

Внешнее проявление магнитогидродинамического эффекта в движущихся расплавах как возможная разновидность вулканомангнитного сигнала

Зубов А.Г.

External manifestation of the magnetohydrodynamic effect in moving melts as a possible kind of volcanomagnetic signal

Zubov A.G.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: zubov@kscnet.ru

Движущиеся в геомагнитном поле лавовые или магматические расплавы, являясь, по сути, электролитами, согласно эффекту Холла, должны генерировать внутренние электрические поля. Последние должны создавать электротоки в теле расплава. Замкнутые электрические потоки образуют вокруг себя новое магнитное поле. Предполагается, что такое магнитное поле от магматических тел может фиксироваться магнитометрами и давать информацию о движении этих тел в глубине.

Как известно, такие расплавы, как жидкая лава, обладают в некоторой степени ионной проводимостью. То есть, лавовые потоки представляют собой гигантские проводники, движущиеся в магнитном поле Земли. Из электродинамики известно, что в движущихся в магнитном поле проводниках возникает электрическое поле, которое при благоприятных условиях может приводить к появлению электрических токов. Если это случится, они создадут вокруг себя новое магнитное поле. Следовательно, теоретически, внутри и вблизи текущих лавовых потоков может существовать искаженное локальное геомагнитное поле (ГМП). Искажение поля тем выше, чем выше у потока скорость и температура, которая влияет на величину проводимости.

Попробуем разобраться, как может работать механизм генерации нового магнитного поля внутри и вокруг движущегося лавового потока. При движении ионизированного тела со скоростью V во внешнем магнитном поле B на заряженные ионы q в теле воздействует сила Лоренца [2]:

$$F_L = q[VB]. \quad (1)$$

Из этого выражения следует, что при воздействии направленного вниз магнитного поля B положительно заряженные ионы в горизонтально движущемся рабочем теле будут двигаться влево по отношению к вектору скорости, а отрицательные ионы – вправо. То есть, в движущемся рабочем теле возникает электрическое поле E , ориентированное в такой конфигурации справа налево. Это известное явление называется эффектом Холла [2]. При этом

$$E = R[Bj],$$

где B – прикладываемое магнитное поле, j – плотность тока, а R – постоянная Холла.

Для начала рассмотрим случай жидкого потока, движущегося в целиком заполненной трубе-лавоводе (рис. 1а). Движение лавового потока неоднородно. Максимальная скорость потока – в центре. У стенок и дна лавовода из-за вязкого трения существует неподвижный слой жидкой лавы. Движущаяся часть лавового потока – это текущий электролит, в котором под воздействием ГМП генерируется электрическое поле E . Роль цепи нагрузки выполняет контактирующий со стенками слой, замыкающий электрическую цепь. В этом слое из-за его неподвижности нет препятствующего току электрического поля E .

В рассматриваемом случае образуются два замкнутых контура, по которым должны циркулировать электрические токи. Благодаря им, в нижнем контуре генерируется магнитное поле, обратное вектору скорости лавового потока V , а в верхнем – вдоль V . Для краткости будем называть это новое магнитное поле **дополнительным**. Длинный лавовый поток можно уподобить двум бесконечно

длинным параллельным соленоидам, у которых магнитное поле сосредоточено внутри, а наружное поле рассеяния в идеале отсутствует. Приведенная модель также подходит для описания движущихся вверх жидких магматических расплавов, плюмов, а также опускающихся вниз тяжелых расплавленных масс в зонах субдукции.

