

УДК 550.372 + 550.837

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОФИЛЬНОГО
МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА МИНИПОЛИГОНА КЕНТОР**

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

Разработано программное обеспечение для анализа и визуализации результатов профильного азимутального магнитотеллурического мониторинга, проводимого на территории миниполигона Кентор.

Ключевые слова: профильный магнитотеллурический мониторинг; тензор импеданса; фазовый тензор; векторы Визе.

**SOFTWARE DEVELOPMENT FOR MAGNETOTELLURIC PROFILE
MONITORING CANTOR'S MINIPOLYGON**

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

The software is developed for the analysis and visualization of results of the profile azimuthal magnetotelluric monitoring which is carried out in the territory of a minipolygon Cantor.

Keywords: magnetotelluric profile monitoring; impedance tensor; phase tensor; vector Wiese.

Геофизический мониторинг земной коры представляет собой систему целенаправленных регулярных наблюдений за геологическими объектами, основная задача которого заключается в получении объективной информации о состоянии тех или иных геологических объектов в конкретный момент времени и о динамике их параметров. Требования, предъявляемые к системе геофизического мониторинга, осуществляемого Научной станцией РАН и предназначенного для слежения за геодинамическими процессами и связанными с ними изменениями физических свойств земной коры, определяются условиями сбора и обработки информации в оперативном режиме, а также необходимостью незамедлительной реакции на аномальное поведение наблюдаемого параметра. Однако результаты интерпретации магнитотеллурических данных, полученных в сейсмоактивных регионах Центрального Тянь-Шаня, свидетельствуют о чрезвычайной сложности геоэлектрических моделей, построенных для зон тектонических деформаций, что в первую очередь связано с наличием разломов различных порядков. Вместе с тем, именно изучение структуры и поведения активных разломных зон [1–5] является одним из ключевых моментов при проведении мониторинговых работ, поскольку существует предположение о тесной взаимосвязи

процессов разломообразования и сейсмичности. Впервые гипотеза о приуроченности землетрясений к разломам земной коры была высказана Г. Рейдом в рамках рассмотрения модели упругой отдачи как одного из возможных механизмов возникновения землетрясений [6]. В настоящее время положение о взаимосвязи развития разломных зон, деформаций земной коры и сейсмичности широко известно и находит подтверждение как в работах по физическому моделированию, например [7], так и в исследованиях, направленных на проведение геофизического мониторинга в сейсмически активных регионах [8–10]. Особого внимания заслуживают зоны динамического влияния разломов [11], которые в геоэлектрических моделях проявляются как области повышенной электропроводности и являются индикаторами деформационных процессов.

В настоящей работе продолжают исследования, связанные с развитием методики азимутального магнитотеллурического мониторинга [12–16], которые заключаются в анализе полученных временных рядов электромагнитных параметров на предмет определения вклада каждой из компонент тензора импеданса в информативность мониторинговых исследований, а также азимутальной зависимости тензочувствительности среды [17–19].

Именно с целью изучения изменений во времени электромагнитных параметров активной разломной структуры, как наиболее тензочувствительной области геологической среды, и осуществляется профильный магнитотеллурический мониторинг на миниполигоне Кентор.

При этом предполагается, что обработка полученной информации должна быть завершена к моменту следующего опроса информационных каналов магнитотеллурических станций. Поэтому кроме требований к точности и надежности регистрации геофизических полей, необходимо разработать такое программное обеспечение магнитотеллурического мониторинга, которое позволит обеспечить повышение эффективности системы мониторинга и прогнозирования в целом. Разработка программного обеспечения, представленная в настоящей статье, в первую очередь предназначена для визуализации результатов профильного магнитотеллурического мониторинга и повышения его эффективности.

Для анализа данных профильного магнитотеллурического мониторинга (МТ-мониторинга) было разработано сервисное программное обеспечение. Написание программного кода осуществлялось в интегрированной среде Microsoft Visual Studio 2010 на объектно-ориентированном языке программирования C#, используемая 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) может выбирать файлы с исходными данными, необходимыми для дальнейшей работы, просматривать содержимое выбранных файлов, выполнять и отслеживать некоторые дополнительные расчеты с использованием исходных данных.

Так как при исследовании магнитотеллурических данных принято анализировать зависимость от периода (частоты) магнитотеллурических функций, то в программе осуществляется расчет значений этих функций и их графиков в зависимости от параметра T – периода. Для функций, определяемых в пространстве комплексных величин, построение графиков зависимости от T выполняли покомпонентно: отдельно для действительной части Re , отдельно для мнимой части Im .

