

## ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЗЕМНЫХ ТОКОВ

Кролевец А.Н.

Камчатский государственный университет им. В.Беринга, г. Петропавловск-Камчатский, [an@kamgpu.ru](mailto:an@kamgpu.ru)**Введение. Электротеллурическое поле и земные токи.**

Электротеллурические измерения выполнялись и продолжают выполняться геофизиками с целью разобраться в сути электрических процессов, протекающих в верхней части земной коры, получить дополнительную информацию о её строении, геологами с целью поиска полезных ископаемых.

Типичная схема электротеллурических измерений такова. Имеется пара или большее число погребённых под поверхностью земли в горизонтальной плоскости электродов: «измерительных линий» (рис.1), ориентированных по разным направлениям. Регистрируются разности потенциалов между парами электродов. Далее, по аналогии с электростатикой, вычисляется «напряжённость электротеллурического» поля  $E$ . Проекция его на направление  $CC'$ :  $E_C = -\frac{V_{CC'}}{L_C}$  и аналогично, на все остальные направления. Далее по проекциям восстанавливается сама

напряжённость  $E$ . Её можно связать с градиентом скалярного потенциала  $\varphi$  электромагнитного поля:  $\vec{E} = -\vec{\nabla} \varphi$ .

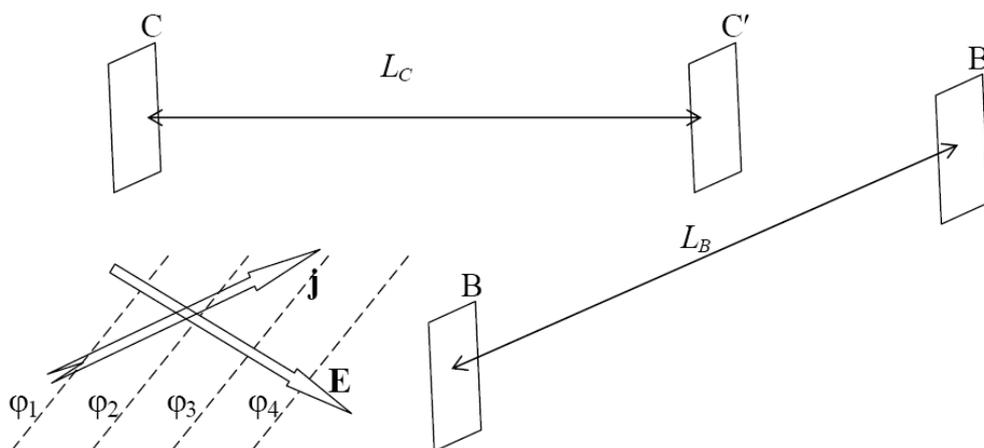


Рис.1.  $CC'$ ,  $BB'$  – пары заглубленных электродов,  $L_C$ ,  $L_B$  – расстояния, условно схематически показаны векторы плотности тока  $j$  и напряженности электротеллурического поля  $E$ .

Описанную методику электротеллурических измерений, которая применялась, например, и в работе [1], можно считать *стандартной*.

Существование вариаций скалярного потенциала является лишь одной из причин появления токов в Земле. Действительно, в выражение для плотности тока  $\vec{j}$ , в том числе и в земле входит два слагаемых

$\vec{j} = \sigma \vec{E} - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ , здесь  $\sigma$  – проводимость среды,  $\vec{A}$  – векторный потенциал электромагнитного поля. Часть плотности тока  $\sigma \vec{E}$  – «омическая» восстанавливается по данным стандартной методики электротеллурических измерений. Однако другая часть  $\sigma \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right)$  – «индукционная», остаётся неизвестной. Можно представить себе ситуации,

когда в земле существует лишь какая-нибудь одна из возможных частей земного тока или обе сосуществуют одновременно.

Чтобы понять это, представим себе упрощённую модельную ситуацию, когда часть земной поверхности, моделируемой для упрощения рассуждений проводящим кольцом, пронизывает изменяющийся магнитный поток. В кольце, как следствие, индуцируется ток. На пути индукционного тока установлены заглублённые электроды, подсоединённые к прибору, измеряющему разность потенциалов (рис.2). Результат радикально различается для случаев, с одной стороны, когда токовое кольцо имеет однородную проводимость, с другой – когда проводимость неоднородна.

