

## Локализации положения проводящих аномальных объектов с помощью локальных и региональных реальных индукционных векторов

А.Л. Лозовой\*(Национальный горный университет), Я.В. Мендрий (Национальный горный университет), И.А. Ингеров (Advanced Geophysical Operations and Services Inc.)

### Введение

Индукционные векторы, их также называют векторами Визе [Wiese, 1965], Шмукера [Schmucker, 1970], Паркинсона [Parkinson, 1959], являются функциями отклика среды на электромагнитное (ЕМ) воздействие в магнитовариационном методе. В вычислении векторов принимают участие три ортогональные магнитные компоненты естественного переменного ЕМ поля Земли ( $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ). Возможен выбор направления реального индукционного вектора либо на проводящую неоднородность (конвенция Паркинсона), либо от нее (конвенция Визе). На практике, как правило, используются индукционные векторы в конвенции Паркинсона. Реальные индукционные векторы являются мощным инструментом для определения местоположения в плане и в глубину одиночных проводящих объектов [Ермолин, 2011, Ermolin, 2014]. Однако картина в поведении векторов становится не такой однозначной, если на карте отмечается несколько таких объектов. В этом случае требуются объективные инструменты, позволяющие разделить влияние отдельных объектов и локализовать их положение. В данной работе рассмотрен принцип разделения поля индукционных векторов на локальную и региональную составляющую, что позволяет повысить качество оперативной интерпретации метода МВП. Значительное увеличение применения метода МВП для поисков рудных объектов в последние годы подчеркивает актуальность сформулированной авторами настоящей работы задачи.

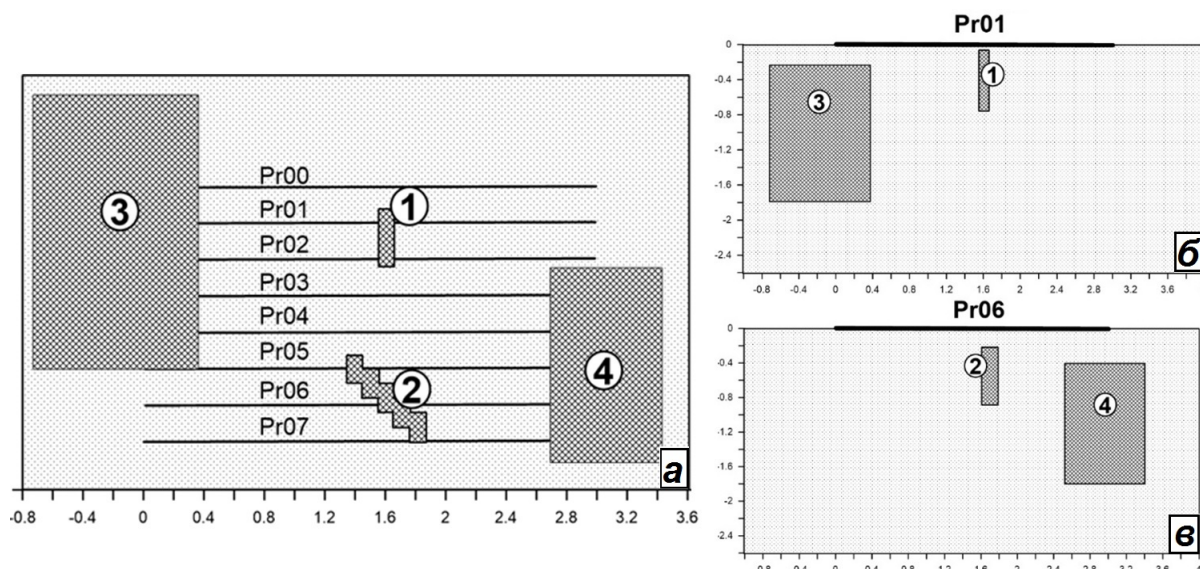
### Принцип разделения поля индукционных векторов на региональную и локальную компоненты