При выполнении расчетов значений компонент тензора импеданса и для построения их азимутальных кривых (α – азимут) использовали формулы [20]:

$$Z_{xx}^{\alpha}(T) = Z_{xx} \cos^2 \alpha + Z_{yy} \sin^2 \alpha + (Z_{xy} + Z_{yx}) \sin \alpha \cos \alpha, \quad (1)$$

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

$$Z_{yx}^{\alpha}(T) = Z_{yx} \cos^2 \alpha - Z_{xy} \sin^2 \alpha - (Z_{xx} - Z_{yy}) \sin \alpha \cos \alpha, \quad (3)$$

$$Z_{xy}^{\alpha}(T) = Z_{yy} \cos^2 \alpha + Z_{xx} \sin^2 \alpha - (Z_{xy} + Z_{yx}) \sin \alpha \cos \alpha. \quad (4)$$

Формула (5) используется для построения кривых кажущегося сопротивления:

$$\rho_m(T) = \frac{T |Z_m(T)|^2}{2\pi\mu_0}, \quad m = xx, xy, yx, yy, \quad (5)$$

а формула (6) – для построения соответствующих азимутальных кривых:

$$\rho_m^{\alpha}(T) = \frac{T |Z_m^{\alpha}(T)|^2}{2\pi\mu_0}, \quad m = xx, xy, yx, yy. \quad (6)$$

Графики фаз различных компонент тензора импеданса, а также азимутальные кривые фаз строили по значениям фаз соответствующих комплексных компонент тензора импеданса:

$$\varphi_m(T) = \text{Arg}(Z_m(T)), \quad (7)$$

$$\varphi_m^{\alpha}(T) = \text{Arg}(Z_m^{\alpha}(T)). \quad (8)$$

Расчет и построение графика средних значений по всем сессиям для различных магнитотеллурических (МТ) параметров осуществляли по формуле:

$$F_{avg}(T) = \frac{\sum_{i=1}^n F_i(T)}{n}, \quad (9)$$

где F_{avg} – искомая функция средних значений; F_i – соответствующая функция по данным i -ой сессии; $i = \overline{1, n}$, n – количество сессий.

Расчет значений для построения графика функции вариации (отклонения от соответствующих средних значений) различных МТ-параметров выполняли по формуле:

$$F_{var}(T)|_i = F_i(T) - F_{avg}(T), \quad (10)$$

где $F_{var}|_i$ – искомая функция вариации; F_i – соответствующая функция по данным i -ой сессии, $i = \overline{1, n}$; n – количество сессий; F_{avg} – функция средних значений.

Значения азимутальных средних вычисляются по формуле:

$$F_{avg}^{\alpha}(T) = \frac{\sum_{i=1}^n F_i^{\alpha}(T)}{n}, \quad (11)$$

где α – азимут, F_{avg}^{α} – искомая функция азимутальных средних значений, F_i^{α} – азимутальная кривая соответствующего МТ-параметра по данным i -ой сессии, $i = \overline{1, n}$, n – количество сессий.

Расчет значений, по которым для каждого фиксированного азимута выполняется построение азимутальных кривых вариаций различных МТ-параметров, осуществляли по формуле:

$$F_{var}^{\alpha}(T)|_i = F_i^{\alpha}(T) - F_{avg}^{\alpha}(T), \quad (12)$$

где $F_{var}^{\alpha}(T)|_i$ – искомая функция вариации азимутальных кривых, F_i^{α} – азимутальная кривая

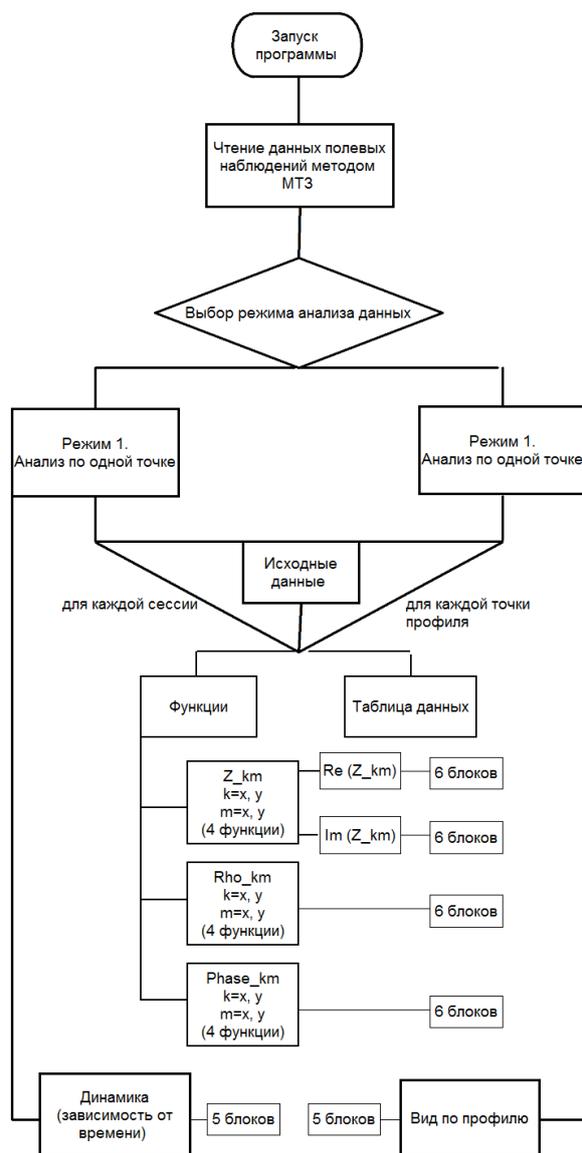


Рисунок 1 – Блок-схема программы для анализа и визуализации результатов профильного азимутального магнитотеллурического мониторинга

соответствующего МТ-параметра по данным i -ой сессии, $i = \overline{1, n}$; n – количество сессий; F_{avg}^α – функция азимутальных средних значений.

