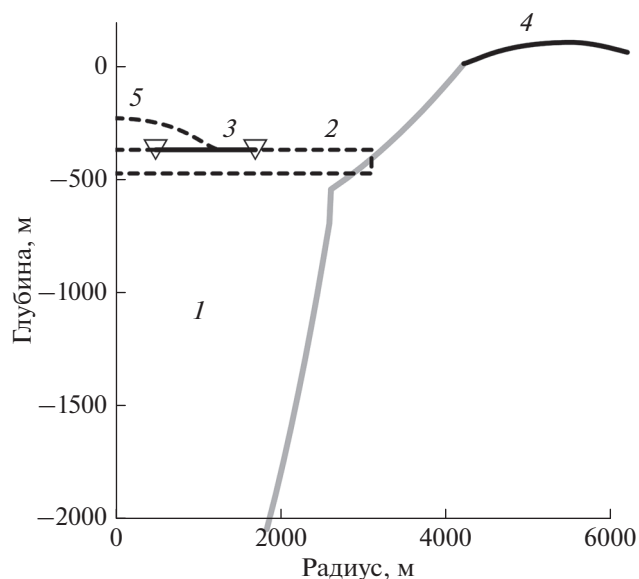


Рис. 4. Вертикальный разрез модели кратера, используемой для расчета магнитной аномалии: 1 – магнитная каверна (отделена от пород мишени серой кривой), нижняя ее часть не показана; 2 – слой импактитов I (выделен пунктиром); 3 – слой импактитов II (показан жирной черной линией с треугольниками); 4 – кратерный вал (черная кривая), сложен породами мишени; 5 – центральная горка (пунктирная кривая), сложена импактитами I.

и кратерного вала показаны на рис. 4. В расчетах на приведенные фигуры накладывается довольно крупная ортогональная сетка, геометрические формы огрубляются. В таблице приведена естественная термоостаточная намагниченность пород. Расположение пород мишени и слоев импактитов в таблице описывается глубиной залегания и мощностью. Глубина залегания определяет положение самого верхнего слоя породы, мощность слоя отсчитывается от него в глубину, величина мощности приведена в скобках. Кратерный вал и центральная горка описываются местоположением основания (в таблице приводится глубина залегания основания) и высотой морфологического образования такого, как вал и центральная горка, которая отсчитывается от основания вверх, высота заключена в скобки.

Так как Босумтви – молодой кратер, то направление магнитных моментов импактитов I и II, вызванных остаточной намагниченностью, выбрано таким же, как у пород мишени, т.е. по локальному геомагнитному полю.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ

На рис. 5 показаны аномалии, вызванные магнитной каверной (слева) и кратерного вала (справа). Аномалия поля, создаваемая магнитной ка-

Таблица 1. Физические свойства и размеры слоев пород мишени и кратера

Среда	Магнитная восприимчивость, ед. SI	Естественная термоостаточная намагниченность, А/м*	Глубина залегания, мощность или высота, м	Наклонение, склонение, град	Форма, размеры, км
Породы мишени	10^{-4}	0	0 (3850)	–12, –6	Прямоугольный параллелепипед: $30 \times 20 \times 4$
Магнитная каверна	0	0	0 (2900)	Не используется	По форме размагниченной области, максимальный радиус: 4.0
Импактиты I	0	0.037	–375 (100)	–12, –6	Прямой круговой цилиндр, радиус: 3.1
Импактиты II	0	3	–375 (3)	–12, –6	Цилиндрическое кольцо, внутренний радиус: 0.5, внешний радиус: 1.7
Кратерный вал 4	10^{-4}	0	0 (140), высота	–12, –6	Кольцевой. Профиль по высоте задан кривой 4
Центральная горка	0	0.037	–375 (140), высота	–12, –6	Основание – круг с радиусом 1.4, профиль по высоте задан кривой 5

Примечание: *число Кенигсбергера для исходных пород мишени меньше 1, поэтому на данном этапе моделирования мы не учитывали остаточную намагниченность, которая предполагалась нулевой. Для импактитов число Кенигсбергера в несколько раз больше 1, поэтому, проводя моделирование, мы не учитывали влияния индуктивной намагниченности, и она показана в таблице как нулевая.

