

01;03

О возможности реализации эффекта самовозбуждающегося гидромагнитного динамо в импактных расплавах астроблем

© А.И. Григорьев

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова
E-mail: grig@uniar.ao.ru

Поступило в Редакцию 7 марта 2000 г.

В озере импактного расплава объемом порядка сотни кубических километров с температурой $\approx 2000 \pm 3000$ К, образующегося при столкновении крупного метеорита (астероида) с планетой, характеризующегося вследствие высокой температуры большой электропроводностью и малой вязкостью, возможна реализация эффекта самовозбуждающегося гидромагнитного динамо. Это обстоятельство позволяет объяснить факт наличия магнитных аномалий, связанных с Земными астроблемами.

При столкновении крупных метеоритов (астероидов) с Землей и другими планетами на месте столкновения образуется воронка (астроблема) в зависимости от размеров и скорости метеорита диаметром от единиц до сотен километров, частично заполненная высокотемпературным импактным расплавом вещества астероида и горной породы планеты в месте удара [1–3]. Скорости крупных метеоритов, выпадающих на Землю, лежат в диапазоне от второй космической скорости $\approx 1.1 \cdot 10^4$ м/с до 10^5 м/с — наивысшей скорости относительно Земли, возможной на данном удалении от Солнца. Так, Пучеж–Катунская астроблема (окрестность Нижнего Новгорода), имеющая диаметр ≈ 80 км, в соответствии с оценками [2] могла образоваться при столкновении с Землей астероида диаметром ~ 4 км со скоростью $\approx 2.5 \cdot 10^4$ км/с. При этом в результате действия сильной ударной волны образовалось ≈ 590 км³ импактного расплава, из которого примерно две трети остались в ударном кратере. Расплавленная лава, стремясь заполнить понижения в рельефе, образует в кратере озеро. Если предположить, что такие понижения занимают десятую часть площади кратера, то

толщина H слоя расплавленной импактной лавы в Пучеж–Катунском кратере будет равна ≈ 0.8 km.

Температура импактного расплава T согласно петрографическим оценкам [4] достигает 2800 ± 3300 К. Длительность же существования импактного расплава в жидкой фазе, когда объем расплава измеряется сотнями кубических километров, а остывание расплава идет через поверхность лавового озера (которую для определенности можно, как это сделано в [2], принять покрытой слоем кипящей воды, т.е. можно считать поддерживающейся при постоянной температуре), оценена в [2] в десяток тысяч лет. Такая оценка, безусловно, завышена. Но даже если принять, что со свободной поверхности лавового озера идет теплоотдача за счет излучения: $\sim \varepsilon T^4$, где ε — постоянная Стефана–Больцмана, то характерное время его охлаждения до температуры плавления горных пород ($T_* \approx 1100$ К) будет измеряться годами.

Таким образом, на дне ударного кратера в течение длительного промежутка времени будет существовать значительный объем высокотемпературного импактного расплава. Динамическая вязкость жидкостей η зависит от температуры по экспоненциальному закону, увеличиваясь с ростом температуры [5]:

$$\eta = \eta_0 \exp(E_0/kT), \quad (1)$$

где E_0 — константа, весьма приближенно определяемая как теплота плавления, деленная на число Авогадро; k — постоянная Больцмана; η_0 имеет размерность вязкости и характерную величину порядка вязкости газа при соответствующей температуре [5]. Учтем, что для большинства окислов, входящих в состав горных пород, $E_0 \sim 1$ eV [6], и для нижеследующих оценок примем, что вязкость импактного расплава удовлетворяет соотношению вида (1) с $\eta_0 = 10^{-2}$ Pa·s и $E_0 = 1$ eV. Такое выражение определит вязкости импактного расплава, согласующиеся с результатами измерений вязкости силикатных вулканических магм, для которых найдено, что при $T \approx 1900 \pm 2100$ К их вязкость достигает величины ~ 1 Pa·s [7].

