

УДК 550.372 + 550.837

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ
БИШКЕКСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГНОСТИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА**

Е.А. Баталева, О.Б. Забинякова, В.Ю. Баталев

Разработано программное обеспечение и представлены результаты анализа данных магнитотеллурического мониторинга и профилейных наблюдений для территории Бишкекского прогностического полигона.

Ключевые слова: естественное электромагнитное поле; магнитотеллурический мониторинг; тензор импеданса; фазовый тензор; векторы Визе; псевдоразрезы.

**SOFTWARE DEVELOPMENT FOR MONITORING ELECTROMAGNETIC PARAMETERS
OF THE BISHKEK GEODYNAMIC PROVING GROUND**

E.A. Bataleva, O.B. Zabinyakova, V.Yu. Batalev

The software and the results of the magnetotelluric data analysis and monitoring of relevant observations for the territory of Bishkek geodynamic proving ground is developed.

Keywords: natural electromagnetic field; magnetotelluric monitoring; impedance tensor; phase tensor; vector Wiese; pseudosections.

В настоящее время результативность магнитотеллурических (МТ) и магнитовариационных (МВ) мониторинговых исследований на территории Тяньшанского региона связана, прежде всего, с использованием возможностей современной измерительной аппаратуры для осуществления полевого эксперимента [1–3], развитием методик обработки и интерпретации магнитотеллурических данных [4–7], а также с разработкой программного обеспечения, ориентированного на оптимизацию геофизических работ [8–10]. На сегодняшний день важнейшей задачей является уточнение и детализация имеющихся геоэлектрических построений, а также более тщательный анализ распределения электромагнитных свойств изучаемой геосреды при проведении количественной интерпретации МТ-МВ данных, полученных в Тяньшанском регионе и их мониторинг [11–14]. Для успешного проведения мониторинговых исследований Научной станцией РАН выполнено детальное МТ-МВ профилирование по серии субмеридиональных и субширотных профилей на территории Бишкекского геодинамического полигона (БГП), в первую очередь, с целью изучения тонкой геоэлектрической структуры одной из наиболее сейсмоактивных и сложно устроенных разломных зон Тянь-Шаня [1].

В связи со значительной анизотропией электрических свойств среды, обусловленной резко неоднородным геологическим строением Бишкекского геодинамического полигона, необходим детальный анализ процессов, связанных с геодинамикой региона. По мнению авторов, эти процессы отражаются в мониторинговых МТ-наблюдениях, при этом временные ряды вариаций компонент тензора импеданса рассматриваются в зависимости от азимута (азимутальный мониторинг), а не только по направлениям ху и ух, (т. е. 0° и 90°), по которым, как правило, производятся полевые измерения тензора импеданса. Однако существующие стандартные программные средства не предназначены для обработки данных по методике азимутального мониторинга, особенностью которого являются преобразования огромных объемов данных. Другим трудоемким моментом в работе геофизика-интерпретатора является отсутствие программ, позволяющих осуществлять вычисление и построение (карт и разрезов) таких электромагнитных параметров, как фазовый тензор, магнитовариационные характеристики и параметры неоднородности. Разработка программного обеспечения, включающего в себя конвертацию магнитотеллурических данных из формата ed1 в формат xlsx и последующие

вычисления электромагнитных параметров, необходимые для оперативного анализа мониторинговых данных позволяет оптимизировать систему геофизического мониторинга Бишкекского геодинамического полигона.

Создание конвертера EDI2XLSX осуществлялось в среде Microsoft Visual Studio 2010: в программной среде, которая позволяет разработчикам достаточно легко создавать приложения различной сложности для работы в операционной системе Windows. Код программы написан на объектно-ориентированном языке программирования C#. Требуемая версия программной платформы – .NET Framework 4.

При проектировании интерфейса программы использовали стандартные элементы управления Microsoft Visual Studio 2010, которые позволили разработать графический интерфейс: программа работает в интерактивном режиме, то есть пользователь вручную через диалоговые окна выбирает исходные данные, необходимые для дальнейшей работы, может просматривать содержимое выбранных файлов, выполнять и отслеживать некоторые дополнительные расчеты, а также сохранять необходимые значения параметров в excel-таблицы (рисунок 1).

