

УДК 519.254: 550.34.013.4

АЛГОРИТМ И ПРОГРАММНОЕ РЕШЕНИЕ В ЗАДАЧЕ ПО ВЫЯВЛЕНИЮ АНОМАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ (ЭМИ)

^{1,2}Трофименко С.В., ¹Маршалов А.Я., ¹Гриб Н.Н., ³Колодезников И.И.

¹Технический институт (филиал) ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», Нерюнгри, e-mail: trofimenko_sergei@mail.ru;

²Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск;

³Академия наук республики Саха (Якутия), Якутск

Рассмотрена задача разделения нормального и аномального уровней полей электромагнитного излучения (ЭМИ). В линейной теории электромагнитных волн принята аддитивная модель исходного ряда наблюдений ЭМИ на основе принципа суперпозиции. Для выделения пиковых значений амплитуд сигналов электромагнитного излучения использован статистический метод Ирвина. Показаны возможности данного метода для разделения полей в слабо возмущенные дни, когда количество пиков (аномальных уровней ряда) не превышает 10% от общего количества значений ряда. Для случаев возмущенного состояния геофизической среды, когда количество пиков превышает 50% и более от общего количества значений ряда, сформированный ряд пиковых данных осложняется фоновой компонентой за счет увеличения дисперсии. В практике геофизических наблюдений для разделения полей в таких случаях задается верхняя граница дисперсии по визуальным моделям. Для автоматизированных систем распознавания аномальных полей необходимы статистические критерии разделения полей, объективно не зависящие от действий интерпретатора. Моделирование различных состояний геофизической среды позволило модифицировать метод Ирвина и определить границы его применимости.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, временные ряды, алгоритм и программное решение, аномальные уровни ряда

ALGORITHMS AND SOFTWARE SOLUTIONS IN THE TASK OF DETECTING ABNORMAL LEVELS OF ELECTROMAGNETIC RADIATION (EMR)

^{1,2}Trofimenko S.V., ¹Marshalov A.Y., ¹Grib N.N., ³Kolodeznikov I.I.

¹Technical Institute (branch) «North-Eastern Federal University of MK Ammosov», Neryungri, e-mail: trofimenko_sergei@mail.ru;

²Institute of Tectonics and Geophysics FEB RAS, Khabarovsk;

³Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk

The problem of separation of normal and abnormal levels of the fields of electromagnetic radiation (EMR). In the linear theory of electromagnetic waves adopted additive model of the original series of observations on the basis of EMR superposition principle. To isolate the peak signal amplitudes of electromagnetic radiation used statistical method Irwin. The possibilities of this method to separate the fields in a weakly disturbed days, when the number of peaks (abnormal levels of the series) does not exceed 10% of the total number of values. For cases the perturbed state of the geophysical environment, when the number of peaks above 50% or more of the total number of values generated by a number of peak data is complicated by the background component due to increased dispersion. In the practice of geophysical observations to separate the fields in such cases is given by the upper limit of the dispersion according to the visual model. For automated recognition systems anomalous fields are required statistical criteria to separate the fields, objectively independent of the actions of the interpreter. Simulation of different states of the geophysical medium allowed to modify the method of Irwin and define the limits of its applicability.

Keywords: electromagnetic radiation, time series, algorithms and software solution, abnormal levels of a number

Геофизический мониторинг геологической среды – одно из основных направлений геодинамических исследований, который позволяет дистанционно отслеживать процессы в земной коре. Теоретические разработки, лабораторные и полевые эксперименты по изучению сейсмозлектромагнитных явлений позволили установить физическую природу электромагнитного излучения (ЭМИ) горных пород в их естественном залегании в условиях изменяющегося деформационного процесса земных недр [1]. Анализ изменений ЭМИ в период до и после Южно-Якутского землетрясения

[3], а также в периоды повышенной сейсмической активности 2005–2007 гг. [5] позволили классифицировать аномалии как отражение общих закономерностей деформационных процессов [4], в которых присутствует периодическая компонента [5].

Новые возможности для интерпретации результатов электромагнитного мониторинга появились в результате проведения совместных работ с ИКФИА СО РАН [2] методами однопунктовой пеленгации источников ЭМИ аппаратурой компании «Boltek Corp» [www.boltek.com], которые регистрируют события в кольце 200–400 км

с точностью 5–25 км. Пеленгация источников ЭМИ осуществляется с помощью трех антенн, принимающих вертикальную электрическую и две горизонтальные магнитные составляющие электромагнитного поля. В автоматическом режиме вычисляются азимут и расстояние до источника сигнала. Ошибка определения координат источника ЭМИ для однопунктовой дальнометрии ~15% от дальности. Максимальное стандартное отклонение по пеленгу ~2,5°. Мертвое время регистратора, затрачиваемое на обработку сигналов и запись информации, позволяет регистрировать половину потока от ближних источников ЭМИ [2], причем в круге с радиусом около 250 км из-за ограниченного диапазона приемных трактов принято равномерное распределение потока источников ЭМИ [2].

Для выделения сигналов ЭМИ тектонической природы были вычислены критические направления и расстояния от пункта регистрации, в соответствии с известным распределением очаговой сейсмичности Олекмо-Становой зоны [4] (рис. 1) и активных разломов [7–11]. Дополнительно, если в течение суток наблюдаются серии импульсов, которые можно объединить в группу по признаку удаленности друг от друга, регистрируется новый источник ЭМИ в виде отдельного кластера. Важным вопросом при интерпретации аномалий электромагнитного излучения (ЭМИ) является разделение аномалий по типу источника излучения. Для разделения сигналов ЭМИ на фоновую и импульсную составляющие был разработан специальный алгоритм и программное решение.