В результате полевых наблюдений трех компонент поля геомагнитных вариаций (двух горизонтальных  $H_x$  и  $H_y$ , а также вертикальной  $H_z$ ) в каждой точке сети наблюдений определен, в частности, действительный индукционный вектор в конвенции Паркинсона  $ReW_{исх}$  [Рокитянский, 1975, Rokityansky, 1982]. В поле наблюдаемых индукционных векторов приповерхностные проводящие объекта (рудные зоны) зачастую камуфлируются влиянием глубинных проводников, а также близко расположенных других рудных зон. Это затрудняет непосредственное использование наблюдаемых индукционных векторов для трассирований осей рудных жил. Одним из направлений повышения эффективности метода МВП при поисках локальных проводящих объектов является разделение поля индукционных векторов на региональную и локальную составляющие. Региональная составляющая  $ReW_{рег}$  в каждой точке наблюдений определяются как средний вектор из заданного количества векторов  $ReW_{исх}$  в ближайших точках сети. Локальная составляющая  $ReW_{лок}$  в каждой точке сети определяется как разность между исходным и региональным векторами. Этот принцип реализован программой в среде Matlab. Программа представляет собой удобный инструмент для анализа распределения индукционных векторов в плане и разрезе и служит для оперативной интерпретации полевых данных.

### Тестирование программы на модельных данных

Для демонстрации распределения действительных индукционных векторов Паркинсона была решена прямая задача МВП для модели, показанной на рисунке 1. Здесь коренные породы с удельным электрическим сопротивлением 1000 Ом·м перекрыты рыхлыми отложениями мощностью 20 метров и сопротивлением 20 Ом·м (существенный экран, маскирующий глубинные объекты). В коренных породах находятся четыре проводящих объекта различной формы и сопротивления:

- №1: сопротивление 30 Ом·м, ширина 100 м, глубина до верхней кромки 50 м, до нижней 700 м, площадь сечения тела составляет  $100 \times 650 = 65000 \text{ м}^2$ , проводимость сечения тела  $G = 65000 : 30 = 2167 \text{ См·м}$ ;
- №2: сопротивление 30 Ом·м, ширина 100 м, глубина до верхней кромки 100 м, до нижней 800 м; площадь сечения тела составляет  $100 \times 700 = 70000 \text{ м}^2$ , проводимость сечения тела  $G = 70000 : 30 = 2333 \text{ См·м}$ , то есть близко к проводимости сечения первого тела;



**Рисунок 1** Геоэлектрическая модель рудного поля. а – план; б – разрез вдоль профиля №1; в - разрез вдоль профиля №6

- №3: сопротивление 40 Ом·м, ширина тела 1200 м, глубина до верхней кромки 250 м, до нижней 1550 м, площадь сечения тела составляет  $1200 \times 1300 = 1\,560\,000 \text{ м}^2$ , проводимость сечения тела  $G = 1\,560\,000 : 40 = 39\,000 \text{ См·м}$ , то есть более, чем на порядок превышает проводимости сечения двух предыдущих проводящих тел;
- №4: сопротивление 10 Ом·м, ширина составляет 800 м, глубина до верхней кромки 400 м, до нижней 1200 м, площадь сечения тела составляет  $800 \times 800 = 640\,000 \text{ м}^2$ , проводимость сечения тела  $G = 640\,000 : 40 = 16\,000 \text{ См·м}$ , то есть более, чем в два раза меньше, чем у третьего тела, к тому же тело расположено глубже.