Функционирование конвертера осуществляется с помощью следующих библиотек и пространств имен: System, System.Collections.Generic,

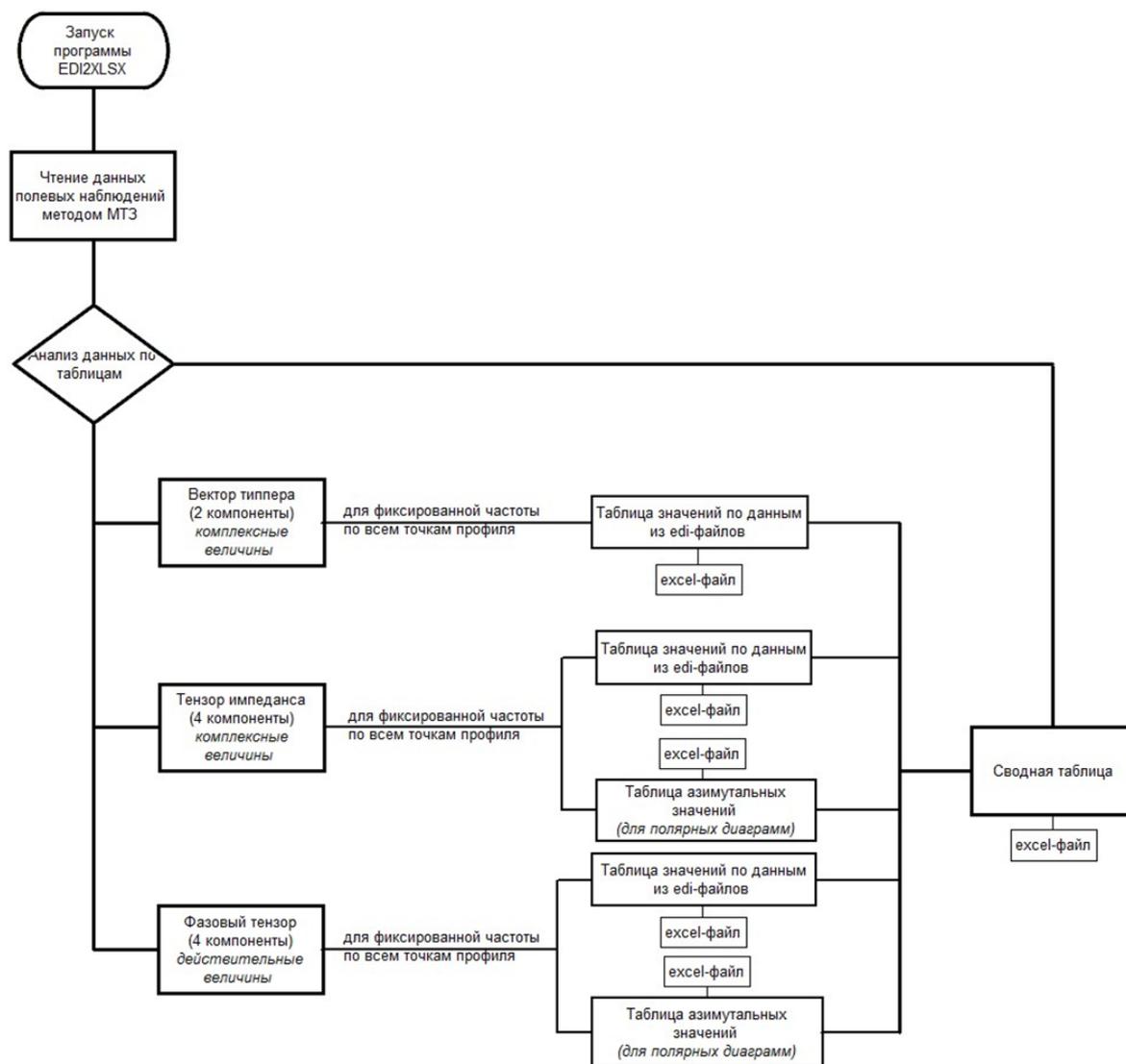


Рисунок 1 – Блок-схема вычисления электромагнитных параметров из edi-файла (переформатирование в excel-таблицу) и создания сводной таблицы

