

УДК 523.44+523.681

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ, СВЯЗАННОЙ СО СЛОЖНЫМ КРАТЕРОМ, НА ПРИМЕРЕ КРАТЕРА БОСУМТВИ

© 2020 г. М. Ю. Кузьмичева^а, *, Б. А. Иванов^а

^аИнститут динамики геосфер РАН, Москва, Россия

*e-mail: mukuzmgm@gmail.com

Поступила в редакцию 09.12.2019 г.

После доработки 12.03.2020 г.

Принята к публикации 25.03.2020 г.

Образование ударных кратеров на поверхности Земли и других планетных тел сопровождается воздействием ударных волн на горные породы и их перемещением в новое положение. Ударно-волновое сжатие приводит к возникновению остаточного нагрева горных пород (вплоть до плавления и испарения при разгрузке). Прямое механическое действие ударного сжатия и остаточный нагрев изменяют магнитные свойства и намагниченность горных пород, что приводит к возникновению магнитной аномалии над областью кратера. В данной работе представлен пример комплексного анализа магнитной аномалии над хорошо исследованным ударным кратером Босумтви (Гана, диаметр около 10 км), включающего численное моделирование процесса образования кратера и построение модели магнитной аномалии на основании смоделированных параметров ударного сжатия. Комплексная модель демонстрирует хорошее соответствие с данными прямых измерений.

Ключевые слова: метеоритный кратер, моделирование, магнитная аномалия, намагниченность, импактиты

DOI: 10.31857/S0320930X20050059

ВВЕДЕНИЕ

Полеты космических аппаратов к планетным телам земной группы позволили измерить магнитные поля на их поверхности и сделать на основании их наличия и геометрии существенные 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). Магнитные источники в лунной коре находятся на глубине 10–20 км, где они могли сформироваться в присутствии поля, генерируемого в ядре (Wieczorek, 2018). Магнитные аномалии в бассейне Южный полюс – Эйткен связывают с источниками, близкими к поверхности. Отсутствие магнитных источников на большей части поверхности Луны объясняют процессами ударного размагничивания, т.е. изменением магнитных свойств горных пород в процессе образования ударных кратеров. Ударное размагничивание также рассматривается в качестве одного из главных процессов, сформировавших нынешнее состояние магнитного поля коры Марса (Mohit, Arkani-Named, 2004). Остановка марсианского динамо и прекращение генерации планетарного магнитного поля облегчает интерпретацию кратерных магнитных аномалий на Марсе. Поэтому исследования воздей-

ствия высокоскоростных ударов на магнитные свойства коры планет продолжает вызывать интерес исследователей.

Земные метеоритные кратеры позволяют изучать ударные магнитные аномалии как путем определения магнитных полей над ударными структурами, так и лабораторными измерениями магнитных свойств и исходных и измененных горных пород и составляющих их минералов. Для оценки геометрии источников магнитных аномалий по измерению полей на поверхности используется геофизическое моделирование. Как правило, 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). Земные кратеры доступны для изучения, но вследствие эрозии, геодинамических процессов и наличия геомагнитного поля магнитные аномалии, связанные с кратерами, сложнее интерпретировать, а используемые полуаналитические модели геометрии источников далеки от совершенства (Plado и др., 1999; 2000; Artemieva и др., 2004; Ugalde и др., 2005; Elbra и др., 2007; Kontny и др., 2007; Ugalde и др., 2007).

Ударные кратеры характеризуются наличием аномалий геофизических полей, определяемых

совокупностью ударных процессов и послееударной модификации среды. 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), образованию полости в мишени (так называемому промежуточному кратеру, стадия экскавации), которая затем модифицируется в конечный кратер большего диаметра и меньшей глубины с валом (стадия модификации). Эта статья посвящена моделированию частного случая геофизического поля ударного кратера – магнитной аномалии над кратером Босумтви (Гана, $6^{\circ}30'26''$ с.ш., $1^{\circ}24'24''$ з.д.).

Кратер Босумтви является самым молодым (возраст ~1 млн лет) среди известных земных метеоритных кратеров диаметром около 10 км. Кратер хорошо изучен геологическими и геофизическими методами, включая бурение вблизи центрального поднятия кратера (Koeberl и др., 2007).

По размеру конечного кратера и связанного с ним промежуточного кратера можно оценить энергию, выделившуюся при ударе. В некоторых случаях данные по магнитным аномалиям кратеров позволяют оценить размер кратера независимым образом (Pilkington, Hildebrand, 2003) и, соответственно, энергию удара.

ИЗМЕНЕНИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МИНЕРАЛОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ КРАТЕРООБРАЗУЮЩЕГО УДАРА

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 и др., 2005). Уже существующая намагниченность минералов может уменьшиться или исчезнуть под воздействием ударной волны (Ugalde и др., 2005). Принято считать, что ударное размагничивание вызвано изменением свойств магнитных минералов в породах, в то время как застывший расплав и брекчии приобретают повышенную, по сравнению с исходной породой, магнитную восприимчивость и новую остаточную намагниченность (Ugalde и др., 2005). В результате кратерообразующего удара магнитные свойства поверхности мишени также изменяются за счет выброса грунта, за счет его перемещения (Ugalde и др., 2005).

ДОПУЩЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ

Магнитные свойства пород мишени и импактитов

Породы мишени, в которых образовался кратер, и импактиты, которые возникли в результате высокоскоростного удара метеороида, обладают индуктивной намагниченностью, зависящей от магнитной восприимчивости пород и от величины магнитного поля Земли в данном месте в настоящее время, и остаточной намагниченностью, сохраняющей направление магнитного поля во время образования породы. Магнитная аномалия определяется относительно современного магнитного поля, соответственно, она может быть развернута относительно направления поля в настоящее время (Plado и др., 1999).

Породы мишени, по которой ударило космическое тело, как правило, заметно старше возраста кратера, для них мы пренебрегаем величиной остаточной намагниченности, которая мала по сравнению с магнитным моментом, определяемым их магнитной восприимчивостью (Ugalde и др., 2007; Plado и др., 1999).

Импактиты приобретают новые, по сравнению с материнскими породами, магнитные свойства – повышенную магнитную восприимчивость и остаточную намагниченность, которая сохраняет направление палеомагнитного поля при охлаждении магнитных минералов импактитов ниже их точек Кюри в процессе послееударного остывания. При моделировании учитывалась только остаточная намагниченность слоя высокомагнитных импактитов (Kotny и др., 2007).

Метод расчета магнитного поля

Моделирование магнитного поля проводилось в рамках решения трехмерной задачи магнитостатики (Ландау, Лившиц, 1988) на кубической сетке, где среда рассматривалась как набор магнитных диполей с известными свойствами. Индукция магнитного поля рассчитывалась по формуле для точечного диполя (Oliveira и др., 2017, формула (3)). В работе (Oliveira и др., 2017) использовался подход, подобный нашему, для исследования магнитного поля коры Луны. Для моделирования магнитных аномалий кратеров ранее такой подход не применялся. Если размеры кубов 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. Кубическая сетка дает возможность описывать морфологические особенности среды, объем используемой памяти и быстродействие компьютера не являются ограничениями. Этот подход отличается от подхода, использованного в работах (Plado и др., 1999; 2000; Ugalde и др., 2007), основанного на определении

интегральных характеристик источников (Страхов, 1956). 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.