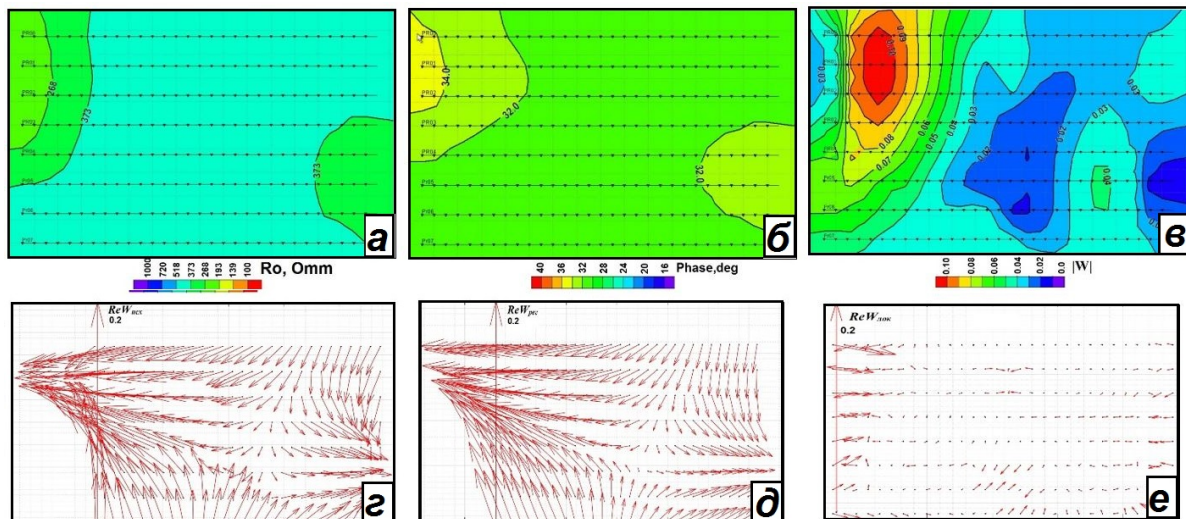
Расчеты векторов  $ReW_{исх}$  выполнены на регулярной сети 100x250 метров вдоль восьми профилей по тридцать пикетов на каждом в диапазоне частот от 0.1 до 10400 Гц.

### Анализ модельных результатов

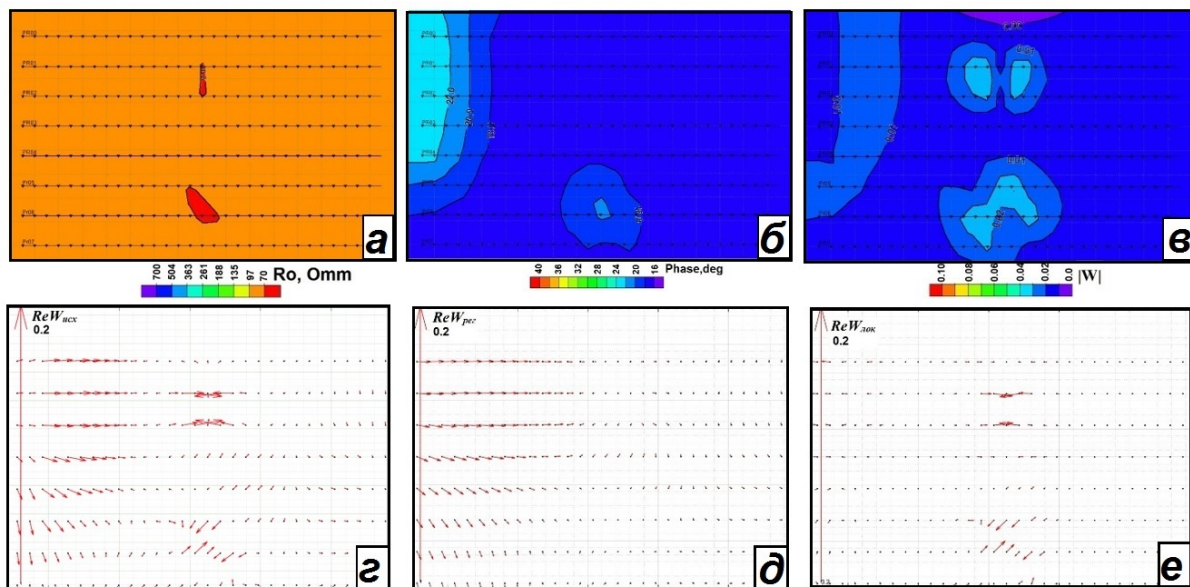
На рисунках 2-4 приведены карты синтетических магнитотеллурических параметров на частотах 1000, 316 и 31.6 Гц для модели рудного поля представленной выше.