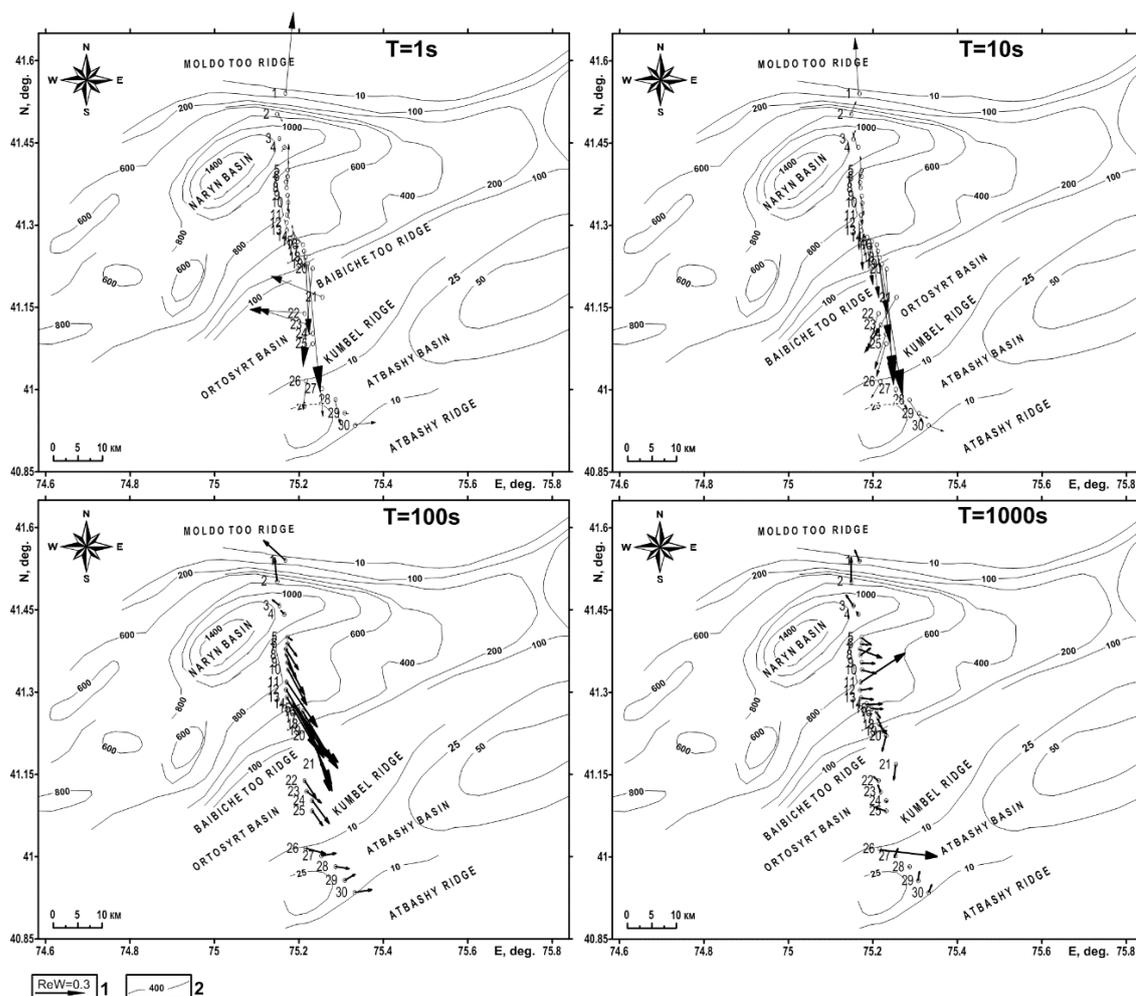


Рисунок 2 – Пример построения реальных векторов Визе для периодов 1, 10, 100, 1000 вдоль магнитотеллурического профиля “Карабук”

System.Text, System.Windows.Forms, System.IO, Microsoft.Office.Interop.Excel, System.Numerics.