верной, эквивалентна аномалии, создаваемой намагниченным телом с отрицательным магнитным моментом, величина и направление которого определяются локальным геомагнитным полем и магнитной восприимчивостью пород мишени. Чем больше восприимчивость, тем сильнее выражена аномалия. Величина и вид магнитной аномалии зависят от высоты наблюдения [Кузьмичева, Иванов, 2020].

Магнитная аномалия, образованная магнитной каверной сложного кратера, в основном, отрицательная. Центр кратера находится в точке с координатами 0.0. Аномалия по уровню –2 нТ лежит в пределах диаметра кратера. Картина аномалии приведена для высоты 140 м над первоначальным уровнем поверхности, в которую ударило падающее космическое тело. Расчеты показали [Кузьмичева, Иванов, 2020], что основной вклад в аномалию вносят верхние 300 м. Учет влияния кратерного вала добавляет положительную аномалию по окружности кратера, мало влияя на величину аномалии в центре кратера. Если за счет эрозии исчезает кратерный вал и намагниченные

импактиты, находящиеся внутри кратера, то остаточная аномалия будет отрицательной, как было показано в работе [Plado et al., 1999].

На рис. 6 представлены результаты расчета магнитной аномалии Босумтви с учетом влияния магнитной каверны, центрального поднятия, слоев импактитов, кратерного вала. Слева показана картина магнитной аномалии на высоте 140 м над уровнем мишени, справа – на диаметре в направлении юг–север на высоте 70 м. Значения измерений аномалии магнитного поля кратера Босумтви на диаметре юг–север были представлены на рис. 3 в работе [Ugalde et al., 2007]. На рис. 6 справа показаны отсканированный график величины магнитной аномалии, полученной в результате измерений (сплошная серая кривая), расчетная кривая (сплошная черная кривая) и расчетная кривая из работы [Кузьмичева, Иванов, 2020] (пунктирная черная кривая).

Центральное поднятие и слои импактитов создают мелкомасштабные аномалии внутри диаметра кратера. Результаты, описываемые сплошной черной кривой, получены на более мелкой

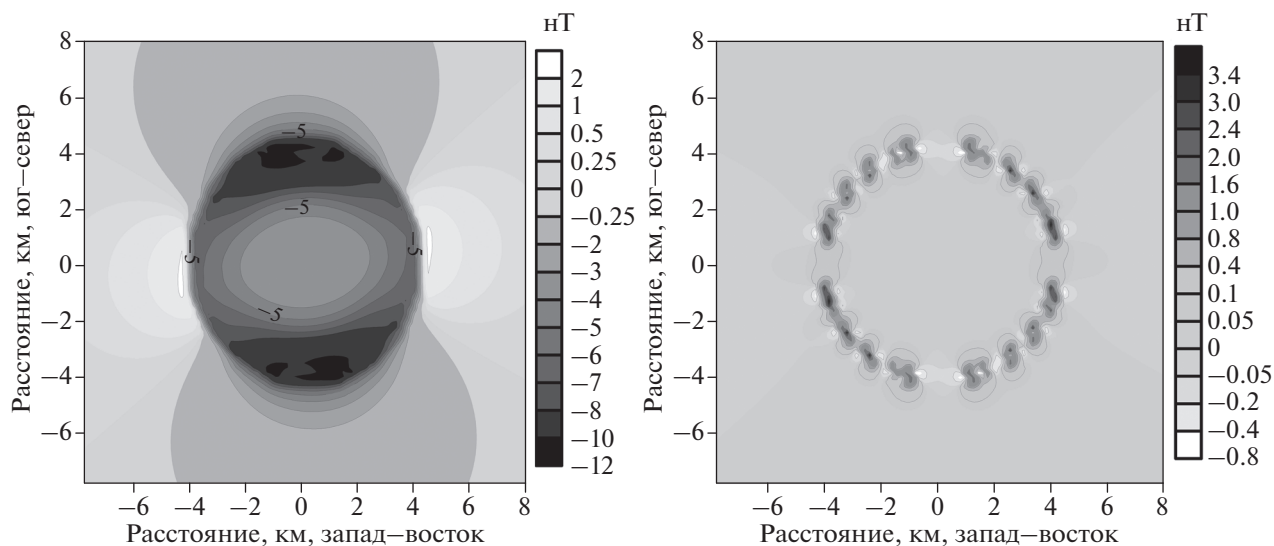


Рис. 5. Магнитные аномалии (нТ) на высоте 140 м: магнитной каверны – слева, кратерного вала – справа.