Для частоты 1000 Гц на карте инвариантного удельного электрического сопротивления (рисунок 2, а) очень слабо (на уровне точности) проявляются наиболее близкие к поверхности объекты №1 и №2. На карте фазы импеданса (рисунок 2, б) проявляется южный объект №2 и проводящий западный объект №3. На карте магнитуды типпера (рисунок 2, в) находят слабое отражение два центральных и западный проводящие объекты. Индукционные векторы на частоте 1000 Гц, как  $ReW_{рег}$  (рисунок 2, д) так и  $ReW_{лок}$  (рисунок 2, е), указывают на объекты №1 и №2, причем наиболее ярко региональная компонента отражает приповерхностный объект №2.

Для частоты 316 Гц на карте инвариантного удельного электрического сопротивления (рисунок 3, а) проявляется только западный объект №3; приповерхностные объекты №1 и №2 никак не отражаются. На карте фазы импеданса (рисунок 3, б) проявляются как западный



**Рисунок 2** Карты амплитуды инвариантного удельного электрического сопротивления (а), фазы инвариантного импеданса (б), магнитуды модуля типпера (в), синтетических  $ReW_{исх}$  (г), региональных  $ReW_{рег}$  (д) и локальных  $ReW_{лок}$  (е) векторов Паркинсона на частоте 1000 Гц

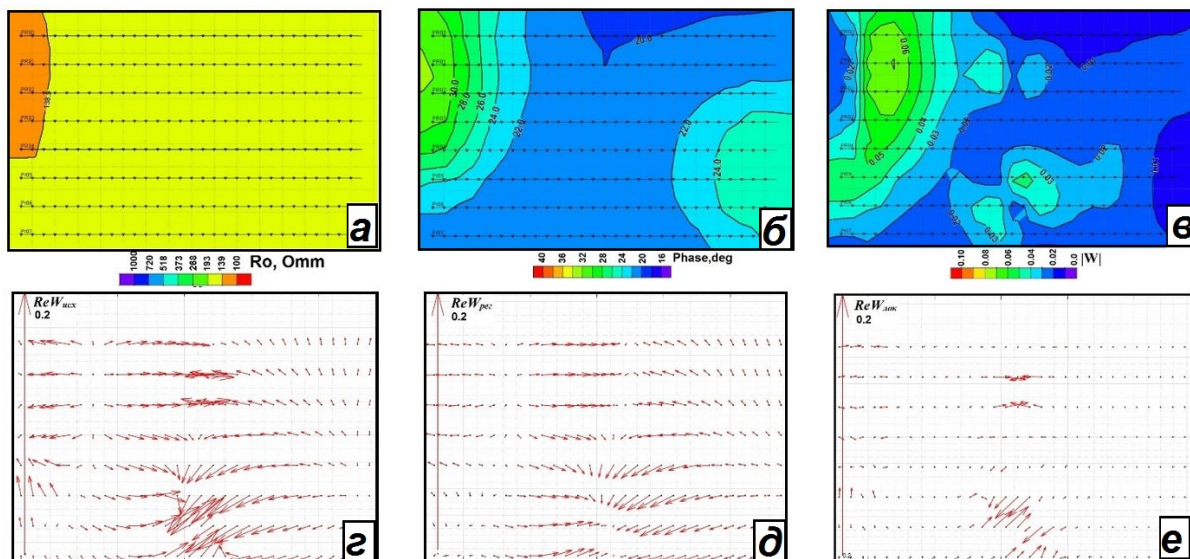


**Рисунок 3** Карты амплитуды инвариантного удельного электрического сопротивления (а), фазы инвариантного импеданса (б), магнитуды модуля типпера (в), синтетических  $ReW_{исх}$  (г), региональных  $ReW_{рег}$  (д) и локальных  $ReW_{лок}$  (е) векторов Паркинсона на частоте 316 Гц