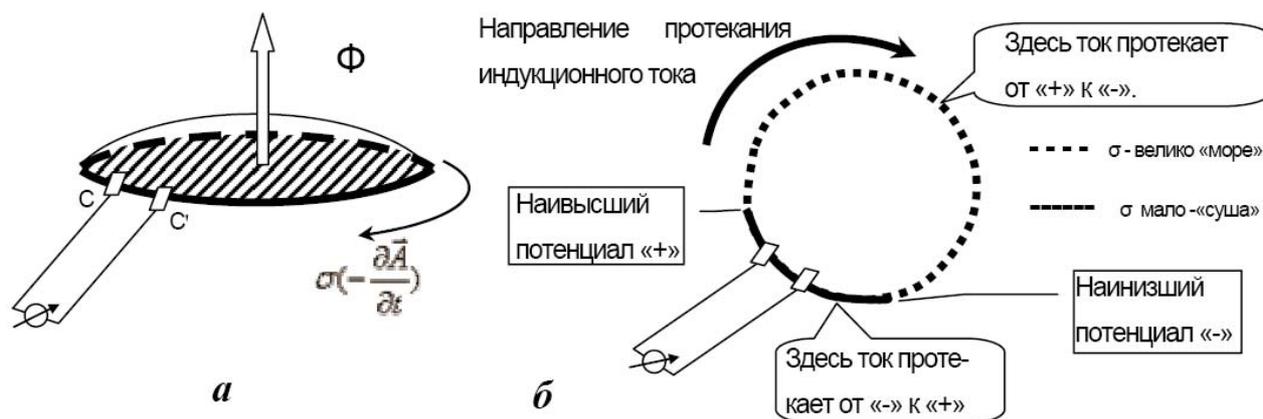


Рис.2. а - модельная ситуация: измеряется разность потенциалов между парой электродов СС, установленных в проводящем кольце.  $\Phi$  – изменяющийся магнитный поток. В качестве проводящего кольца может выступать часть геофизической среды, поскольку суть явлений не изменится при замене кольца на сферу или шар, представляющий Землю целиком; б - случай неоднородной проводимости (вид на кольцо сверху).

В первом случае ток, в чистом виде индукционной природы протекать будет. Однако, вне зависимости от того в каком месте кольца на каком расстоянии друг от друга установлены электроды, никакой разности потенциалов зафиксировано не будет. Во втором случае, при одном и том же направлении тока и показания прибора, и полярность показаний зависят от того, в низкоомной или высокоомной части токового кольца установлены электроды (рис. 2, б).

В последнем случае, направления векторов  $\vec{j}$  и  $\vec{E}$  могут и не совпадать, возможны случаи, когда векторы направлены противоположно. В геофизической литературе, насколько нам известно, до сих пор даже не ставился вопрос о проблеме полного измерения плотности тока, то есть обеих его составляющих.

Подобная проблема давно осознана в области физики твёрдого тела при исследовании гальваномагнитных явлениях и в полупроводниках. При помещении полупроводника в магнитное поле с достаточно высоким значением напряжённости, линии тока ориентируются под углом к силовым линиям электрического поля (Рис. 3).

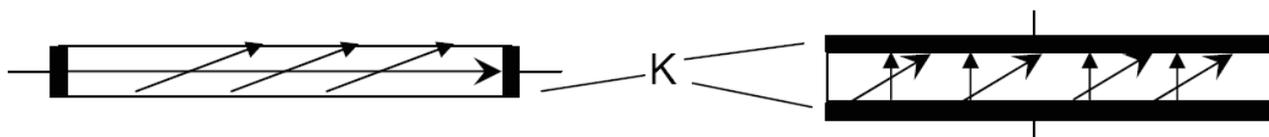


Рис.3. Линии тока: стрелки  $\rightarrow$  и напряженности электрического поля:  $\rightarrow$  в полупроводниках, помещённых в магнитное поле не совпадают по направлению. К - контакты.

### Возможность и способ прямых измерений теллурических токов.

В многочисленных публикациях в том числе ряде монографий предложены как конкретные способы определения в полупроводниках  $\vec{j}$  и  $\vec{E}$  по отдельности, так и представлены результаты таких измерений. См., например монографию [2] или обзор [3]. К сожалению, способы, применяемые при исследовании свойств полупроводников, в геофизических исследованиях напрямую применить невозможно. Действительно, полупроводниковые образцы всегда имеют естественные границы для протекания тока: им придают формы брусочков, дисков. Геофизическая же среда не имеет естественных границ кроме поверхности Земли.