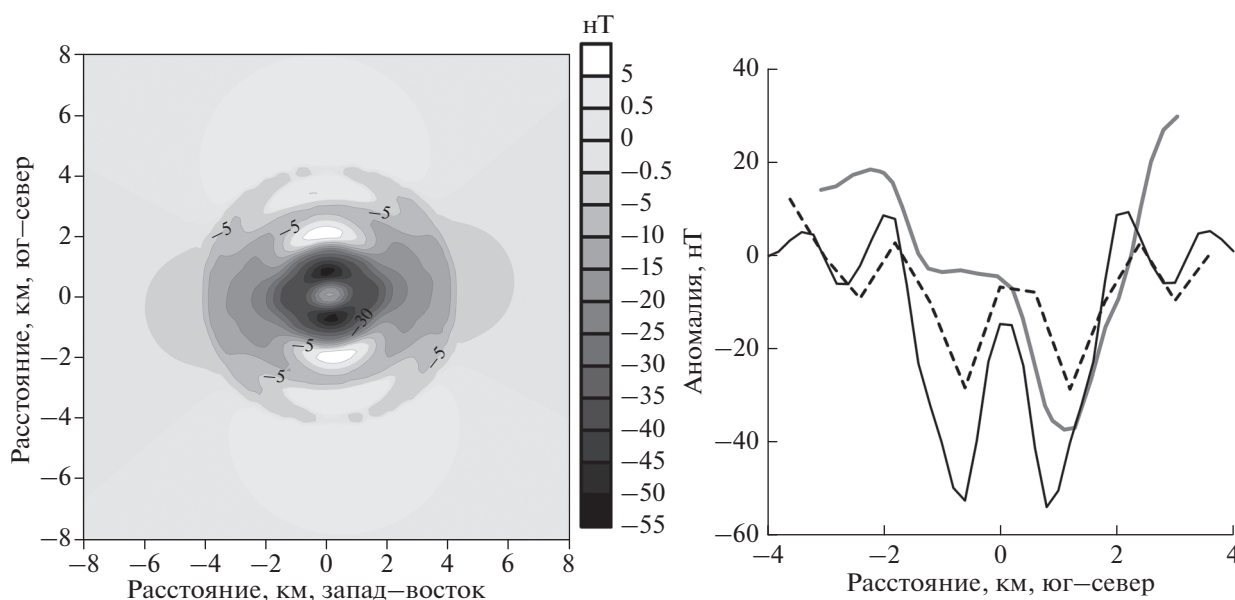


Рис. 6. Магнитные аномалии (нТ), полученные с учетом влияния магнитной каверны, центрального поднятия, слоев импактитов, кратерного вала и данных измерений. Слева – общий вид магнитной аномалии на высоте 140 м над уровнем мишени, справа – значения аномалий на высоте 70 м вдоль диаметра в направлении юг–север. Сплошная серая кривая – данные измерений, сплошная черная кривая – результат численного моделирования, пунктирная черная кривая – результат моделирования из работы [Кузьмичева, Иванов, 2020].

сетке, чем величины, представленные пунктирной кривой, при дальнейшем дроблении сетки они уже мало меняются. Учет формы центрального поднятия (сплошная черная кривая) не оказал существенного влияния на величину аномалии по сравнению с предыдущей работой (пунктирная черная кривая). При проведении расчетов фоновое поле, создаваемого породами мишени, составляло примерно 20 нТ (предельное значе-

ние). При уменьшении задаваемых размеров мишени, поле уменьшалось, но вариации фонового поля не оказывают влияния на величину аномалий.

Амплитуды измеренной магнитной аномалии (серая сплошная кривая, рис. 6 справа) составляют несколько десятков нТ, что близко к тому, что получается в результате моделирования. Общий ход кривых (минимум с локальным максимумом в центре) довольно близок. Пространственное рас-