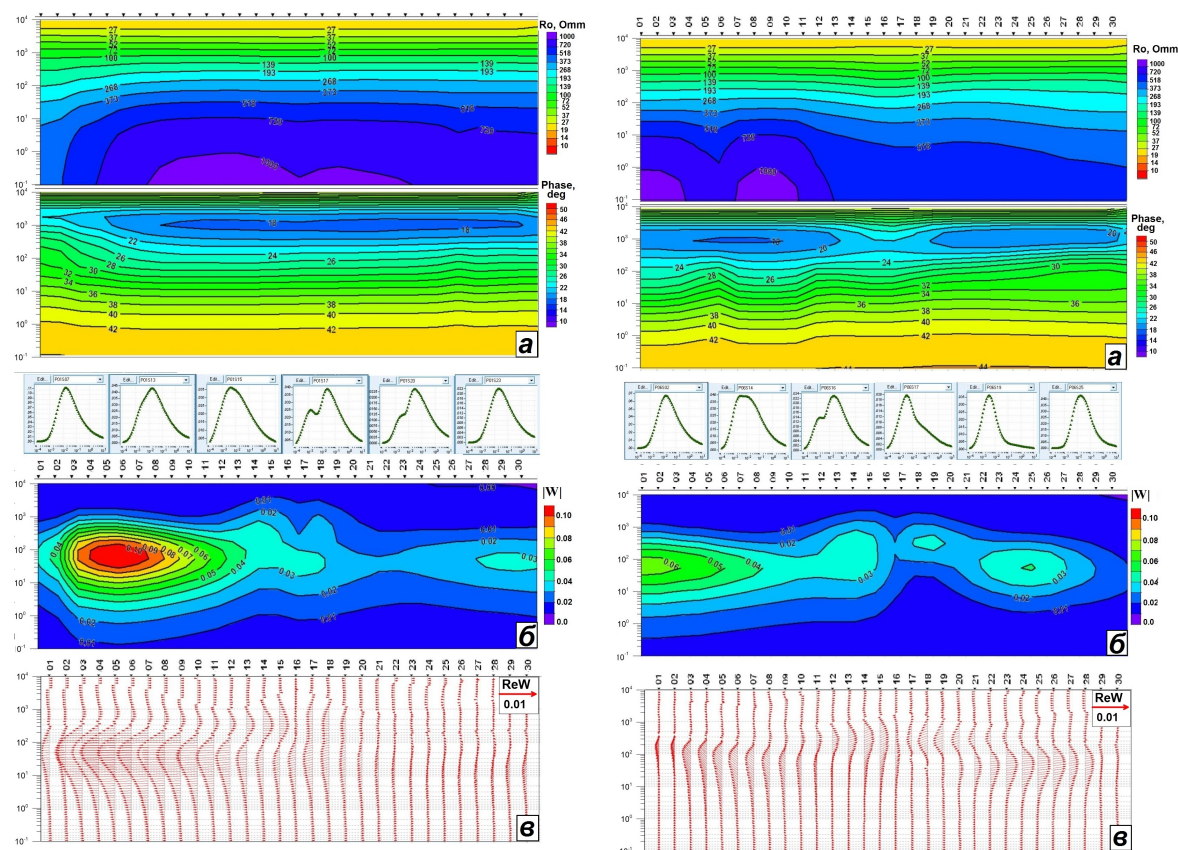
объект №3, так и восточный №4. На карте магнитуды типпера (рисунок 3, в) находят слабое отражение два центральных и восточный объекты. Индукционные векторы на частоте 316 Гц, как  $ReW_{рег}$  (рисунок 3, д) так и  $ReW_{лок}$  (рисунок 3, е), указывают на объекты №1, №2 и №3, причем наиболее ярко региональная и локальная компоненты отражают приповерхностные объекты.

Для частоты 31.6 Гц на карте инвариантного удельного электрического сопротивления (рисунок 4, а) проявляется только западный объект №3; приповерхностные объекты №1 и №2 и глубинный объект №4 никак не отражаются. На карте фазы импеданса (рисунок 4, б) проявляются как западный объект №3, так и восточный №4. На карте магнитуды типпера (рисунок 4, в) находят слабое отражение два центральных и восточный объекты.