УДАРНОЕ РАЗМАГНИЧИВАНИЕ В ПРОЦЕССЕ ОБРАЗОВАНИЯ КРАТЕРА, ОБРАЗОВАНИЕ “МАГНИТНОЙ КАВЕРНЫ”

Ударное размагничивание пород мишени вызвано прохождением ударной волны при образовании ударного кратера в стадии сжатия и экскавации. Частичное размагничивание происходит уже при давлениях нескольких ГПа (Mohit, Arkani-Named, 2004; Reznik и др., 2015).

Начальные давления при контакте падающего тела и мишени превышают сотни ГПа, при разгрузке от таких давлений вещество ударника и мишени испаряется и плавится. На стадии экскавации происходит раскрытие кратера (диаметр кратера по уровню исходной поверхности принято называть диаметром переходного кратера – transient cavity diameter), ударная волна затухает, продвигаясь вглубь мишени. Переходный кратер имеет форму параболоида, на стадии модификации простого метеоритного кратера происходит сползание вещества со стенок и уменьшение глубины (Мелosh, 1994). Модификация кратеров с диаметром больше определенного, задаваемого соотношением относительной роли прочности и силы тяжести, происходит иначе.

На рис. 1 для иллюстрации показано образование кратера с конечным диаметром по гребню вала порядка 10 км в одном из вариантов моделирования, подробнее обсуждаемого ниже. Здесь видно, что ударная волна быстро распространяется от точки удара. Примерно за 2 с промежуточный кратер достигает максимальной глубины, а за ~10 с – максимального объема. Использование модели акустической флюидизации (Acoustic Fluidization – AF model) позволяет воспроизвести замечательное природное явление – коллапс переходного кратера с образованием центрального поднятия (Melosh, 1979; Melosh, Ivanov, 1999). При этом дно переходного кратера поднимается почти на уровень исходной поверхности мишени, а горные породы, испытавшие максимальные ударные сжатия (вплоть до плавления при разгрузке) образуют центральную горку.

Породы мишени, подвергшиеся ударной нагрузке более 3.5 ГПа, в данном моделировании рассматриваются как размагниченные (Mohit, Arkani-Named, 2004; Reznik и др., 2015). 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 размаг-

ничены, но мы полагаем, что в результате выбрасывания они перемешиваются, их магнитные моменты, обусловленные естественной остаточной намагниченностью, становятся разнонаправленными. В первом приближении мы считаем, что породы, образующие кратерный вал, не дают вклада в магнитное поле.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ СЛОЖНОГО КРАТЕРА НА ПРИМЕРЕ КРАТЕРА БОСУМТВИ С ПОМОЩЬЮ КОДА SALEB

Для моделирования магнитной аномалии, связанной со сложным кратером, был выбран кратер Босумтви (Plado и др., 2000) с диаметром 10.5 км и возрастом примерно миллион лет (Koeberl и др., 2007). Кратер Босумтви относится к сложным кратерам, у которых в стадии модификации за счет акустической флюидизации уменьшается отношение глубины к диаметру, и при превышении определенного размера наблюдается центральное поднятие (Melosh, 1979; Grieve и др., 1981; Melosh, Ivanov, 1999).

Первые результаты моделирования процесса образования кратера Босумтви, включая трехмерное моделирование ранней стадии удара, на которой образуются тектиты, были опубликованы в работе (Artemieva и др., 2004). Более подробное параметрическое моделирование образования кратера Босумтви проводилось в рамках анализа ударного метаморфизма в кернах скважин, пробуренных близи центрального поднятия в кратере (см., например, (Ferriere и др., 2008)) и, в особенности, материалы приложений к ней). Для данной работы были проведены новые расчеты с целью уточнить распределение ударных давлений в породах под кратерами для оценки зоны размагничивания. Задача решалась методами численного моделирования с использованием кода SALEB (Ivanov, 2005; Ivanov и др., 2010) в приближении вертикального удара. В такой постановке распределение максимальных давлений в ударной волне оценивается по максимальным значениям, зарегистрированным в процессе расчета в лагранжевых частицах, изначально помещенных в центр каждой расчетной ячейки. Физически картина распределения максимальных давлений определяется двумя последовательными процессами: (1) затуханием ударной волны по мере удаления от точки удара и (2) перемещением материала после прохождения ударной волны в конечное положение. При этом на второй процесс существенно влияют параметры модели акустической флюидизации, применение которой необходимо для воспроизведения формы сложного кратера с центральным поднятием.

Затухание ударной волны с удалением от точки удара определяется геометрическим расхождением ударной волны (форма ее фронта близка к обращенной вниз полусфере), уравнением состоя-