Таблицы, формируемые при работе приложения, содержат значения следующих магнитотеллурических функций:

➤ *вектор тинпера* [15]:

$$T = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \end{pmatrix}.$$

Компоненты этого вектора являются комплексными величинами, определяемыми по вертикальному (аномальному) магнитному полю. Согласно [15], эти функции отражают горизонтальную асимметрию избыточных токов гальванической и индукционной природы, возникающих в Земле вследствие горизонтальных изменений электропроводности. Табличные значения функций считываются из выбранных edi-файлов.

➤ *тензор импеданса* [15]:

$$Z = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix}.$$

Компоненты тензора импеданса являются комплексными величинами, характеризующими взаимосвязь горизонтальных электрических и магнитных составляющих магнитотеллурического поля. Согласно [15], тензор импеданса отражает электрическую структуру Земли. Из edi-файлов считываются значения действительных и мнимых частей четырех компонент тензора импеданса. Также в программе рассчитываются азимутальные значения тензора импеданса (для построения полярных диаграмм), получаемые при повороте системы координат на некоторый угол α по формулам (2.1)–(2.4), приведенным в работе [15]:

$$Z_{xx}^{\alpha}(T) = Z_{xx} \cos^2 \alpha + Z_{yy} \sin^2 \alpha + (Z_{xy} + Z_{yx}) \sin \alpha \cos \alpha, \quad (2.1)$$

$$Z_{xy}^{\alpha}(T) = Z_{xy} \cos^2 \alpha - Z_{yx} \sin^2 \alpha - (Z_{xx} - Z_{yy}) \sin \alpha \cos \alpha, \quad (2.2)$$

$$Z_{yx}^{\alpha}(T) = Z_{yx} \cos^2 \alpha - Z_{xy} \sin^2 \alpha - (Z_{xx} - Z_{yy}) \sin \alpha \cos \alpha, \quad (2.3)$$

$$Z_{yy}^{\alpha}(T) = Z_{yy} \cos^2 \alpha + Z_{xx} \sin^2 \alpha - (Z_{xy} + Z_{yx}) \sin \alpha \cos \alpha. \quad (2.4)$$

Значения кажущихся сопротивлений и фазы импеданса определяются с помощью соответствующих соотношений:

$$\rho_m(T) = \frac{T |Z_m(T)|^2}{2\pi\mu_0}, \quad m = xx, xy, yx, yy,$$

$$\rho_m^{\alpha}(T) = \frac{T |Z_m^{\alpha}(T)|^2}{2\pi\mu_0}, \quad m = xx, xy, yx, yy, \quad (2.5)$$

$$\varphi_m^{\alpha}(T) = \text{Arg}(Z_m^{\alpha}(T)), \quad \varphi_m(T) = \text{Arg}(Z_m(T)) \quad (2.6)$$

➤ фазовый тензор [6]:

$$\Phi = \begin{pmatrix} \Phi_{xx} & \Phi_{xy} \\ \Phi_{yx} & \Phi_{yy} \end{pmatrix}.$$

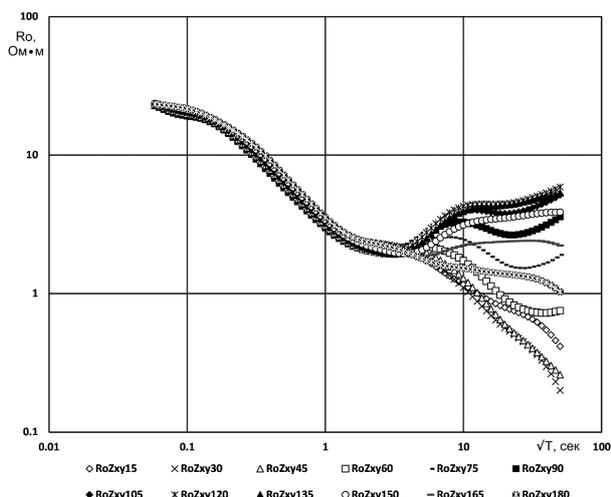


Рисунок 3 – Пример построения трансформант тензора импеданса для магнитотеллурического профиля “Карабук”