**Рисунок 4** Карты амплитуды инвариантного удельного электрического сопротивления (а), фазы инвариантного импеданса (б), магнитуды модуля типпера (в), синтетических  $ReW_{исх}$  (г), региональных  $ReW_{рег}$  (д) и локальных  $ReW_{лок}$  (е) векторов Паркинсона на частоте 31.6 Гц



**Рисунок 5** Амплитуда инвариантного удельного электрического сопротивления и фазы инвариантного импеданса (а), магнитуды модуля типпера (б), синтетических  $ReW_{исх}$  векторов Паркинсона (в) вдоль профиля 01

**Рисунок 6** Амплитуда инвариантного удельного электрического сопротивления и фазы инвариантного импеданса (а), магнитуды модуля типпера (б), синтетических  $ReW_{исх}$  векторов Паркинсона (в) вдоль профиля 06

Индукционные векторы на частоте 31.6 Гц  $ReW_{рег}$  (рисунок 4, д) отражает западный и восточный объекты №3 и №4. Локальная составляющая и  $ReW_{лок}$  (рисунок 4, е) несет информацию о всех четырех проводниках на участке.

Таким образом, удельное электрическое сопротивление и фаза импеданса являются наименее информативными параметрами при локализации проводящих зон на рудных месторождениях, в то время как аномалии типпера обладают значительно большей разрешающей способностью. Следует отметить, что локальная составляющая индукционного вектора  $ReW_{лок}$  позволяет трассировать оси линейных проводящих объектов по точкам разворота векторов.

На рисунках 5-6 представлены частотные разрезы синтетических магнитотеллурических параметров для модели рудного поля вдоль профилей 01 и 06, анализируя которые можно отметить следующее. При локализации проводящих зон на рудных месторождениях информативность разрезов удельного электрического сопротивления и фаза импеданса достаточно низкая (рисунок 5, а и 6, а). На частотных разрезах типпера (рисунок 5, б и 6, б) достаточно уверенно выделяются все проводящие объекты. Причем, объекты № 1 (профиль 01) и 2 (профиль 06) проявлены в виде сложных аномалий, состоящих из двух максимумов, разделённых минимумом, что свидетельствует о нахождении проводника непосредственно под линией наблюдения.

Особенно ярко проводники проявляются на частотных характеристиках типпера, показанных там же для некоторых пикетов профилей. Рассмотрим это более детально. На профиле 01 на ПК07 виден яркий максимум, связанный с западным проводящим объектом №3. По мере увеличения пикетов и приближению к северному объекту №1 на частотных характеристиках появляется второй экстремум (ПК13-ПК15). Максимальное влияние северного объекта наблюдается на ПК17. Аномалии типпера на восточном конце профиля (ПК23 и далее) обусловлены объектом №4, расположенным в стороне от профиля. На профиле 06 находят свое отражение объекты №2, 3, 4. В западной части профиля (ПК02) максимум частотной характеристики обусловлен объектом №3. На ПК16 экстремумы соответствуют проводящим объектам №2, 3, на ПК17 - №2, 4. В восточной части профиля (ПК 19 и далее) проявлен только объект №4. Не менее активно реагируют на проводники векторы Паркинсона (рисунок 5, в и рисунок 6, в).

Таким образом, на этапе поисков рудных жил следует отдавать предпочтение методу МВП, используя аномалии типпера и индукционные векторы в конвенции Паркинсона. Метод МТЗ в данном комплексе на втором этапе позволяет оценить глубину залегания проводников в разрезе путем физико-математического моделирования вдоль профилей, пересекающих установленные на этапе поисков рудных образований [Berdichevsky and Dmitriev, 2008].