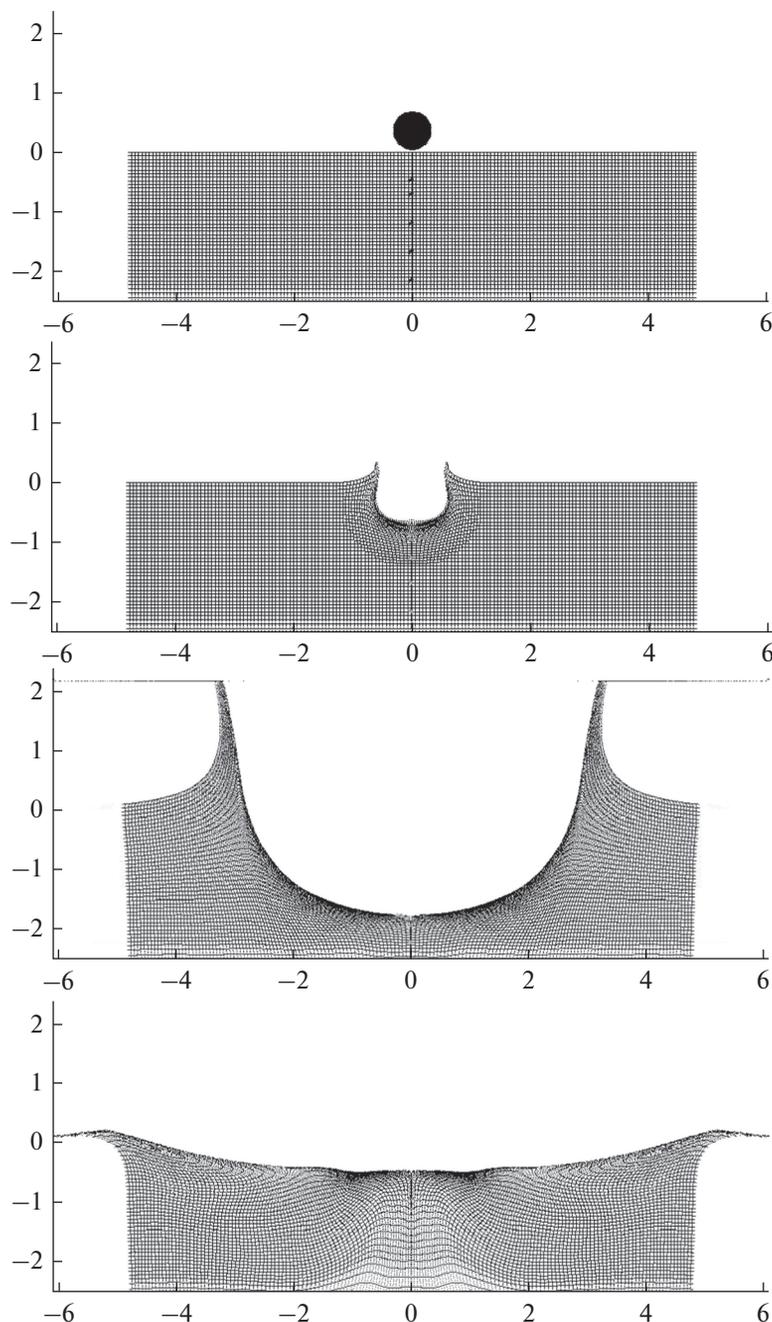


Рис. 1. Избранные моменты процесса образования кратера при вертикальном ударе. Сверху вниз – (1) начальная геометрия задачи; (2) 0.2 с после удара – деформация сетки лагранжевых трейсеров позволяет видеть распространение ударной волны; (3) – 10 с после удара – максимальный объем переходного кратера – в этот момент принято измерять диаметр переходного кратера; (4) – 60 с после удара – дно переходного кратера поднялось, образовав центральное поднятие. Расстояния на осях указаны в км. Нет вертикального растяжения рисунка.

ния горных пород и, на малых расстояниях, скоростью удара. В численных расчетах для кратера Босумтви мы сравнивали удары со скоростью 10 и 20 км/с. Низкие скорости близки к минимальной скорости удара по Земле (11.2 км/с), высокие скорости близки к средней скорости удара объектов, приближающихся к Земле с астероидных орбит. В качестве уравнения состояния горных пород мишени и ударника сравнивались модели Тиллотсона

и ANEOS, с параметрами, подобранными подгонкой под ударную адиабату гранита плотностью 2630 кг/м^3 (Tillotson, 1962; Pierazzo и др., 1997). Прочностные свойства гранита, использованные в модели, описаны в работе (Collins и др., 2004).

На рис. 2 сравниваются ударные адиабаты и температуры после разгрузки от максимального давления в ударной волне, рассчитанные по двум

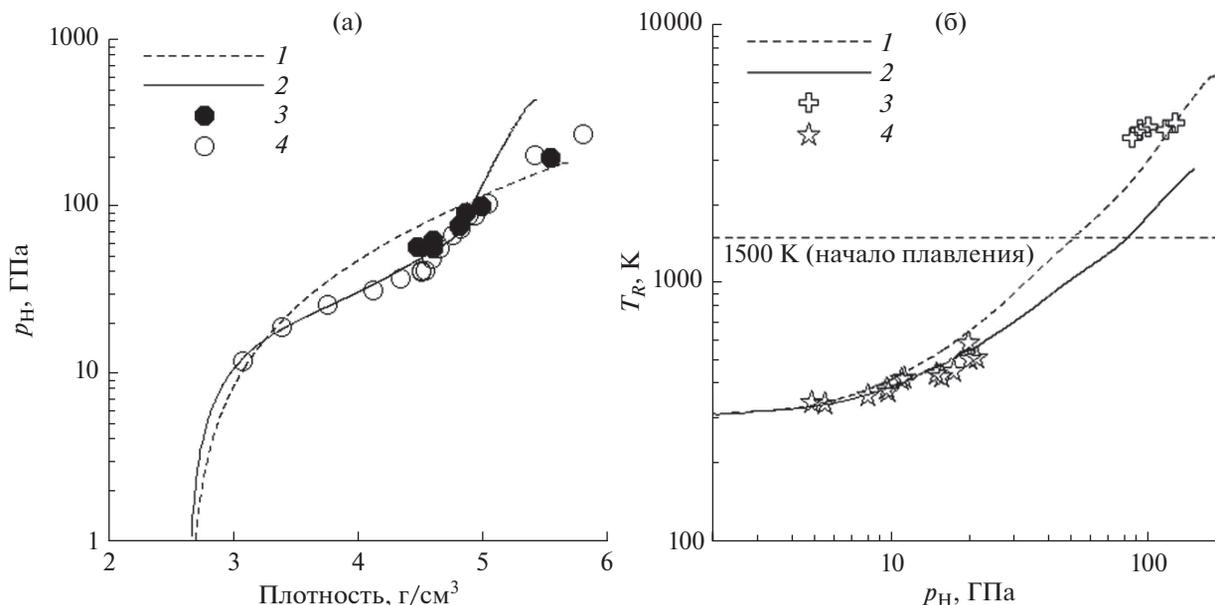


Рис. 2. (а) — ударные адиабаты модельного гранита, рассчитанные по уравнениям состояния Тиллотсона (1) и ANEOS (2) в сравнении с экспериментальными данными для гранита и кварца из справочника (Trunin и др., 2001); (б) — остаточные температуры T_R после разгрузки от ударного давления p_H по двум уравнениям состояния (1 и 2) в сравнении с экспериментальными данными для кварца (Raikes, Ahrens, 1979; Boslough, 1988).

уравнениям состояния. Здесь заметно расхождение ударных адиабат в диапазоне плотностей от 3.5 до 4.5 г/см³, что отражает неучет фазового перехода в модели Тиллотсона, однако остаточные температуры после разгрузки до нормального давления ниже температуры начала плавления (модельный солидус) близки в обеих моделях. Расхождение ударных адиабат может отражаться в значениях максимальных массовых скоростей, используемых в АФ модели временного снижения сухого трения. Это может повлиять на картину коллапса переходного кратера, поэтому мы провели расчеты с обоими уравнениями состояния.

Перебор модельных параметров (около 20 вариантов) позволил отобрать те из них, которые позволяют более-менее хорошо воспроизвести профиль и размер реального кратера Босумтви (Artemieva и др., 2004; Ferriere и др., 2008). На рис. 3 и 4 показаны профили модельных кратеров при использовании уравнения состояния гранита Тиллотсона (без фазовых переходов) и модели ANEOS, приближенно описывающий полиморфный фазовый переход при ударном сжатии (Pierazzo и др., 1997). На рис. 5 и 6 показаны “изобары” — кривые, соединяющие лагранжевы частицы-трейсеры, “записавшие” одинаковые уровни максимального ударного сжатия в момент прохода ударной волны. За счет движения подкратерного грунта при образовании центрального поднятия “изобары” смещаются к центру при коллапсе переходного кратера.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ СЛОЖНОГО УДАРНОГО КРАТЕРА

Аномалия магнитной каверны

Для моделирования магнитной аномалии профилирования магнитной каверны строился по уровню давления 3.5 ГПа, показанному на правой панели рис. 6. Глубина ее составляет 2.9 км, и конечный радиус равен 3.6 км. Для удобства моделирования предполагалось, что остаточная намагниченность и индуктивная намагниченность пород внутри каверны равны нулю.