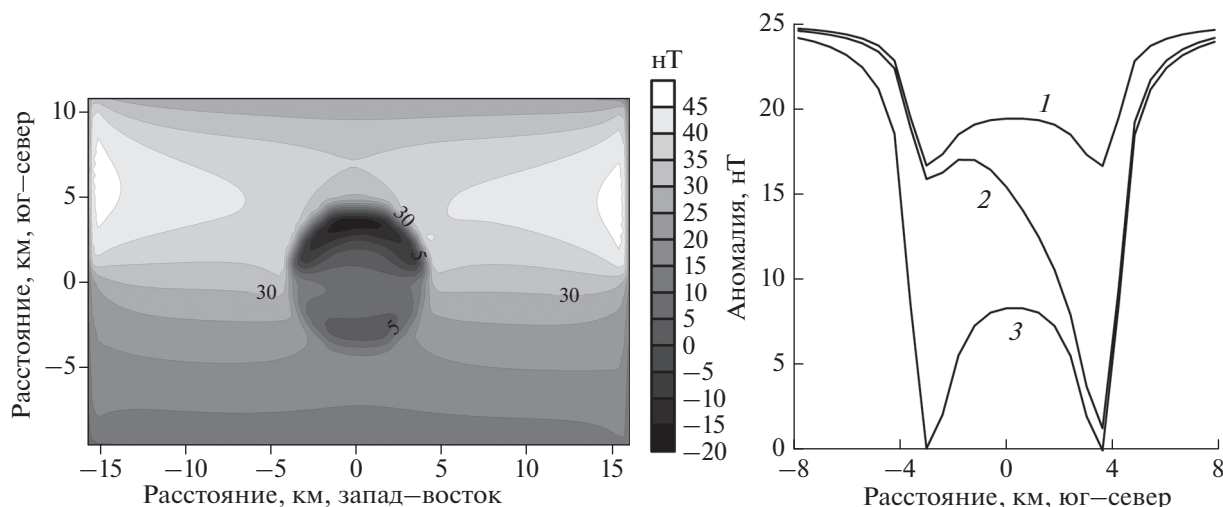


Рис. 7. Аномалия магнитной каверны (нТ) в неоднородной мишени 1 с повышенной магнитной восприимчивостью 3×10^{-4} SI в положительной полуплоскости координаты y вместе с полем мишени на высоте 70 м (левая панель). Справа – значения аномалий магнитной каверны на диаметре юг–север на высоте 70 м. Кривая 1 получена для однородной мишени с магнитной восприимчивостью 10^{-4} SI; кривая 2 – для неоднородной мишени 1 с повышенной магнитной восприимчивостью 3×10^{-4} в положительной полуплоскости координаты y ; кривая 3 – для мишени 2, где области с разными восприимчивостями (3×10^{-4} слева, 10^{-4} справа) разделены наклонной линией в соответствии с геологической картой местности вокруг кратера Босумтви [Koeberl et al., 2007].

положение максимумов и минимумов вдоль диаметра на экспериментальной кривой соответствует магнитной аномалии, вызываемой импактитами. При выделении аномалии из данных измерений определение фонового поля является нетривиальной задачей для геофизиков и может вносить ошибку в приводимые величины. Поэтому мы допускаем, что экспериментальная кривая на рис. 6 завышена и должна быть смещена вниз примерно на 15–20 нТ, т.е. на величину, близкую к расчетному фоновому полю, чтобы выходить на ноль при отрицательных значениях координаты x .

Несимметричность экспериментальной кривой может быть вызвана неоднородностью пород мишени [Plado et al., 2000], которая не учитывалась при моделировании в работе [Кузьмичева, Иванов, 2020]. Результаты исследования влияния неоднородности мишени на магнитную аномалию кратера представлены на рис. 7 и рис. 8. Было проведено моделирование аномалии, вызванной магнитной каверной в неоднородных мишенях 1 и 2. В расчете, результаты которого приведены на рис. 7 (левая панель), породы мишени 1, расположенные в полуплоскости положительных значений координаты y , имели магнитную восприимчивость в 3 раза большую, чем породы в полуплоскости отрицательных значений y . Чтобы лучше продемонстрировать неоднородность мишеней, на рис. 7 и рис. 8 слева показаны аномалии магнитного поля совместно с полем мишени. На рис. 8 (слева) показана аномалия магнитной каверны, рассчитанная для неоднородной мишени 2. Магнитная восприимчивость пород мишени 2 в