Для измерений токов Земли следует разорвать часть пути протекания токов в земле и замкнуть разорванную часть тока с помощью низкоомного измерительного прибора. Для этого должны быть изготовлены две или более измерительные ячейки, предназначенные для разрыва земных токов. Каждая из ячеек в сборе представляет собой прямоугольный параллелепипед, размерами  $a \times b \times c$ , причём  $a \gg b$  (рис. 4 и 5). Две параллельные грани размерами  $b \times c$  полностью покрыты металлическими контактами - электродами. Электроды могут быть выполнены из листового свинца. Размер  $b$  ячейки может составлять десятки или первые сотни метров. Сама ячейка, исключая электроды, может быть выполнена из прочного диэлектрического материала. По нашему мнению, может подойти армированный бетон, покрытый слоем гидроизоляции, которая помимо основного назначения, и изолирует арматуру от электродов. Вся ячейка может собираться из отдельных блоков, приемлемых для монтажа размеров. Низ-

коомность измерительного прибора означает, что сопротивление измерительной схемы со стороны входа должно быть много меньше сопротивления между электродами, установленными в среде.

Измерительные ячейки устанавливаются в вырытые для них в земле щели так, чтобы грани  $b \times c$  были ориентированы вертикально, а нормали к вертикальным граням разных ячеек имели отличные одна от другой ориентации в горизонтальной плоскости. После установки должен быть обеспечен надёжный электрический контакт граней электродов с грунтом. Электроды граней в простейшем варианте экспериментальных установок подсоединяются к токовой измерительной схеме (рис.4). Теперь, если  $I_A$  – показания токового измерительного прибора, подсоединённого к ячейке А, составляющая плотности тока по направлению  $\vec{n}_A$  (перпендикуляр к грани  $bc$ ) составит  $j_A = I_A / bc$ , аналогично и для других ячеек.

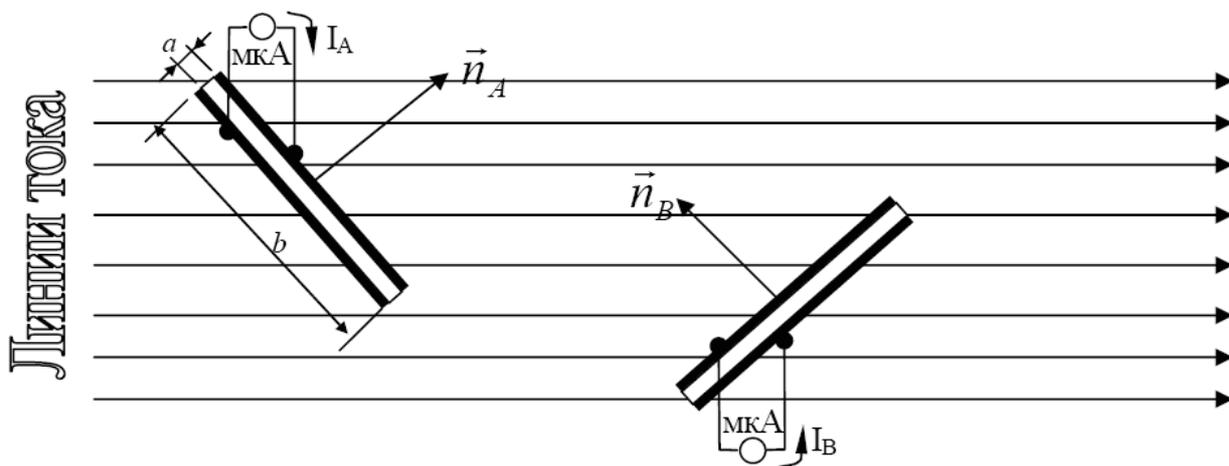


Рис. 4. Каждая из измерительных ячеек позволяет установить значение проекции вектора плотности тока по одному из направлений, помеченному вектором  $\vec{n}$  с индексом.

Вблизи непокрытых электродами краев измерительных ячеек линии земных токов искажаются. В принципе, это один из источников погрешностей измерений. Устранить такую погрешность можно разорвав электроды на расстояниях примерно  $a$  от их краёв, сделав таким образом то, что в технике гальваномагнитных измерений называют «охранными кольцами» [2] и пустив ток охранных колец мимо измерительных приборов. В последнем случае, составляющая плотности тока должна вычисляться по формуле  $j_A = I_A / S$ , где  $S$  – площадь электрода за вычетом площади охранного кольца (рис. 5.).