Низкие значения величины вязкости импактного расплава при больших градиентах температуры в лавовом озере приведут к возникновению в импактном расплаве интенсивных конвективных движений. Согласно [8], скорость конвективных движений в жидкости по порядку

величины определяется соотношением:

$$U \sim 0.25(\gamma f d/2\eta)^{1/2}; \quad (2)$$

здесь γ — к.п.д. преобразования механической энергии конвективных движений в тепловую; f — плотность потока тепла в лаве; d — характерный линейный масштаб конвекции. Согласно [8], к.п.д. превращения теплоты в механическую работу конвекции слабо зависит от специфики ввода тепла в систему и для большинства природных процессов имеет порядок $\gamma \sim 0.1$. Величину теплового потока f можно оценить из закона Фурье, вводя коэффициент эффективной теплопроводности λ_* , учитывающий конвективный теплоперенос, примерно на два порядка превышающий коэффициент молекулярной теплопроводности [9]:

$$|f| \approx \lambda_* |\nabla T| \sim \lambda_* \Delta T / (0.5 \cdot H). \quad (3)$$

Горные породы являются полупроводниковыми со смешанной проводимостью с сильной компенсацией, т.е. содержат примеси донорного и акцепторного типов в почти одинаковой концентрации [10]. Их энергия активации, согласно [10], не превышает одного электронвольта, тогда как, например, для чистой окиси алюминия Al_2O_3 , которую горные породы содержат в большой концентрации, ширина запрещенной зоны превышает пять электронвольт. Но сказанное относится к твердым горным породам. При плавлении и дальнейшем нагревании электропроводность полупроводников увеличивается по экспоненциальному закону [11]:

$$\sigma = \sigma_* \exp(-E_*/kT). \quad (4)$$

В этой формуле E_* — энергия активации, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура. Константа σ_* характеризует электропроводность при бесконечно большой температуре; ее значение для полупроводников лежит в пределах 10^5 – $10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$. Величина энергии активации зависит от конкретного механизма проводимости (в некристаллических полупроводниках обычно одновременно реализуется несколько механизмов) и измеряется долями или единицами электронвольта [11]. При достаточно высоких температурах (при $T \sim 2000 \pm 3000 \text{ K}$) электропроводность полупроводников достигает величины электропроводности жидких металлов. Для нижеследующих оценок примем, что электропроводность σ импактного расплава при

$T \approx 2000 \pm 3000$ К определяется соотношением (4) с $\sigma_* = 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ и $E_* = 1 \text{ eV}$.

При имеющемся месте в озере импактной лавы с характерным линейным размером порядка километра температурах, электропроводностях, вязкостях и скоростях конвективных движений в нем может реализоваться эффект самовозбуждающегося гидромагнитного динамо, который в соответствии с современными представлениями обеспечивает существование магнитных полей планет и звезд [12,13]. В итоге озеро импактной лавы, занимающее центральную часть всякой крупной астроблемы, будет обладать собственным магнитным полем. Критерий возможности реализации гидромагнитного динамо в проводящей среде [12,13]:

$$\text{Re}_m = \mu_0 \sigma H U \geq 10. \quad (5)$$

Здесь Re_m — магнитное число Рейнольдса; μ_0 — магнитная постоянная.

Перепишем условие (5) с учетом соотношений (1)–(4):

$$\begin{aligned} \text{Re}_m = 0.125 \cdot \mu_0 \cdot \sigma_* \cdot H \cdot \left(\frac{\gamma \cdot \lambda_* \cdot \Delta T}{2\eta_0} \right)^{1/2} \\ \times \exp \left(-\frac{E_0 + 0.5 \cdot E_*}{kT} \right) \geq 10. \end{aligned} \quad (10)$$

Подставляя в это условие $\lambda_* \approx 250 \text{ W/m} \cdot \text{K}$; $H = 800 \text{ m}$; $\Delta T \sim T = 2000 \pm 3000$ К, несложно найти, что условие (5) выполняется с большим запасом (на несколько порядков), что частично оправдывает некоторый произвол, допущенный (в условиях дефицита информации о свойствах импактного расплава) при выборе значений величин констант аппроксимационных зависимостей и коэффициентов переноса.