области снизу и справа за наклонной линией в три раза меньше, чем в остальной области. Такое расположение пород в первом приближении моделирует геологическую карту местности вокруг кратера Босумтви (рис. 4 из работы [Koeberl et al., 2007]), где показано наличие метаосадочных и метавулканических пород. Линия раздела проходит в стороне от кратера. На правой панели рис. 7 показаны аномалии магнитной каверны на диаметре юг–север, рассчитанные для однородной мишени с магнитной восприимчивостью 10^{-4} SI (рис. 5 слева), кривая 1, для неоднородной мишени 1 (рис. 7 слева), кривая 2, для неоднородной мишени 2 (рис. 8, слева), кривая 3. Неоднородность мишени 2 не оказывает влияния на величину аномалии на диаметре юг–север. У кривой 2 нарушена симметричность вследствие нахождения неоднородности в области кратера.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как правило, породы, возникшие в результате удара и/или содержащие застывший ударный расплав, обладают высокой остаточной намагниченностью, и именно они считаются источником магнитной аномалии. Намагниченность сильно зависит от состава пород мишени, наличия минералов, содержащих железо, размера ферромагнитных зерен. Для кратера Босумтви до старта программы бурения ICDP были получены оценки ожидаемого количества застывшего расплава в виде линз или обогащенного расплавом зювита [Plado et al., 2000] и проведено численное модели-

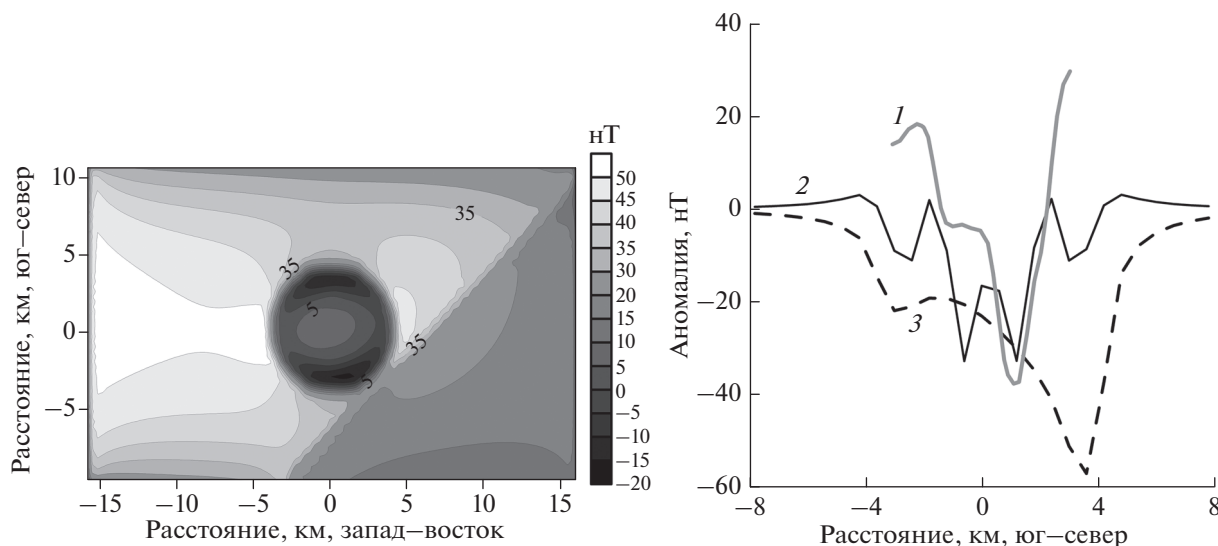


Рис. 8. Аномалия магнитной каверны (нТ) в неоднородной мишени 2 вместе с полем мишени на высоте 70 м, где области с разными восприимчивостями, 3×10^{-4} (слева и сверху), 10^{-4} (справа и снизу), разделены наклонной линией в соответствии с геологической картой местности вокруг кратера Босумтви [Koeberl et al., 2007], (левая панель). Справа – значения магнитных аномалий на диаметре юг–север на высоте 70 м. Сплошная серая кривая 1 – данные измерений, сплошная черная кривая 2 – результат моделирования магнитной аномалии кратера, пунктирная черная кривая 3 – аномалия магнитной каверны в неоднородной мишени 1.

рование [Artemieva et al., 2004], в результате которого было получено распределение расплава в кратере. В работе [Plado et al., 2000] проводилось прямое моделирование магнитной аномалии, вызванное высокомагнитным телом внутри кратера, предположительно породами, содержащими затвердевший ударный расплав, однако в ходе последующего бурения достаточного объема таких пород обнаружено не было.