На рис. 7а показана магнитная аномалия, образованная магнитной каверной сложного кратера. Как и ожидалось, аномалия отрицательная. Центр кратера находится в точке с координатами 0.0. Аномалия по уровню -2 нТ, в основном, лежит в пределах диаметра кратера. Картина аномалии приведена для высоты 70 м над первоначальным уровнем поверхности, в которую ударило падающее космическое тело. Магнитная восприимчивость породы мишени была выбрана равной 10^{-4} SI (Kontny и др., 2007). Величина магнитной аномалии, vznikшей из-за образования магнитной каверны во вмещающих породах, зависит от магнитных свойств этих пород: чем больше намагниченность, тем сильнее выражена аномалия.

На рис. 7б показана картина магнитного поля при образовании магнитной каверны в породах мишени с учетом поля мишени. Магнитное поле, в основном, положительное, рассчитывалось относительно магнитного поля Земли в заданной точке

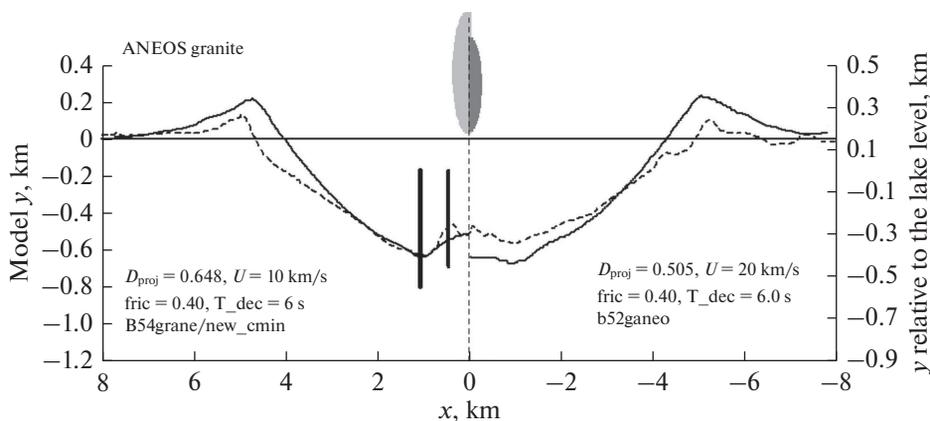


Рис. 3. Профили двух модельных кратеров (сплошные кривые) в сравнении с наблюдаемым профилем кратера Босумтви по данным (Fegriere и др., 2008). В левой части рисунка – удар со скоростью 10 км/с (диаметр сферического ударника $D_{proj} \approx 0.65$ км), в правой части – со скоростью 20 км/с ($D_{proj} \approx 0.51$ км). Уравнение состояния материалов и мишени и ударника – таблицы, рассчитанные по модели ANEOS (Thompson и Lauson, 1972) с параметрами (Pierazzo и др., 1997). В верхней центральной части рисунка серым тоном показаны сферические ударники (из-за вертикального растяжения масштабов они выглядят как эллипсы). Два жирных черных отрезка показывают расположение пробуренных скважин LB-07A и LB-08A (Fegriere и др., 2008). Вертикальное растяжение рисунка 4 : 1.

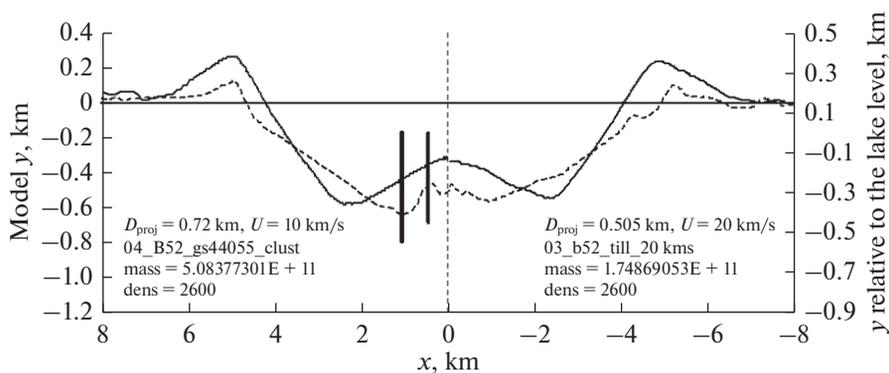


Рис. 4. То же, что и для рис. 2, но для моделей, рассчитанных с использованием уравнения состояния Тиллотсона для модельного гранита: начальная плотность 2600 кг/м^3 , модуль сжимаемости A и параметр Тиллотсона B имеют значение $A = B = 44 \text{ ГПа}$ – см. обозначения в работах (Tillotson, 1962; Melosh, 1989). Вертикальное растяжение рисунка 4 : 1.

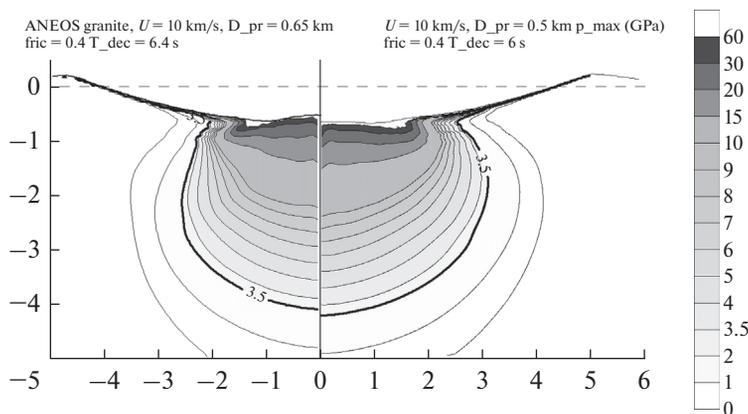


Рис. 5. Изобары максимального давления под модельными кратерами при ударах со скоростью 10 км/с (левая часть рисунка) и 20 км/с (правая часть рисунка) для уравнения состояния ANEOS. Подробнее профили кратеров показаны на рис. 3. Жирными кривыми показан уровень ударного давления 3.5 ГПа. Расстояния на осях указаны в км. Нет вертикального растяжения рисунка.