В роли затравочного магнитного поля для реализации эффекта самовозбуждающегося гидромагнитного динамо выступит магнитное поле Земли. Длительность существования обсуждаемого источника собственного магнитного поля астроблем определится временем остывания лавового озера до температур, при которых электропроводность лавы и скорость конвективных движений, определяемых температурой и вязкостью, уменьшатся настолько, что условие (5) перестает выполняться. При самой грубой оценке, принимая, что импактная лава занимает сферическую область, а все тепло, запасенное в ней, расходует на излучение по закону Стефана–Больцмана, характерное время охлаждения

лавы будет больше года. В реальности характерное время остывания лавового озера до температур, при которых (5) перестанет выполняться ($T \approx 1500 \text{ K}$), будет на порядок-два больше. Но и года существования собственного самовозбуждающегося гидромагнитного динамо в озере импактной лавы достаточно для намагничивания до максимальной величины горных пород в окрестности озера, там где они были размагничены ударной волной, возникшей при столкновении метеорита (астероида) с планетой [14]. В итоге горные породы в окрестности импактного кратера приобретут намагниченность отличную от намагниченности горных пород на больших расстояниях от места падения астероида на поверхность Земли. Другими словами, астроблема станет центром магнитной аномалии.

Заключение. При столкновении крупных метеоритов (астероидов) с планетой на дне астроблемы образуется озеро высокотемпературной, электропроводной, маловязкой импактной лавы. В таком озере может реализоваться эффект самовозбуждающегося гидромагнитного динамо, обеспечивающий появление у такого озера собственного магнитного поля, длительное существование которого приводит к намагничиванию горных пород в окрестности астроблемы, размагниченных ударной волной, возникающей при столкновении астероида с планетой. Сказанное позволяет объяснить магнитные аномалии, связанные с известными астроблемами на поверхности Земли.

Список литературы

- [1] *Базилевский А.Т., Иванов Б.А.* // Механика образования воронок при ударе и взрыве. Серия: Новое в зарубежной науке. Механика. М.: Мир, 1977. № 12. С. 172–227.
- [2] *Бруберг К.Б.* Сб.: Нелинейные волновые процессы. Серия: Новое в зарубежной науке. Механика. М.: Мир, 1987. № 42. С. 235–272.
- [3] *Мелош Г.* Образование ударных кратеров. М.: Мир, 1994. 336 с.
- [4] *Фельдман В.И.* Петрология импактитов. М.: Изд. МГУ, 1990. 299 с.
- [5] *Рид Р., Шервуд Т.* Свойства газов и жидкостей. (Определение и корреляция). Л.: Химия, 1971. 702 с.
- [6] *Физико-химические свойства окислов* / Под ред. Самсонова Г.В. М.: Металлургия, 1969. 455 с.
- [7] *Попов В.С.* // Соросовский образовательный журнал. 1995. № 1. С. 74–81.
- [8] *Алексеев В.В., Гусев А.М.* // УФН. 1983. Т. 141. № 2. С. 311–342.

- [9] *Лыков А.В.* Теплообмен. Справочник. М.: Энергия. 1972. 560 с.
- [10] *Моисеенко У.И., Соколова Л.С., Истомин В.Е.* Электрические и тепловые свойства горных пород. Новосибирск: Наука. 1970. 66 с.
- [11] *Мотт Н., Дэвис Э.* Электронные процессы в некристаллических веществах. Мир. 1974. 472 с.
- [12] *Яновский Б.М.* Земной магнетизм. Л.: Изд. ЛГУ. 1978. 592 с.
- [13] *Космическая магнитная гидродинамика* / Под ред. Э. Приста, А. Худа. М.: Мир. 1995. 439 с.
- [14] *Килер Р., Ройс Е.* Сб.: Физика высоких плотностей энергий. М.: Мир. 1974. 484 с.