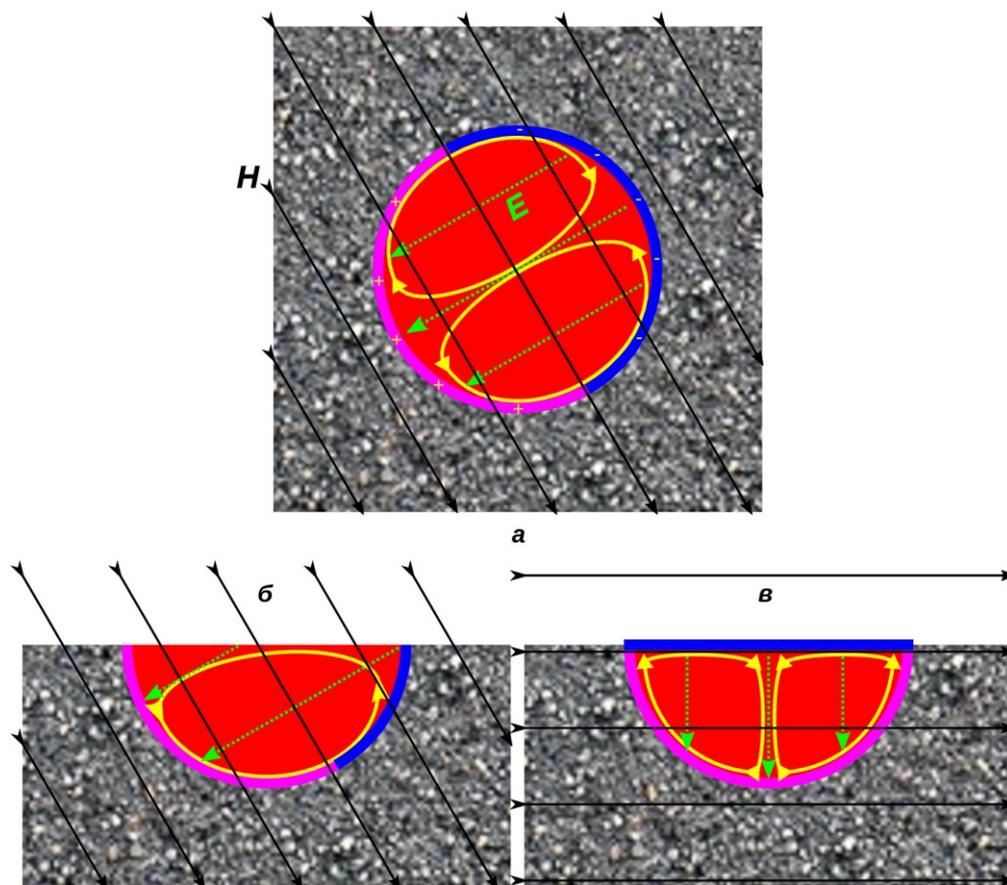


Рис. 1. Схема механизма генерации дополнительного магнитного поля за счет эффекта Холла в движущемся лавовом потоке. Представлены сечения текущих от нас лавовых потоков. Черные стрелки – силовые линии компонента ГМП в сечении. Внутренние пунктирные стрелки – силовые линии электрического поля от эффекта Холла. Катодный и анодный пристеночные слои обозначены соответствующим оттенком. Замкнутые светлые петли со стрелками – контуры электротока. а – скрытый лавовый поток внутри лавовода или движущаяся магма, б – открытый лавовый поток в приполярной зоне, в – открытый лавовый поток на экваторе, текущий на восток.

Рассмотрим теперь более встречаемые случаи, когда лава течет на поверхности суши. В этом состоянии поток не со всех сторон окружен стенками. Результат будет зависеть от направления местного ГМП.

На рис. 1б изображен наиболее распространенный для нашей территории случай, когда преобладает вертикальная составляющая ГМП и она направлена вниз. Такая ориентация ГМП имеет место, начиная с 31° северной широты и до северного полюса. Поэтому условно назовем его приполярным поясом. В рассматриваемой конфигурации один из электрических контуров из рис. 1а на этот раз окажется разомкнутым, и генерируемые электротоки будут течь только против часовой стрелки, генерируя встречное движению дополнительное поле. В южном полушарии, в приполярном поясе, ГМП преимущественно направлено вверх. Соответственно, результат будет обратный: лава будет иметь положительный заряд у правого берега, электротоки будут течь по часовой стрелке, и дополнительное магнитное поле будет направлено по вектору скорости потока.

В приэкваториальном поясе преобладает горизонтальная составляющая ГМП. На рис. 1в рассматривается ситуация, когда в сечении лавового потока действует строго горизонтальная компонента ГМП. В этом случае из-за эффекта Холла генерируется вертикальное электрическое поле. Рисунок соответствует движению лавового потока в восточном направлении. При этом E будет направлено вниз, дно и стенки становятся анодом, а открытая поверхность потока – катодом. В данной конструкции электрическое поле, создаваемое эффектом Холла, ортогонально лавовой поверхности. А значит, поле E никак не может мешать протеканию электротока вдоль этой поверхности, в отличие от всех других вариантов ориентации ГМП. А это значит, что цепь электрических контуров может замыкаться через приповерхностный объем. На рис. 1в изображены два возможных контура, создающих внутри себя магнитные поля разных направлений. Очевидно, при движении лавового потока на запад распределение токов и полей изменится на обратное.

Поскольку эффект Холла зависит от скорости потока, дополнительное магнитное поле в лаве на разных участках может быть разным, что может привести к появлению локально повышенных рассеивающих полей. Наиболее сильного эффекта рассеянного поля следует ожидать на участках перехода скрытого течения лавы в открытое и наоборот, когда резко размыкается или замыкается верхний контур электротоков, инициируемых эффектом Холла.

Вещество в мантии, при соответствующей глубинной температуре и давлении, перестает быть твердым и, главное, становится электропроводным. В качестве источников возмущающего магнитного поля в мантии можно представить поднимающиеся или опускающиеся ионизированные расплавы. Среди первых – плюмы и магматические тела. Эффективность работы механизма генерации дополнительного поля на глубине гораздо выше из-за повышенной, согласно дипольной модели – по крайней мере на порядок, напряженности ГМП вблизи ядра.