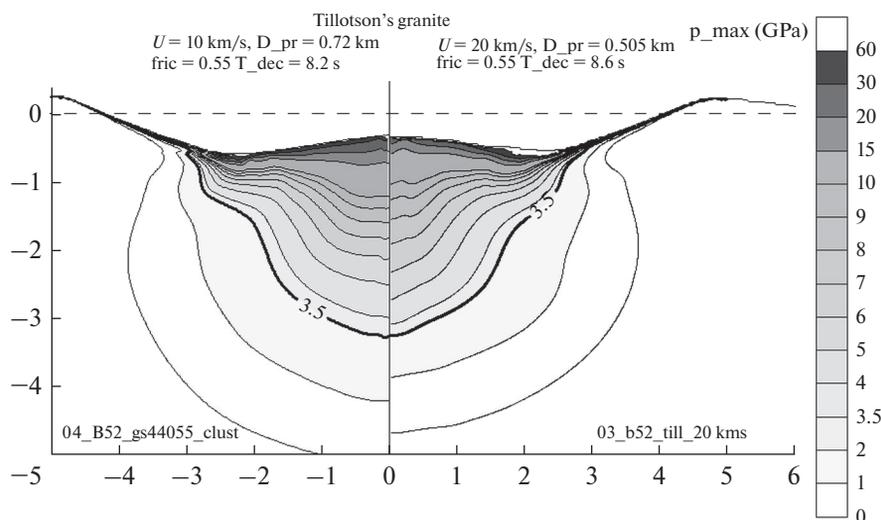


Рис. 6. То же, что и на рис. 5, но для модели с уравнением состояния Тиллотсона. Подробнее профили кратеров показаны на рис. 4. Расстояния на осях указаны в км. Нет вертикального растяжения рисунка.

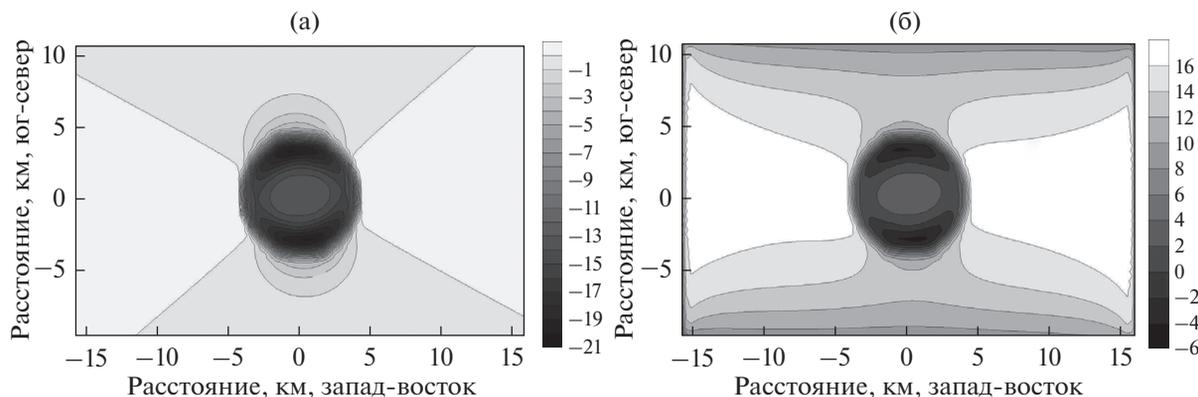


Рис. 7. Магнитная аномалия (нТ) магнитной каверны сложного кратера (а); магнитное поле мишени и магнитной каверны (нТ) относительно геомагнитного поля (б).

(Гана, 6°30'26" с.ш., 1°24'24" з.д., наклонение магнитного поля составляет -12.0, склонение магнитного поля равно -6.0, величина поля - 32500 нТ).

Магнитная аномалия импактитов с повышенной намагниченностью

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 были получены оценки ожидаемого количества застывшего расплава в виде линз или обогащенного расплавом зювита (Plado и др., 2000) и проведено численное моделирование (Artemieva и др., 2004), в результате которого было получено распределение расплава в кратере. В работе (Plado и др.,

2000) в предположении, что объем расплава составлял 2.2 км³, была построена модель намагниченного тела в виде набора слоев призм толщиной 50 м на глубинах от 200 до 600 м. Верхний слой расплава, который должен был давать максимальный вклад в аномалию, имел размеры примерно 5 на 3 км. Магнитная восприимчивость его составляла 33×10^{-4} SI, остаточная намагниченность была выбрана равной 0.367 Ам^{-1} . Однако при пробном бурении застывший расплав не нашли, возможные причины обсуждались в работе (Artemieva, 2007). При бурении были найдены брекчии с высокой остаточной намагниченностью.

В данной работе на основании результатов бурения скважины LB-07A (Kontny и др., 2007) слой пород в кратере, содержащих застывший расплав с высокой намагниченностью, моделировался кольцом с остаточной намагниченностью 3 А/м с внутренним и внешним радиусами 0.5 и 1.7 км и мощностью 3 м на глубине 375 м. Магнитный момент импактитов, определяемый остаточной на-

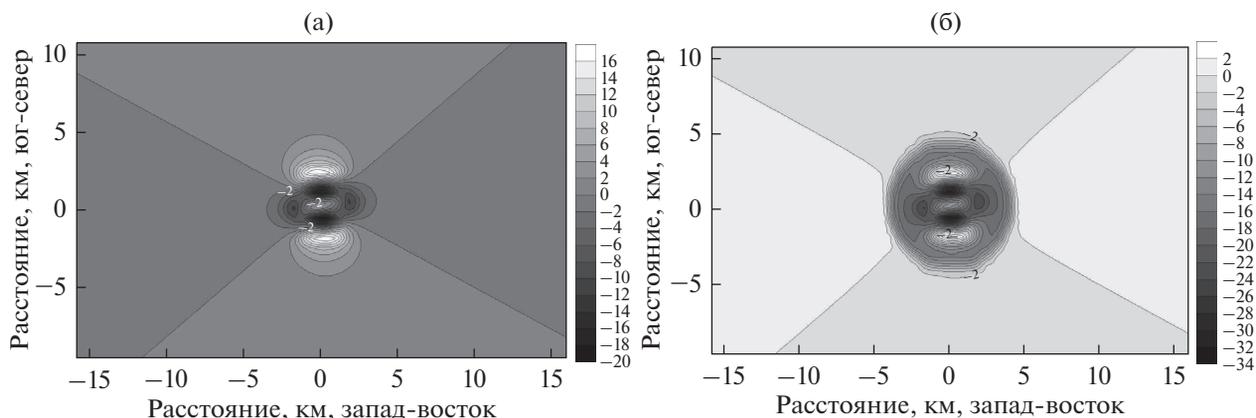


Рис. 8. Магнитная аномалия (нТ), порождаемая слоем импактитов (а); суммарная магнитная аномалия (нТ) магнитной каверны и слоя импактитов (б).

магнитичностью, имеет направление поля в момент удара (Plado и др., 1999), для большинства кратеров оно отличается от направления поля в настоящее время. Однако Босумтви — молодой кратер, поэтому мы задавали направление магнитного момента в кольце импактитов такое же, как у поля в настоящее время. Магнитная аномалия, порождаемая слоем импактитов, показана на рис. 8а, она по уровню 2 нТ расположена в пределах кратера. Так как слой импактитов находится в магнитной каверне, то совместная аномалия выглядит как на рис. 8б. Абсолютные значения поля импактитов меньше значений аномалии поля, вызываемой магнитной каверной (рис. 7а), поэтому характер аномалии кратера не изменяется. При наличии более мощного слоя импактитов аномалия внутри кратера может стать положительной.