В работе [Ugalde et al., 2007] решалась обратная задача: с использованием данных магнитной съемки высокого разрешения на поверхности озера Босумтви, данных гравитационной съемки, данных сейсмических исследований. Была предложена 3d-модель источников магнитной аномалии, в которой предполагалось наличие магнитного источника в северо-восточной части кратера, вдали от пробуренных скважин. Как и в работе [Plado et al., 2000], в работе [Ugalde et al., 2007] был сделан вывод, что существуют нераскрытые источники магнитной аномалии с намагниченностью большей, чем была обнаружена в выходах импактитов. Авторы работы [Ugalde et al., 2007] предположили, что источники магнитной аномалии связаны не с наличием пород, содержащих затвердевший расплав, а с особенностями пород мишени, на которых был образован кратер.

Для кратера Босумтви типичны источники магнитных аномалий, характерные для всех сложных кратеров. К ним можно отнести наличие “магнитной каверны”, включающей размагниченное вещество и полость в мишени, образо-

вавшуюся в ходе выброса вещества и модификации кратера, наличие импактитов, обладающих повышенной намагниченностью, кратерный вал. Величину аномалии определяют приповерхностные источники в большей степени, чем заглубленные, поэтому отрицательная аномалия, связанная с “каверной”, близка к размеру кратера. Положительные аномалии, связанные с импактитами, расположены внутри кратера. На вид магнитной аномалии должны влиять изменения морфологии кратера за счет эрозии [Plado et al., 1999], когда из-за исчезновения кратерного вала и центрального поднятия проявляется отрицательная аномалия, связанная с магнитной каверной.

С точки зрения моделирования вклада импактитов важны их магнитные свойства, глубина залегания, размеры занимаемой области, особенно в приповерхностной части. Аномалию определяет эквивалентный магнитный момент намагниченных тел, что, в частности, показало моделирование магнитной аномалии с учетом центрального поднятия. Полученные результаты близки к тому, что было получено для диска импактитов примерно той же мощности на той же глубине залегания [Кузьмичева, Иванов, 2020]. По результатам моделирования, представленным в данной работе, мы считаем, что положительная магнитная аномалия в кратере Босумтви порождается намагниченными импактитами в виде зювитов, которые вызывают аномалию, подобную аномалии когерентного слоя застывшего ударного расплава. К примеру, при моделировании магнитной

аномалии кратера Босумтви, вызванной породами, содержащими застывший ударный расплав, в работе [Plado et al., 2000] предполагалось, что верхний слой расплава занимает область в несколько км², имеет толщину 50 м, термоостаточную намагниченность 0.367 А/м, магнитную восприимчивость 33×10^{-4} SI. Магнитные свойства и форма, которую принимал объем расплава, подобрились так, чтобы наилучшим образом воспроизвести магнитную аномалию. И хотя при глубоком бурении слой затвердевшего расплава не был обнаружен, в скважине LB-07A был выявлен слой магнитных импактитов с термоостаточной намагниченностью в диапазоне 1...43 А/м мощностью несколько метров [Kotny et al., 2007]. Магнитный момент такого слоя эквивалентен магнитному моменту слоя затвердевшего расплава, предложенного в работе [Plado et al., 2000].

Используемые в геологической практике методы выделения магнитных аномалий ориентированы на выделения аномалий от рудных тел, залегающих под поверхностью. В этом случае аномалии, вызываемые морфологическими поверхностными элементами, рассматриваются как помехи, их стараются исключить. Результаты моделирования показывают (рис. 5), что наличие кратерного вала изменяет общую картину аномалии, однако не проявляется в центре кратера. В окрестности кратерного вала, доступной для изучения, были также найдены выходы зювитов, что может увеличить магнитную аномалию. В дальнейшем предполагается учесть влияние выходов зювитов на поверхности кратерного вала [Koeberl et al., 2007].

Кривые, приведенные на рис. 8 справа, дают возможность сделать предположения об источниках магнитных аномалий кратера Босумтви. Масштаб, расположение максимумов и минимумов на экспериментальной кривой более или менее соответствует аномалии, вызываемой импактитами. Глубинное бурение проводилось в северной части кратера, мы не знаем точно, что находится в южной части. В работе [Koeberl et al., 2007] сообщалось о гранитоидных дайках в месте расположения кратера. Возможно, что неоднородные по составу породы мишени находятся ближе к центру кратера, и тогда они могут влиять на симметричность аномалии. Авторы полагают, что форма кривой имеет большее значение, чем значения величины амплитуд.