На рисунке 1 представлена блок-схема разработанной программы на примере магнитотеллурических данных по профилю “Центральный” мини-полигона Кентор (центральная часть Бишкекского геодинамического полигона).

В ближайшей перспективе для территории Центрального Тянь-Шаня ставится задача определения критериев современной активизации разломов, следствием которой является сейсмичность. При этом комплекс геофизических методов, используемый для оценки тектонической активности и сейсмической опасности территорий Бишкекского геодинамического полигона и мини-полигона Кентор, планируется усилить, с одной стороны, за счет вовлечения в анализ информации о движениях земной коры, полученных как на основе GPS-измерений, так и в результате светодальномерных наблюдений, а с другой – данных профильного магнитотеллурического мониторинга, осуществляемого на территории миниполигона Кентор. Следовательно, дальнейшее развитие программного обеспечения будет направлено на оптимизацию и развитие комплексного геофизического мониторинга.

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

Литература

1. Баталева Е.А. Глубинная структура крупнейших разломных зон западной части Киргизского Тянь-Шаня и современная геодинамика: дис. ... канд. геол.-мин. наук / Е.А. Баталева. Новосибирск, 2005. 200 с.
2. Баталева Е.А. Аномалии электропроводности зоны Таласо-Ферганского разлома и геодинамическая интерпретация глубинной структуры Юго-Западного Тянь-Шаня / Е.А. Баталева, М.М. Буслов, А.К. Рыбин, В.Ю. Баталев, И.В. Сафронов // Геология и геофизика. 2006. № 9. С. 1036–1042.
3. Новиков И.С. Система новейших разрывных нарушений Юго-Восточного Алтая: данные об их морфологии и кинематике / И.С. Новиков, А.А. Еманов, Е.В. Лескова, В.Ю. Баталев, А.К. Рыбин, Е.А. Баталева // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 11. С. 1139–1149.
4. Баталева Е.А. Особенности методики интерпретации магнитотеллурических данных в зоне Таласо-Ферганского разлома / Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев // Вестник КРСУ. 2011. Т. 11. № 4. С. 40–46.
5. Баталева Е.А. Результаты магнитотеллурических зондирований в западной части Таласо-Ферганского разлома / Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев, В.Е. Магоков, А.К. Рыбин // Вестник КРСУ. 2013. Том 13. № 1. С. 53–57.
6. Reid H.F. The California earthquake of April 18, 1906: The mechanics of the earthquake /

- H.F. Reid // Carnegie Institute of Washington Publication. Washington. 1910. 87 (V.2). 192 p.
7. *Seminskii K.Zh.* Governing factors in the development of depressions and faults in the Baikal rift zone: results of a physical experiment / K.Zh. Seminskii, E.I. Kogut // *Doklady Earth Sciences*. 2009. V. 424. № 1. P. 15–18.
 8. *Мороз Ю.Ф.* Методика и результат мониторинга естественного электрического поля Земли в Байкальской рифтовой зоне / Ю.Ф. Мороз, Т.А. Мороз, Т. Моги // *Физика Земли*. 2007. № 11. С. 37–49.
 9. *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. Т. 49. № 5. С. 445–460.
 10. *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.
 11. *Шерман С.И.* Области динамического влияния разломов / С.И. Шерман, С.А. Борняков, В.Ю. Буддо. Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.
 12. *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.
 13. *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.
 14. *Баталева Е.А.* Разработка программ анализа данных азимутального магнитотеллурического мониторинга Часть 1. Анализ данных магнитотеллурического мониторинга / Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев // *Вестник КРСУ*. 2014. Т. 14. № 7. С. 3–7.
 15. *Баталева Е.А.* Разработка программ анализа данных азимутального магнитотеллурического мониторинга Ч. 2. Разработка программно-обеспечения для анализа данных МТ мониторинга / Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев // *Вестник КРСУ*. 2014. Т. 14. № 7. С. 8–12.
 16. *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.
 17. *Баталева Е.А.* Корреляционные зависимости электромагнитных и деформационных параметров / Е.А. Баталева // *Докл. АН*. 2016. Т. 468. № 3. С. 319–322.
 18. *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. Технич. ин-та (ф) СВТУ*. 2015. С. 7–14.
 19. *Баталева Е.А.* Вариации электромагнитных параметров среды и их связь с сейсмической активностью / Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев // *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: мат. докл. XI межд. сейсмолог. школы*. Бишкек: НС РАН, 2016. С. 21–29.
 20. *Бердичевский М.Н.* Модели и методы магнитотеллурики / М.Н. Бердичевский, В.И. Дмитриев. М.: Научный мир, 2009. 680 с.