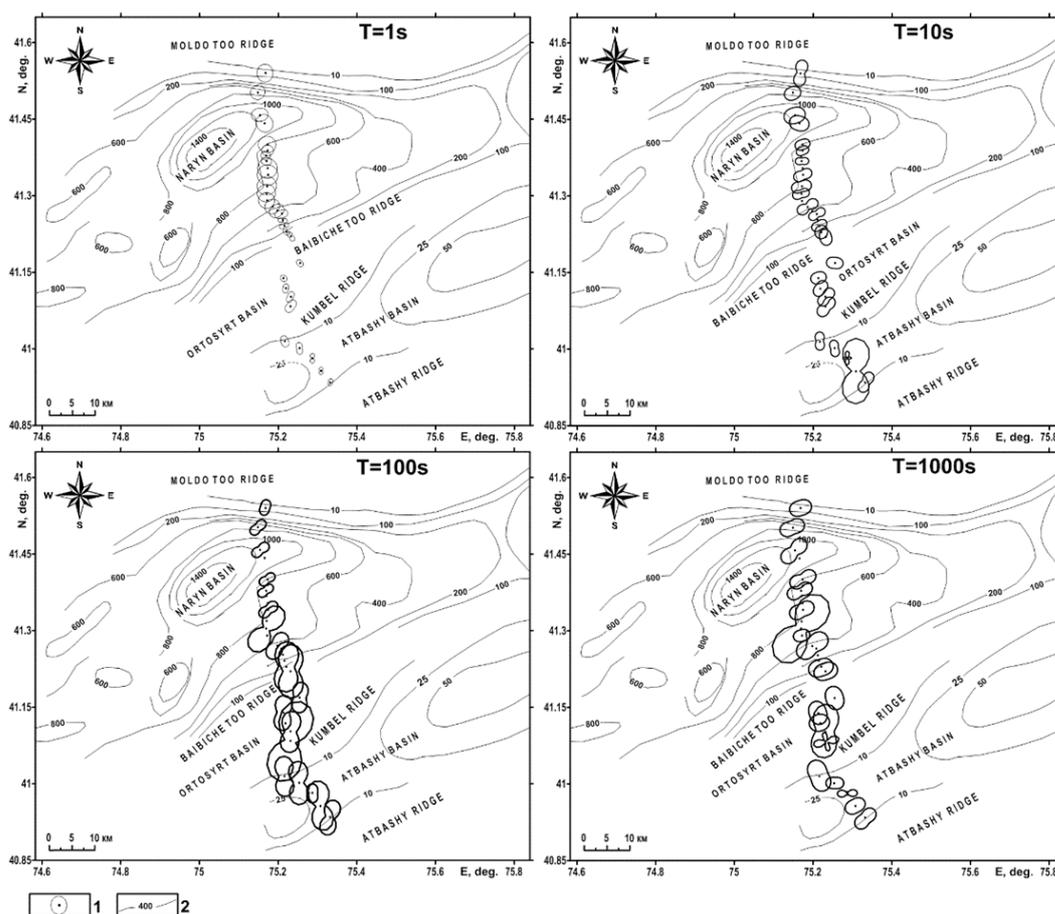


Рисунок 4 – Пример построения полярных диаграмм фазового тензора для периодов 1, 10, 100, 1000 с по профилю “Карабук”