ОСОБЕННОСТИ КРАТЕРА БОСУМТВИ, СРАВНЕНИЕ С НАБЛЮДЕНИЯМИ

Бурение Босумтви

В 2005 г. было проведено бурение кратера Босумтви в рамках программы ICDP. Обзор расположения кратера, картины магнитного поля, местоположения скважин приведены в работах (Plado и др., 2000; Ugalde и др., 2007). В этом разделе мы уточняем результаты моделирования, используя данные по бурению (Elbra и др., 2007; Kontny и др., 2007), и сравниваем их с опубликованными ранее результатами (Plado и др., 2000; Ugalde и др., 2007).

Одна из скважин (обозначаемая как LB-08A) была пробурена сквозь озерные отложения в центральное поднятие кратера, другая — в углубление вокруг центрального поднятия (LB-07A). В работе (Kontny и др., 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} – 10^{-3} SI, термоостаточной намагниченностью 10^{-2} – 10^{-1} А/м с преобладающей нор-

мальной полярностью, числом Кенигсбергера порядка 2–3. На глубине 376 м в скважине LB-07A выделяется слой мощностью примерно два м с высоким значением остаточной намагниченности, равной 1–43 А/м.

Результаты моделирования с учетом данных по бурению

При проведении моделирования были использованы типичные значения магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности пород мишени и кратера Босумтви. Выбор параметров был сделан на основе данных по бурению (раздел 7.1) и результатов численного моделирования (раздел 5). Они приведены в табл. 1.

Для пород мишени до удара была выбрана магнитная восприимчивость 10^{-4} SI. Это значение близко к тому, что получено для пород около кратера (Plado и др., 2000), хотя эти породы подверглись действию ударной волны и нагреванию с последующей модификацией. Остаточная намагниченность не учитывалась. Породы, интерпретируемые как импактиты, начинаются с глубины –280 м, уровень озера находится на отметке –50 м, ниже этого уровня находятся вода и озерные отложения. Было принято, что все вещество в пределах кратера на глубинах от 0 м до –280 м, не обладает магнитными свойствами. Этот объем назван “магнитной каверной, созданной озером”. “Импактиты 1” описываются как слой толщиной 200 м от глубины – 280 м в пределах радиуса 3.1 км. Их остаточная намагниченность была задана равной 0.037 А/м. Слой импактитов 2 на глубине –375 м мощностью несколько метров с максимальной остаточной намагниченностью, найденный в скважине LB-07A, моделируется кольцом, так как кратер имеет круглую форму и так как такой слой не был найден в скважине LB-08A. Расположение скважин, в частности, показано на рис. 3, скважина LB-08A находится ближе к центру кратера. Внутренний и внешний радиусы кольца вы-

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

Среда	Магнитная восприимчивость, ед SI	Термоостаточная намагниченность, А/м	Глубина залегания, мощность, м	Наклонение, склонение, град	Форма, размеры, км
Породы мишени	10^{-4}	0	0 (3850)	–12, –6	Прямоугольный параллелепипед: $32 \times 20 \times 4$
Магнитная каверна	0	0	0 (280)	Не используется	По форме размагниченной области, максимальный радиус: 3.6
Импактиты 1	0	0.037	–280 (200)	–12, –6	Прямой круговой цилиндр, радиус: 3.1
Импактиты 2	0	3	–375 (3)	–12, –6	Цилиндрическое кольцо, внутренний радиус: 0.5, внешний радиус: 1.7

браны равными 0.5 и 1.7 км. Породы кольца моделируются средой с остаточной намагниченностью 3 А/м. Выбранные значения размеров областей, занимаемых импактитами с разной намагниченностью, достаточно условны.

Мы не знаем точно свойства пород на глубинах ниже пробуренных скважин, поэтому оценили относительный вклад глубоких слоев, проводя моделирование магнитных аномалий, вызванных каверной “озера” и каверной кратера. Магнитная аномалия первой показана на рис. 9а, вторая была приведена на рис. 7а. На рис. 9б показана разница между этими двумя аномалиями. Можно сказать, что основной вклад в аномалию вносят породы (или их отсутствие), находящиеся ближе к измерительным приборам, то есть к поверхности.

Нулевой уровень профилей скважин не обязательно соответствует нулевому уровню задачи моделирования магнитного поля, так как последний соответствует нулевому уровню мишени до удара. По шкале глубин скважин уровень озера находится на глубине – 50 м. На рис. 10а показана магнитная аномалия на уровне 0 м, на рис. 10б показана магнитная аномалия на уровне –50 м. Отличие рис. (б) от аномалии на панели (а) можно отнести к влиянию морфологии кратера.

Сравнение с магнитной аномалией кратера Босумтви по данным работ (Plado и др., 2000; Ugalde и др., 2007)

Значения аномалии магнитного поля кратера Босумтви на профиле юг–север были показаны на рис. 3 в работе (Ugalde и др., 2007). Профиль проложен через центр кратера. На рис. 11 показаны отсканированный профиль магнитной аномалии (серая кривая), полученный в результате измерений, и расчетный профиль вдоль радиуса юг–север (черная кривая). Магнитная аномалия составляет несколько десятков нТ, что довольно близко к тому, что получается в результате моделирования. Общий ход кривых (минимум с локаль-

ным максимумом в центре) и амплитуда наблюдаемой и модельной аномалий довольно близки. Несимметричность экспериментальной кривой может быть вызвана неоднородностью пород мишени (Plado и др., 2000), которая не учитывалась при моделировании.

В работе (Plado и др., 2000) проводилось прямое моделирование магнитной аномалии, вызванное высокомагнитным телом внутри кратера, предположительно породами, содержащими застывший ударный расплав, однако, в ходе последующего бурения не было обнаружено достаточного объема таких пород. Обсуждение работы (Plado и др., 2000) было проведено в работе (Ugalde и др., 2007).

В работе (Ugalde и др., 2007) решалась обратная задача и была предложена новая 3-d модель источников магнитной аномалии. Использовались данные магнитной съемки высокого разрешения на поверхности озера Босумтви, данные гравитационной съемки, данные сейсмических исследований, данные о магнитных и петрофизических свойствах пород, извлеченных из скважин глубокого бурения. Предполагалось наличие магнитного источника в северо-восточной части кратера, вдали от пробуренных скважин. Как и в работе (Plado и др., 2000), в работе (Ugalde и др., 2007) был сделан вывод, что существуют нераскрытые источники магнитной аномалии с намагниченностью большей, чем была обнаружена в выходах импактитов. Авторы отрицают возможность того, что таким источником может быть центральное поднятие или ненайденный слой расплава. Они полагают, что предложенная ими модель источников успешно описывает магнитную аномалию и соответствует данным бурения (последнее утверждение спорно, так как модельная магнитная восприимчивость источников в местах бурения меньше наблюдаемой, что авторы списывают на то, что образцы из скважин размера порядка 10 см, а модельные блоки составляют сотни метров). Однако осталась нерешенной про-