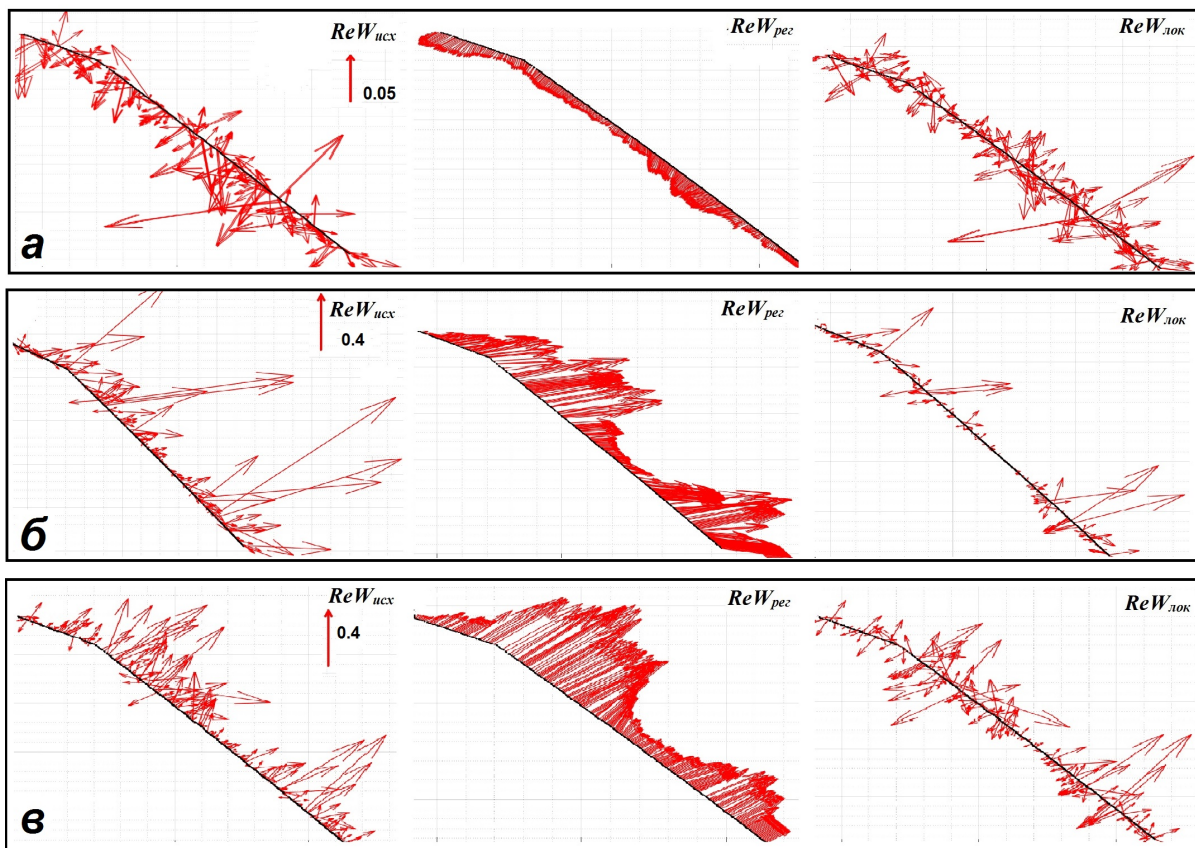
На рисунке 7 представлены наблюдаемые векторы Паркинсона на региональном профиле, где были выполнены магнитотеллурические (МТЗ и МВП в диапазоне частот от 0.001 до 10400 Гц шагом 1 км) исследования с целью изучения общих закономерностей геологического строения региона. Обращает на себя внимание поведение региональных векторов, имеющих преимущественную ориентировку в юго-западном направлении (рисунок 7, а) на высоких частотах и практически противоположную (северо-восточную) на низких (рисунок 7, б и 7, в). Этот факт разворота векторов может быть объяснен влиянием проводящего осадочного бассейна на высоких частотах и глубинных литосферных проводников на низких. Локальные векторы имеют сложное распределение, указывая на наличие многочисленных проводящих неоднородностей, как непосредственно на геотраверсе, так и в стороне от него. Таким образом региональная часть позволяет выделить крупные блоки в земной коре, а локальная положение разрывных нарушений и объектов внутри этих блоков.