Компоненты тензора – действительные величины, вычисляемые с помощью значений тензора импеданса по формулам (2.7)–(2.10):

$$\Phi_{xx} = \frac{\operatorname{Re} Z_{yy} \operatorname{Im} Z_{xx} - \operatorname{Re} Z_{xy} \operatorname{Im} Z_{yx}}{\operatorname{Re} Z_{xx} \operatorname{Re} Z_{yy} - \operatorname{Re} Z_{xy} \operatorname{Re} Z_{yx}}, \quad (2.7)$$

$$\Phi_{xy} = \frac{\operatorname{Re} Z_{yy} \operatorname{Im} Z_{xy} - \operatorname{Re} Z_{xy} \operatorname{Im} Z_{yy}}{\operatorname{Re} Z_{xx} \operatorname{Re} Z_{yy} - \operatorname{Re} Z_{xy} \operatorname{Re} Z_{yx}}, \quad (2.8)$$

$$\Phi_{yx} = \frac{\operatorname{Re} Z_{xx} \operatorname{Im} Z_{yx} - \operatorname{Re} Z_{yx} \operatorname{Im} Z_{xx}}{\operatorname{Re} Z_{xx} \operatorname{Re} Z_{yy} - \operatorname{Re} Z_{xy} \operatorname{Re} Z_{yx}}, \quad (2.9)$$

$$\Phi_{yy} = \frac{\operatorname{Re} Z_{xx} \operatorname{Im} Z_{yy} - \operatorname{Re} Z_{xy} \operatorname{Im} Z_{yx}}{\operatorname{Re} Z_{xx} \operatorname{Re} Z_{yy} - \operatorname{Re} Z_{xy} \operatorname{Re} Z_{yx}}. \quad (2.10)$$

Согласно [15, 16], фазовый тензор свободен от локальных приповерхностных искажений и зависит только от региональной структуры.

При повороте осей системы координат на угол α по часовой стрелке компоненты фазового тензора изменяются по законам (2.11)–(2.12):

$$\Phi_{xx}(\alpha) = \Phi_2 + \Phi_3 \sin 2\alpha + \Phi_4 \cos 2\alpha, \quad (2.11)$$

$$\Phi_{xy}(\alpha) = \Phi_1 + \Phi_3 \cos 2\alpha - \Phi_4 \sin 2\alpha, \quad (2.12)$$

где

$$\Phi_1 = \frac{\Phi_{xy} - \Phi_{yx}}{2}, \Phi_2 = \frac{\Phi_{xx} + \Phi_{yy}}{2}, \Phi_3 = \frac{\Phi_{xy} + \Phi_{yx}}{2}, \Phi_4 = \frac{\Phi_{xx} - \Phi_{yy}}{2}.$$

Для построения полярных диаграмм фазового тензора, которые характеризуют размерность региональных структур, используются соотношения (2.13)–(2.14):

$$\varphi_{xx}(\alpha) = |\operatorname{arctg} \Phi_{xx}(\alpha)| = |\operatorname{arctg}(\Phi_2 + \Phi_3 \sin 2\alpha + \Phi_4 \cos 2\alpha)|, \quad (2.13)$$

$$\varphi_{xy}(\alpha) = |\operatorname{arctg} \Phi_{xy}(\alpha)| = |\operatorname{arctg}(\Phi_1 + \Phi_3 \cos 2\alpha - \Phi_4 \sin 2\alpha)|. \quad (2.14)$$

Ниже приведены примеры использования разработанного программного обеспечения для обработки натурных данных магнитотеллурического зондирования вдоль профиля Карабук (рисунки 2–4).

Таким образом, создан интерактивный программный инструмент, обеспечивающий эффективное хранение и углубленную обработку материалов полевых электромагнитных наблюдений методом магнитотеллурического зондирования, представленных в международном формате – EDI. В рамках углубленного анализа электромагнитных данных реализованы процедуры расчета компонент тензора импеданса и фазового тензора в зависимости от угла поворота системы координат относительно исходной ориентации компонент электромагнитного поля на разных периодах и построения полярных диаграмм тензора импеданса и фазового тензора.

Исследования осуществляются в рамках выполнения Государственного задания ФГБУН ИС РАН в г. Бишкеке на 2016–2018 гг. (Тема 128.1).