Новый метод моделирования магнитных аномалий, предложенный в работе [Кузьмичева, Иванов, 2020] и использованный в данной статье, прост в реализации, он позволяет учесть влияние морфологии кратера на магнитную аномалию. Полученные этим методом результаты хорошо согласуются с результатами, полученными традиционным методом [Plado et al., 1999].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено моделирование образования кратерной полости и области размагниченного под действием ударной волны вещества при возникновении и модификации сложного кратера на примере кратера Босумтви, называемой здесь “магнитной каверной”. Показано, что форма “магнитной каверны” зависит от принятого в расчетах уравнения состояния, так же как и от параметров ударника при одинаковых размерах возникшего кратера.

Показано, что с “магнитной каверной” связана отрицательная магнитная аномалия на уровне мишени, совпадающая, в основном, с размерами кратера. Абсолютная величина аномалии тем больше, чем больше намагниченность пород мишени. Верхняя часть “каверны” оказывает наиболее сильное влияние на величину поверхностной аномалии в силу близости к измерительным приборам. Неоднородность магнитных свойств пород мишени вызывает несимметричность аномалии.

Показано, что кратерный вал оказывает влияние на вид магнитной аномалии, но не в центре кратера, где основное влияние оказывают импактиты, залегающие в том числе и в центральной горке.

Тот факт, что при бурении вблизи центра Босумтви не было обнаружено когерентного слоя затвердевшего расплава, но были найдены импактиты с высокой остаточной намагниченностью, может служить подтверждением связи положительной магнитной аномалии с импактитами.

Сравнение экспериментальной кривой с результатами моделирования указывает на необходимость уточнения геологической карты в районе кратера, так как несимметричность магнитной аномалии указывает на неоднородность несущих пород.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую признательность рецензентам за внимательный разбор рукописи и ценные предложения по ее улучшению. Авторы попытались максимально учесть замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кузьмичева М.Ю., Иванов Б.А. Моделирование магнитной аномалии, связанной со сложным кратером, на примере кратера Босумтви // Астрон. Вест. 2020. Т. 54. № 5. С. 1–13.
- Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теоретическая физика: теория поля, том 2. М.: Физматлит. 2018. 508 с.
- Меллош Г. Образование ударных кратеров: геологический процесс. М.: Мир. 1994. 336 с.