## Выводы

1. Как свидетельствуют результаты физико-математического моделирования, наиболее чувствительной функцией отклика на локальные проводящие объекты являются индукционные векторы в конвенции Паркинсона.



2. Разделение поля индукционных векторов на региональную и локальную составляющие  $ReW_{рег}$  и  $ReW_{лок}$  позволяет установить в плане компактные проводники, не различимые в поле  $ReW_{исх}$ .
3. Использование программы разделение поля индукционных векторов позволяет локализовать сразу несколько, расположенных на ограниченном пространстве локальных объектов.
4. Перспективность любого линезионного объекта на рудные полезные ископаемые может быть оперативно оценена по результатам комплекса МТЗ-МВП с плотностью четыре точки на 1 квадратный километр площади.



**Рисунок 7** Наблюдаемые  $ReW_{исх}$ , региональные  $ReW_{рег}$  и локальные  $ReW_{лок}$  векторы Паркинсона вдоль геотраверса на частотах 1000 Гц (а), 10 Гц (б) и 1 Гц (в).

### Библиография

1. Berdichevsky, M.N. and V.I. Dmitriev [2008] Models and methods of Magnetotellurics: Springer-Verlag.
2. Parkinson, W.D. [1959] Direction of rapid electromagnetic fluctuation: Geophysical Journal International, 2 (1), 1–14, DOI 10.1111/j.1365-246X.1959.tb057.
3. Рокитянский, И.И. [1975] Исследование аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования. Наукова Думка, Киев, 279 стр.
4. Rokityansky, I.I. [1982] Geoelectromagnetic investigation of the earth's crust and mantle: Springer-Verlag.
5. Schmucker, U. [1970] Anomalies of geomagnetic variations in the southwestern United States: Bulletin of the Scripps Institution of Oceanography, University of California Press.

6. Wiese, H. [1965] Geomagnetic Tiefentellurik: Deutsche Akademie der Wissenschaften, Geomagnetic Institute Potsdam, Abhandlungen, 36, 1–146.
7. Ермолин, Е., Ингеров, А.И., Ингеров, И.А. [2011] Картирование субвертикальных проводящих объектов по данным МВП. Всероссийская школа-семинар посвященная М.Н. Бердичевскому и Л.Л. Ваньяну по электромагнитным исследованиям земной коры. Санкт-Петербург, Россия, С.245-249
8. Ermolin, E., Ingerov, O., Ingerov, I. [2014] Evaluation of 3-D ore bodies parameters using tipper frequency response 76-th EAGE Conference and Exhibition 2014, 16-19 June 2014, We P05 10.

## References

1. Berdichevsky, M.N. and V.I. Dmitriev [2008] Models and methods of Magnetotellurics: Springer-Verlag.
2. Parkinson, W.D. [1959] Direction of rapid electromagnetic fluctuation: Geophysical Journal International, 2 (1), 1–14, DOI 10.1111/j.1365-246X.1959.tb057.
3. Rokityansky, I.I. [1975] Investigation of electrical conductivity anomalies by the method of magnetovariation profiling: Naukova Dumka.
4. Rokityansky, I.I. [1982] Geoelectromagnetic investigation of the earth's crust and mantle: Springer-Verlag.
5. Schmucker, U. [1970] Anomalies of geomagnetic variations in the southwestern United States: Bulletin of the Scripps Institution of Oceanography, University of California Press.
6. Wiese, H. [1965] Geomagnetic Tiefentellurik: Deutsche Akademie der Wissenschaften, Geomagnetic Institute Potsdam, Abhandlungen, 36, 1–146.
7. Ermolin, E., Ingerov, O., Ingerov, I. [2011] Mapping of vertical conductivity bodies by MVP. All-Russian school-workshop dedicated to M.N. berdichevsky and I.I. Vaniyn of electromagnetic researches of the Earth. Saint-Peterburg, Russia, P.245-249.
8. Ermolin, E., Ingerov, O., Ingerov, I. [2014] Evaluation of 3-D ore bodies parameters using tipper frequency response 76-th EAGE Conference and Exhibition 2014, 16-19 June 2014, We P05 10.