Литература

1. Рыбин А.К. Площадные магнитотеллурические зондирования в сейсмоактивной зоне Северного Тянь-Шаня / А.К. Рыбин, В.В. Спичак, В.Ю. Баталев, Е.А. Баталева, В.Е. Матюков // Геология и геофизика. 2008. № 5. С. 445–460.
2. Баталева Е.А. Аномалии электропроводности зоны Таласо-Ферганского разлома и геодинамическая интерпретация глубокой структуры Юго-Западного Тянь-Шаня / Е.А. Баталева, М.М. Буслов, А.К. Рыбин и др. // Геология и геофизика. 2006. № 9. С. 1036–1042.
3. Баталев В.Ю. Глубинное строение западной части зоны Таласо-Ферганского разлома по результатам магнитотеллурических зондирований / В.Ю. Баталев, Е.А. Баталева, В.Е. Матюков, А.К. Рыбин // Литосфера. 2013. № 4. С. 136–145.
4. Рыбин А.К. Вариации электросопротивления земной коры по результатам магнитотеллурического мониторинга сейсмоактивных зон Тянь-Шаня / А.К. Рыбин, Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев, В.Е. Матюков // Вестник КРСУ. 2011. Том 11. № 4. С. 29–40.
5. Баталева Е.А. Развитие методики анализа данных магнитотеллурического мониторинга / Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев // В сборнике: матер. докл. 6-го межд. симп. “Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов” (23–29 июня 2014 г., г. Бишкек). Бишкек: ИС РАН, 2015. С. 148–154.
6. Баталева Е.А. Магнитотеллурический мониторинг напряженно-деформированного состояния среды (для территории Центрального Тянь-Шаня) / Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев // В кн.: Геолого-геофизическая среда, сейсмичность и сопутствующие процессы: матер. конф. Нерюнгри: Изд-во Технич. ин-та (Ф) СВТУ, 2015. С. 7–14.
7. Баталева Е.А. Корреляционные зависимости электромагнитных и деформационных параметров / Е.А. Баталева // Докл. АН. 2016. Т. 468. № 3. С. 319–322.
8. Рыбин А.К. Разработка распределенной интерактивной системы доступа к результатам магнитотеллурического мониторинга / А.К. Рыбин, В.Ю. Баталев, Е.А. Баталева и др. // В сб.: Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: матер. 5-го межд. симп., 19–24 июня 2012 г. Бишкек. Москва–Бишкек, 2012. С. 179–187.

9. *Баталева Е.А.* Разработка программ анализа данных азимутального магнитотеллурического мониторинга. Ч. 1. Анализ данных магнитотеллурического мониторинга / Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев // Вестник КРСУ. 2014. Т. 14. № 7. С. 3–7.
10. *Баталева Е.А.* Разработка программ анализа данных азимутального магнитотеллурического мониторинга Ч. 2. Разработка программного обеспечения для анализа данных МТ мониторинга / Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев // Вестник КРСУ. 2014. Т. 14. № 7. С. 8–12.
11. *Баталева Е.А.* К вопросу о взаимосвязи вариаций электропроводности земной коры и геодинамических процессов / Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев, А.К. Рыбин // Физика Земли. 2013. № 3. С. 105–113.
12. *Баталева Е.А.* Вариации кажущегося сопротивления горных пород как индикатор напряженного состояния среды / Е.А. Баталева, А.К. Рыбин, В.Ю. Баталев // Геофизические исследования. 2014. Т. 15. № 4. С. 53–64.
13. *Баталева Е.А.* Проявление разломных структур в электромагнитных параметрах (для территории Центрального Тянь-Шаня) / Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев // Вестник КРСУ. 2015. Т. 15. № 9. С. 160–164.
14. *Баталева Е.А.* Вариации электромагнитных параметров среды и их связь с сейсмической активностью / Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев // В сб.: Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: мат. докл XI межд. сейсмолог. школы. Бишкек: ИС РАН, 2016. С. 21–29.
15. *Бердичевский М.Н.* Модели и методы магнитотеллурики / М.Н. Бердичевский, В.И. Дмитриев. М.: Научный мир, 2009. 680 с.
16. *Бердичевский М.Н.* Магнитотеллурические полярные диаграммы / М.Н. Бердичевский, Р.Ф. Логунович // Физика Земли. 2005. № 10. С. 66–78.