- Страхов В.Н.* Определение некоторых основных параметров намагниченных тел по данным магнитных наблюдений // Изв. АН СССР: Сер. Геофиз. 1956. № 2. С. 144–156.
- Храмов А.Н., Гончаров Г.И., Комиссарова Р.А. и др.* Палеомагнитология / Под ред. Храмова А.Н. Л: Недра. 1982. 312 с.
- Artemieva N., Karp T., Milkereit B.* Investigating the Lake Bosumtwi impact structure: Insight from numerical modeling // *Geochem., Geophys., Geosyst.* 2004. V. 5. № 11. P. 1–20.
- Collins G.S., Melosh H.J., Ivanov B.A.* Modeling damage and deformation in impact simulations // *Meteorit. Planet. Sci.* 2004. V. 39 № 2. P. 217–231.
- Elbra T., Kontny A., Pesonen L.J., Schleifer N., Schell C.* Petrophysical and paleomagnetic data of drill cores from the Bosumtwi impact structure, Ghana // *Meteorit. Planet. Sci.* 2007. V. 42. № 4–5. P. 829–838.
- Ferriere L., Koeberl C., Ivanov B.A., Reimold W.U.* Shock metamorphism of Bosumtwi impact crater rocks, shock attenuation, and uplift formation // *Science.* 2008. V. 322. № 5908. P. 1678–1681.
- Ivanov B.A.* Numerical modeling of the largest terrestrial meteorite craters // *Sol. Syst. Res.* 2005. V. 39. P. 381–409.
- Ivanov B.A., Melosh H.J., Pierazzo E.* Basin-forming impacts: Reconnaissance modeling. GSA Special Papers 465 / Eds. R.L. Gibson, W.U. Reimold. 2010. P. 29–49.
- Koeberl C., Milkereit B., Overpeck J.T., Scholz C.A., Amoako P.Y.O., Boamah D., Danuor S., Karp T., Kueck J., Hecky R.E., King J.W., Peck J.A.* An international and multidisciplinary drilling project into a young complex impact structure: The 2004 ICDP Bosumtwi Crater Drilling Project – An overview // *Meteorit. Planet. Sci.* 2007. V. 42. P. 483–511.
- 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. Planet. Sci.* 2007. V. 42. № 4–5. P. 811–827.
- Melosh H.J.* Acoustic fluidization – A new geologic process // *J. Geophys. Res.* 1979. V. 84. № B13. P. 7513–7520.
- Melosh H.J., Ivanov B.A.* Impact Crater Collapse // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 1999. V. 27. P. 385–415.
- Mohit P.S., Arkani-Hamed J.* Impact demagnetization of the martian crust // *Icarus.* 2004. V. 168. № 2. P. 305–317.
- Oliveira J.S., Wieczorek M.A., Kletetschka G.* Iron Abundances in Lunar Impact Basin Melt Sheets From Orbital Magnetic Field Data // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2017. V. 122. P. 2449–2444.
- Pierazzo E., Vickery A.M., Melosh H.J.* A reevaluation of impact melt production // *Icarus.* 1997. V. 127. P. 408–423.
- Pilkington M., Hildebrand A.R.* Transient and disruption cavity dimensions of complex terrestrial impact structures derived from magnetic data // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. № 21. P. 2087–2990.
- Plado J., Pesonen L., Puura V.* Effect of erosion on gravity and magnetic signatures of complex impact structures: Geophysical modeling and applications. Special Paper 339: Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution II / Eds. B.O. Dressler, V.L. Sharpton. 1999. P. 229–239.
- Plado J., Pesonen L.J., Koeberl C., Elo S.* The Bosumtwi meteorite impact structure, Ghana: A magnetic model // *Meteorit. Planet. Sci.* 2000. V. 35. № 4. P. 723–732.
- Schmieder M., Kring D.* Earth's Impact Events Through Geologic Time: A List of Recommended Ages for Terrestrial Impact Structures and Deposits // *Astrobiology.* 2020. V. 20. P. 1–51.
- Spohn T.* Physics of Terrestrial Planets and Moons: An Introduction and Overview. Treatise on Geophysics (Second Edition) / Ed. G. Schubert. 2015. P. 1–22.
- Tillotson J.H.* Metallic equations of state for hypervelocity impact. General Atomic Report GA-3216. 1962. 141 p.
- Ugalde H., Morris W.A., Pesonen L.J., Danuor S.K.* The Lake Bosumtwi meteorite impact structure, Ghana – Where is the magnetic source? // *Meteorit. Planet. Sci.* 2007. V. 42. № 4–5. P. 867–882.
- Ugalde H.A., Artemieva N., Milkereit B.* Magnetization on impact structures- Constrains from numerical modeling and petrophysics. Special Paper 384: Large Meteorite Impacts III / Eds. T. Kenkmann, F. Hörz, A. Deutsch. 2005. P. 25–42.
- Wieczorek M.A.* Strength, Depth, and Geometry of Magnetic Sources in the Crust of the Moon From Localized Power Spectrum Analysis // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2018. V. 123. P. 291–316.

Modeling the Magnetic Anomaly of the Bosumtwi (Ghana) Complex Meteorite Crater by Taking into Account the Impact Demagnetization and Morphological Features

M. Yu. Kuzmicheva^{a,*} and B. A. Ivanov^{a,**}

^a*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*

**e-mail: mukuzm@gmail.com*

***e-mail: boris_a_ivanov@mail.ru*

The formation of impact craters on the Earth's surface is accompanied by the effect of shock waves on rocks. The shock wave compression results in rocks heating up to the point of melting and evaporation during unloading. The direct mechanical action of shock compression and residual heating change the magnetic properties of rocks. Geophysical modeling is used to determine the sources of the magnetic anomaly by interpret-

ing the fields measured on the surface, but such modeling does not take into account the impact demagnetization of rocks. This work gives an example of analysis of the magnetic anomaly over the well-studied Bosumtwi crater (Ghana, 10.5 km diameter, 1 million years old), including the numerical modeling of the crater formation process and the construction of a magnetic anomaly model based on the simulated shock compression parameters and crater drilling data. It is shown that the morphological features of the crater – the crater rim and the central uplift – form positive magnetic anomalies around and inside the crater.

Keywords: numerical modeling, Bosumtwi meteorite crater, magnetic anomaly