Структуру такого дополнительного поля нетрудно представить. При нисходящем движении тело приобретает направленное на восток электрическое поле E , как это выглядит в поперечном сечении на рис. 1а. Возникшие из-за E токи образуют два противоположных вертикальных магнитных момента, смещенных вдоль земного магнитного меридиана. При этом магнитный момент, направленный вверх, сдвинут к северу, другой – к югу. На рис. 2 изображена схема дополнительного магнитного поля, образующегося при движении проводящего тела вниз в присутствии ГМП. У всплывающего проводящего тела все особенности меняются на противоположные. На расстоянии дополнительное магнитное поле вокруг таких объектов выглядит как квадрупольное. В эпицентре на земной поверхности опускающееся проводящее тело уменьшает горизонтальную составляющую ГМП, поднимающееся – увеличивает.

Самое уязвимое место в нашей гипотезе – то, что при всей теоретической обоснованности, мы не знаем, какова эффективность действия реального механизма генерации дополнительного поля от движущихся проводящих лавовых или магматических объектов. Для изучения этого требуются специальные модельные и натурные исследования. От этого зависит ответ, в каких случаях следует учитывать этот эффект на практике, а когда этот эффект может представлять только теоретический интерес. Если бы изменение ГМП под влиянием дополнительного поля из-за поднимающихся магматических масс оказалось заметным наземным наблюдателям, это позволило бы отслеживать движение магмы и могло бы послужить предвестником вулканических извержений. Вопрос в том, ощутимо ли он проявляется?

Магнитогидродинамическим аналогом движущихся в ГМП расплавов может послужить морская вода, при движении которой современными приборами фиксируются разнообразные электромагнитные проявления [1]. Еще в 1851 г. Волластону удалось измерить электродвижущую силу (ЭДС), индуцированную приливными течениями в Ла-Манше. Морская вода – это такой же, как лава или магма,

неидеальный электролит, который тоже движется в ГМП с примерно такими же небольшими скоростями. В настоящее время известно [1], что во время приливных течений наблюдается электрическое поле до 1 мкВ/м и дополнительное магнитное поле до 3 нТл.

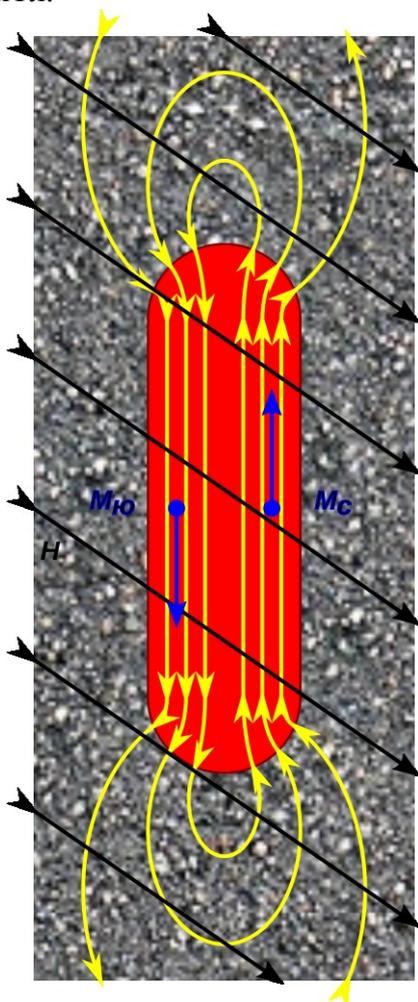


Рис. 2. В плоскости геомагнитного меридиана схема силовых линий дополнительного магнитного поля (светлые замкнутые линии со стрелками), генерируемого опускающимся в мантии телом, находящемся в состоянии расплава. Черные линии со стрелками – силовые линии ГМП. $M_{ю}$ и $M_{с}$ – магнитные моменты южной и северной половинок тела.

В настоящее время при мониторинге вулканической активности используется наблюдение за ГМП [3, 4]. Существует даже термин «вулканомангнитный сигнал», возникший в результате обнаружения особых геомагнитных вариаций вблизи вулканов. Причинами таких вариаций считают изменчивые температурные и барические условия в глубинных средах вулканического района, вызывающие изменение намагниченности пород, а также порождающие пьезомагнитный эффект. Было бы полезно изучить вулканомангнитный сигнал в свете гипотезы появления дополнительного поля при движении магмы.

Список литературы

1. Смагин В.П. Электромагнитные поля береговых, корабельных, акустических волн, течений и их использование для изучения мирового океана. Автореф. дис. на соиск. уч. ст. докт. физ.-мат. наук. Владивосток, 2005. 40 с.
2. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1985. 512 с.
3. Catalán M., Agudo L.M., Muñoz A. Geomagnetic secular variation of Bransfield Strait (Western Antarctica) from analysis of marine crossover data // Geophysical Journal International. 2006. V. 165. № 1. P. 73-86. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2006.02877.x
4. Sasai Yo., Uyeshima M., Zlotnicki J. et al. Magnetic and electric field observations during the 2000 activity of Miyake-jima volcano, Central Japan // Earth and Planetary Science Letters. 2002. V. 203. P. 769-777.