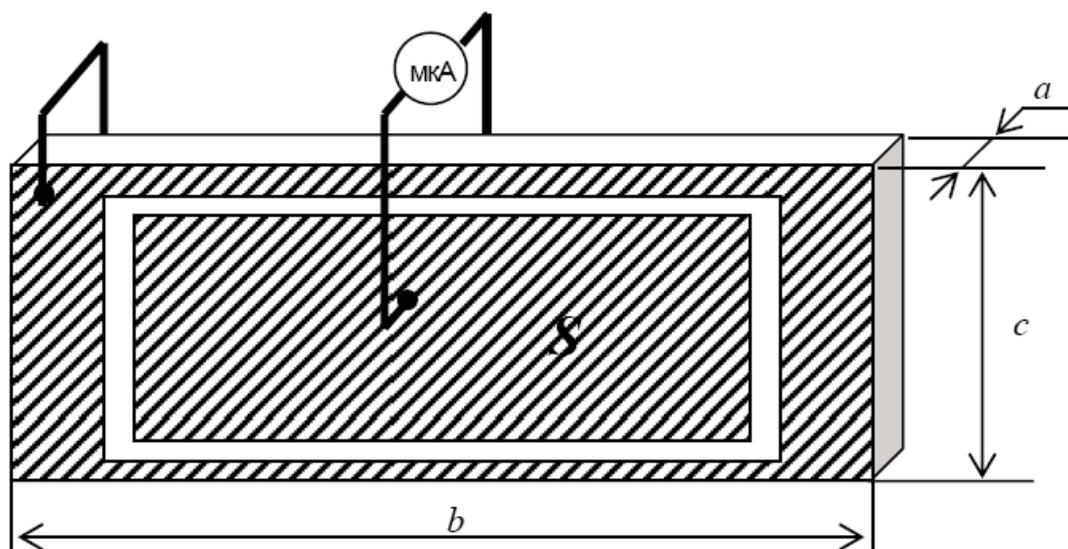


Рис. 5. Размеры измерительной ячейки: 1 – охранный кольцо; 2 – часть электрода, ток которого замыкается через измерительную схему с низким внутренним сопротивлением.

## **Выводы**

В работе указано на сложную и неоднозначную связь напряжённости электротеллурического поля с плотностью тока в геофизической среде. Обычно применяемые методы измерений позволяют достаточно точно установить значения проекций (составляющих) электротеллурических полей, однако значения плотностей токов при этом оказываются неопределёнными. Предложена схема измерений, следуя которой теллурические токи будут замыкаться напрямую через токовый измерительный прибор с низким сопротивлением. Геометрические размеры измерительных ячеек обеспечивают минимальные искажения токовых линий. Выполнение электродов с использованием охранного кольца позволит устранить дополнительные источники погрешностей, связанные с искажением токовых линий вблизи краёв измерительной ячейки.

По нашему мнению, предложенная схема измерений является оптимальной для случая, когда составляющая индукционного тока в полном по абсолютной величине намного превосходит омическую. В этом случае, электроды вносят минимальные искажения в картину линий тока. Однако, если превалирует омическая составляющая, можно ожидать искажения картины линий эквипотенциалей электротеллурического поля электродами большого размера. В силу этого, полностью устранить погрешности измерений невозможно.

Неоднородное мозаичное строение геофизической среды, должно находить отражение и в подобных особенностях распределения электропроводности. В свою очередь, это приводит и к неоднородному распределению ориентаций и абсолютных значений векторов плотности тока, напряжённости электрического поля. Комбинирование прямых измерений вектора плотности тока по предложенному методу и напряжённости электрического поля традиционными методами позволят получать более полную информацию, об электрических составляющих геофизических полей. Связь локальных геомагнитных вариаций с земными токами позволит, измеряя последние, прояснить особенности их взаимообусловленности.

## **Список литературы**

1. Кролевец А.Н., Копылова Г.Н. Приливные составляющие в электротеллурическом поле. //Физика Земли. 2003. №5 С. 75-84
2. Кучис Е.В. Методы исследования эффекта Холла. М.: Сов. Радио, 1974. 328 с.
3. Добровольский В.Н., Кролевец А.Н. Холловский ток и его использование для исследования полупроводников. (Обзор). //Физики и техника полупроводников. 1983. т.17, №1, С. 3-12.