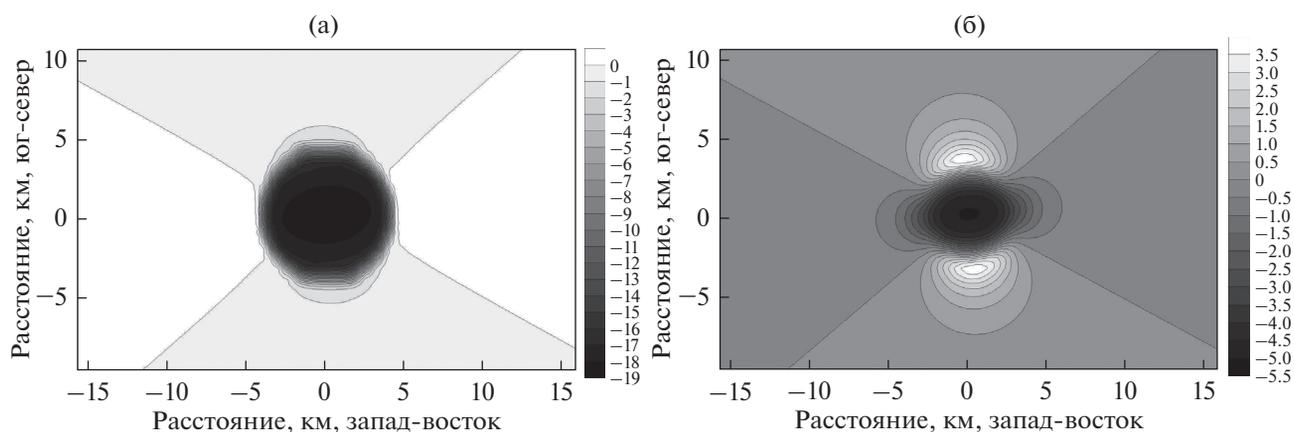


Рис. 9. Магнитная аномалия (нТ) каверны, созданной “озером” (а); разница между магнитной аномалией (нТ), созданной магнитной каверной кратера и магнитной каверной “озера” (б).

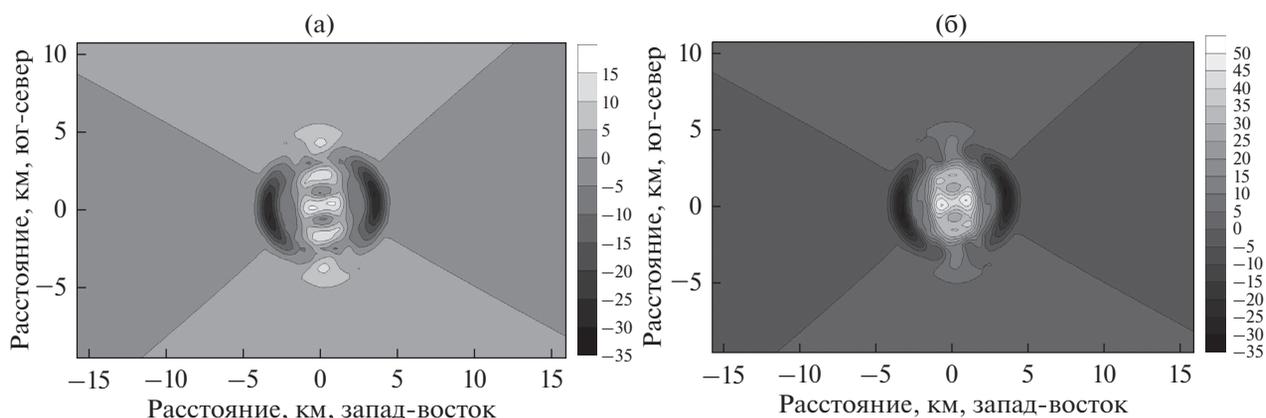


Рис. 10. Магнитная аномалия (нТ), созданная суммарным действием магнитной каверны и импактивов на уровне 0 м (а); на уровне –50 м (б).

блема происхождения этих источников. Авторы работы (Ugalde и др., 2007) предположили, что источники магнитной аномалии связаны не с наличием пород, содержащих застывший расплав, а с особенностями пород мишени, на которых был образован кратер.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной работе нас интересовали, в первую очередь, особенности магнитных аномалий, характерные для всех сложных кратеров. К ним можно отнести наличие “магнитной каверны”, включающей размагниченное вещество, полость в мишени, образовавшуюся в ходе выброса вещества и модификации кратера, и наличие импактивов, обладающих повышенными магнитными свойствами. Величину аномалии определяют приповерхностные источники в большей степени, чем заглубленные, поэтому отрицательная аномалия, связанная с “каверной”, близка к размеру кратера. Положительные аномалии, связанные с импактивитами, расположены внутри кратера. На

вид магнитной аномалии должны влиять также изменения морфологии кратера за счет эрозии (Plado и др., 1999). С ростом размера кратера изменяется соотношение размера области размагничивания и количества импактивов (расплава): уменьшается относительная глубина кратера, увеличивается количество расплава относительно объема кратера. Преимущественно отрицательная аномалия, характерная для Босумтви, может смениться положительной в кратерах большего диаметра. Географическая широта расположения кратера оказывает влияние на величину и направление геомагнитного поля, соответственно магнитная аномалия на разных широтах может выглядеть по-разному даже при одинаковых магнитных свойствах пород мишени.

С точки зрения моделирования вклада импактивов в магнитную аномалию важны магнитные свойства импактивов, глубина залегания, размеры занимаемой ими области, особенно в приповерхностной части. При моделировании магнитной аномалии кратера Босумтви, вызванной породами, содержащими застывший ударный

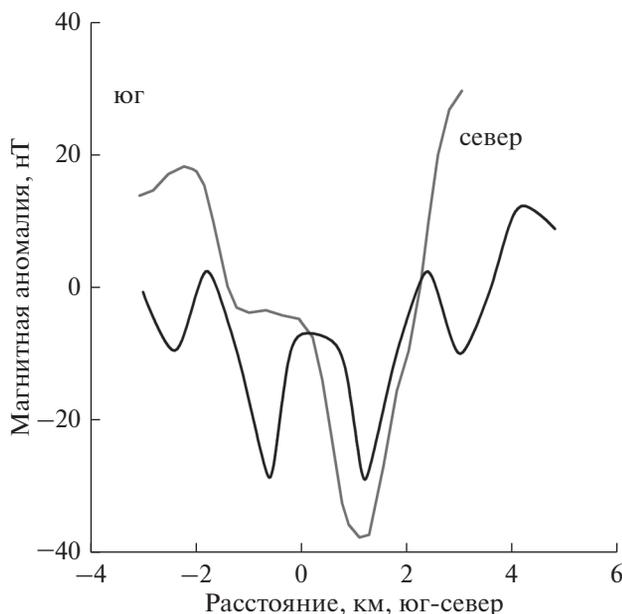


Рис. 11. Магнитная аномалия (нТ) на профиле юг–север, проходящий через центр кратера (измерения — серая кривая, моделирование, уровень 0 м — черная кривая).

расплав (Plado и др., 2000), предполагалось, что верхний слой расплава занимает область 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, подбирались так, чтобы наилучшим образом воспроизвести магнитную аномалию. Это привело к несоответствию как с данными моделирования расположения расплава (Artemieva и др., 2004), так и с данными по магнитным свойствам обогащенных расплавом зювитов (Plado и др., 2000). Хотя при глубоком бурении слой ударного расплава в кратере не был обнаружен, в скважине LB-07A выявили высокомагнитные импактиты с термоостаточной намагниченностью в диапазоне 1–43 А/м мощностью несколько метров (Kotny и др., 2007). Магнитный момент такого слоя эквивалентен магнитному моменту слоя пород, предложенного в работе (Plado и др., 2000). Мы допускаем, что положительная магнитная аномалия в кратере Босумтви вызвана наличием магнитных импактитов в виде зювитов, могущих вызывать эффект, подобный эффекту когерентного слоя застывшего ударного расплава.

При моделировании по результатам бурения в данной работе учитывались не все импактиты (скважины не дошли до кристаллического основания), также не учитывался вклад центрального поднятия, не учитывалась магнитная восприимчивость импактитов и кратерного вала. Влияние этих факторов предполагается уточнить в дальнейшем.

Роль эрозии в изменении магнитной аномалии хорошо продемонстрирована в работе (Plado и др., 1999), в дальнейшем мы собираемся смоделировать изменение магнитной аномалии при засыпании кратера осадочными породами.

При моделировании мы задавали одинаковые магнитные свойства в слое импактитов, типичные для 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), и такое допущение возможно.

Использующиеся 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. В магнитной аномалии кратера они могут иметь значение, поэтому в дальнейшей работе их предполагается учесть.

В данной работе использован новый метод численного моделирования магнитных аномалий. Полученные с его помощью результаты хорошо согласуются с результатами работы (Plado и др., 1999), в которой магнитная аномалия гипотетического сложного кратера моделировалась традиционным методом.

ВЫВОДЫ

Проведено моделирование образования 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.

Исследована роль “магнитной каверны” в формировании магнитной аномалии сложных кратеров. Показано, что с “магнитной каверной” связана отрицательная магнитная аномалия, совпадающая, в основном, с размерами кратера. Глубина аномалии тем больше, чем больше намагниченность пород мишени. Форма аномалии зависит (в небольшой степени) от того, какая компонента поля Земли преобладает в месте образования кратера (что зависит от географического положения объекта). Верхняя часть “каверны” оказывает наиболее сильное влияние на величину поверхностной аномалии в силу близости к измерительным приборам.

Изучена роль разного типа импактитов в формировании магнитной аномалии сложных кратеров. Показано, что намагниченные импактиты,

когда они расположены внутри кратера, создают преимущественно положительную аномалию. Вид аномалии, связанный с импактитами, зависит от ориентации поля в момент удара, если у импактитов преобладает остаточная термическая намагниченность, а также от ориентации магнитного поля Земли в настоящее время. Для кратера Босумтви, который является молодым кратером (возраст ~1 млн лет), это несущественно, потому что остаточная термическая намагниченность его импактитов, в основном, соответствует геомагнитному полю. Тот факт, что при бурении вблизи центра Босумтви не было обнаружено когерентного слоя застывшего расплава, но были найдены импактиты с высокой остаточной термической намагниченностью, может служить подтверждением связи положительной магнитной аномалии с импактитами.

Новый метод моделирования, предложенный в данной статье, прост в реализации, он позволяет, в частности, учесть влияние морфологии поверхности на магнитную аномалию. Полученные этим методом результаты хорошо согласуются с результатами, полученными традиционным методом (Plado и др., 1999).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теоретическая физика: теория поля. М., 2018. 508 с.
- Мелос Г. Образование ударных кратеров: геологический процесс. М., 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.
- Artemieva N., Karp T., Milkereit B. Investigating the Lake Bosumtwi impact structure: Insight from numerical modeling // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2004. V. 5. Iss. 11. P. 1–20.
- Boslough M.B. Postshock temperatures in silica // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. P. 6477–6484.
- Collins G.S., Melosh H.J., Ivanov B.A. Modeling damage and deformation in impact simulations // *Meteorit. and 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. and Planet. Sci.* 2007. V. 42. Iss. 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. Iss. 5908. P. 1678–1681.
- Grieve R.A.F., Robertson P.B., Dence M.R. Constraints on the formation of ring impact structures / *Multiring Basins* / Eds Schultz P.H., Merrill R.B. N.Y., 1981. P. 37–57.
- 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*. 2010. V. 465. P. 29–49.
- Koeberl C., Milkereit B., Overpeck J.T., Scholz C.A., Amoa-ko 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. and 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. and Planet. Sci.* 2007. V. 42. Iss. 4–5. P. 811–827.
- Melosh H.J. Acoustic fluidization — A new geologic process // *J. Geophys. Res.* 1979. V. 84. Iss. B13. P. 7513–7520.
- Melosh H.J., Ivanov B.A. Impact Crater Collapse // *Ann. Rev. Earth and Planet. Sci.* 1999. V. 27. P. 385–415.
- Mohit P.S., Arkani-Hamed J. Impact demagnetization of the martian crust // *Icarus*. 2004. V. 168. Iss. 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. Letters*. 2003. V. 30. Iss. 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 Papers: Large Meteorite Impacts and Planet. Evolution II*. 1999. V. 339. P. 229–239.
- Plado J., Pesonen L.J., Koeberl C., Elo S. The Bosumtwi meteorite impact structure, Ghana: A magnetic model // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2000. V. 35. Iss. 4. P. 723–732.
- Raikes S.A., Ahrens T.J. Post-shock temperatures in minerals // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 1979. V. 58. Iss. 3. P. 717–747.
- Spohn T. *Physics of Terrestrial Planets and Moons: An Introduction and Overview* // *Treatise on Geophysics* (Second Edition). Oxford, 2015. P. 1–22.
- Thompson S.L., Lauson H.S. Improvements in the Chart-D radiation hydrodynamic code III: Revised analytical equation of state. Sandia Laboratories, SC-RR-71 0714. Albuquerque, 1972. 119 p.
- Tillotson J.H. *Metallic equations of state for hypervelocity impacts*. General Atomic Report GA-3216. San Diego, 1962. 141 p.
- Trunin R.F., Gudarenko L.F., Zhernokletov M.V., Simakov G.V. *Experimental Data on Shock Compression and Adiabatic Expansion of Condensed Matter*. RFNC-VNIIEF. Sarov, 2001. 446 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. and Planet. Sci.* 2007. V. 42. Iss. 4–5. P. 867–882.
- Ugalde H.A., Artemieva N., Milkereit B. Magnetization on impact structures—Constraints from numerical modeling and petrophysics // *Special Papers: Large Meteorite Impacts III*. 2005. V. 384. 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.