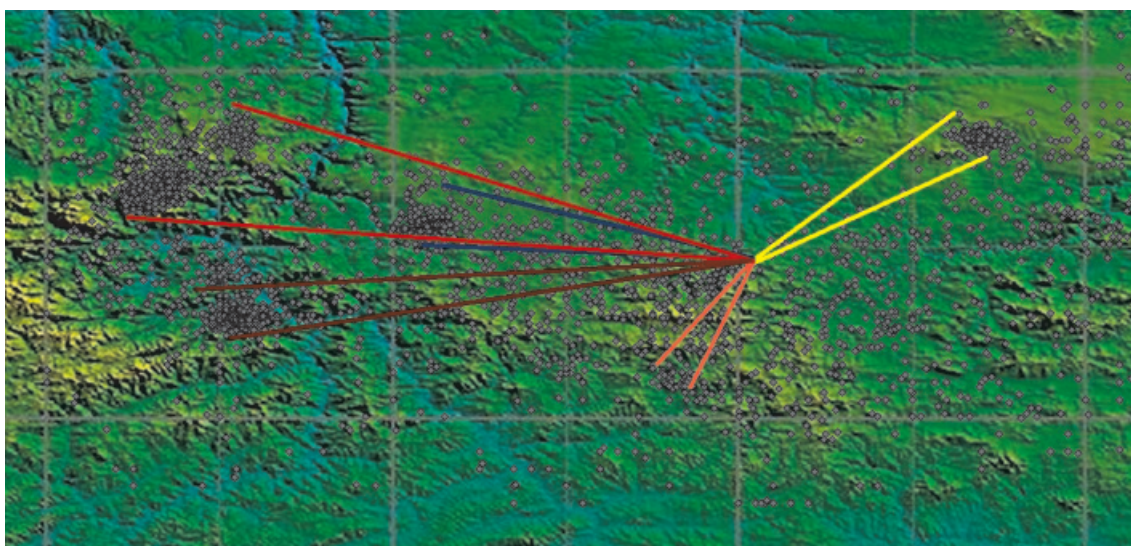


Рис. 1. Критические расстояния и азимуты автоматизированной системы поиска тектонических источников электромагнитного излучения. На карте точками вынесены афтершоковые поля сильных землетрясений Южной Якутии и фрагменты рассеянной сейсмичности

К фоновым уровням сигнала ЭМИ будем относить малоамплитудную составляющую, для которой необходима проверка на адекватность модели: проверка на случайность колебаний уровней остаточной последовательности, соответствия распределения случайной компоненты нормальному закону распределения, равенства математического ожидания случайной компоненты нулю и на независимость значений уровня случайной компоненты [4, 6].

К аномальным уровням сигнала будем относить сигналы с амплитудой, превышающей некоторое значение, определенное по статистически значимому критерию.

В линейной теории электромагнитных волн принята аддитивная модель исходного ряда наблюдений ЭМИ на основе принципа суперпозиции. Если временной ряд представляется в виде суммы соответствующих компонент, то полученная модель носит название аддитивной и имеет вид

$$Y_t = E_t^{im} + E_t^f, \quad (*)$$

где Y_t – уровни временного ряда; E_t^{im} – аномальная компонента; E_t^f – фоновая составляющая. Импульсная (аномальная) компонента относится к полезному сигналу первого уровня. Фоновая компонента мо-

жет содержать периодические составляющие, тренд и случайную компоненту, которые необходимо разделить для проверки построенной модели на адекватность и выделения полезно-

го сигнала второго уровня. В целом разработанный алгоритм выделения полезного сигнала (в смысле тектонической природы) можно представить в виде блок-схемы (рис. 2).



Рис. 2. Блок-схема первичного анализа данных регистрации ЭМИ

Первый этап разделения полей реализован в виде программного решения на языке программирования R в среде разработки RStudio. R – статистическая система анализа, созданная Россом Ихакой и Робертом Гентлеманом [1996, J. Comput. Graf. Stat., 5: 299–314]. R является средством разработки методов интерактивного анализа данных, при этом являясь и объектно-ориентированным языком и программным окружением для разработки. Основные особенности R: эффективная обработка данных и простые средства для сохранения результатов, набор операторов для обработки массивов, матриц и других сложных конструкций, боль-

шая, последовательная, интегрированная коллекция инструментальных средств для проведения статистического анализа, многочисленные графические средства, простой и эффективный язык программирования, который включает много возможностей.

В составе R существует около 25 пакетов (названных «стандартными» и «рекомендуемыми» пакетами), а в распределённых хранилищах системы CRAN по состоянию на начало июня 2013 года были доступны для свободной загрузки более 4500 пакетов расширений, ориентированных на специфические задачи обработки данных, возникающие в геологии и геофизике и многих

других прикладных областях. Значительная часть европейских и американских университетов в последние годы активно переходят к использованию R в учебной и научно-исследовательской деятельности вместо дорогостоящих коммерческих разработок.

В данном исследовании реализован алгоритм разделения полей на фоновую и пиковую составляющие при произвольной зашумленности исходного сигнала.

На рис. 3, 4 представлены результаты разделения полей.

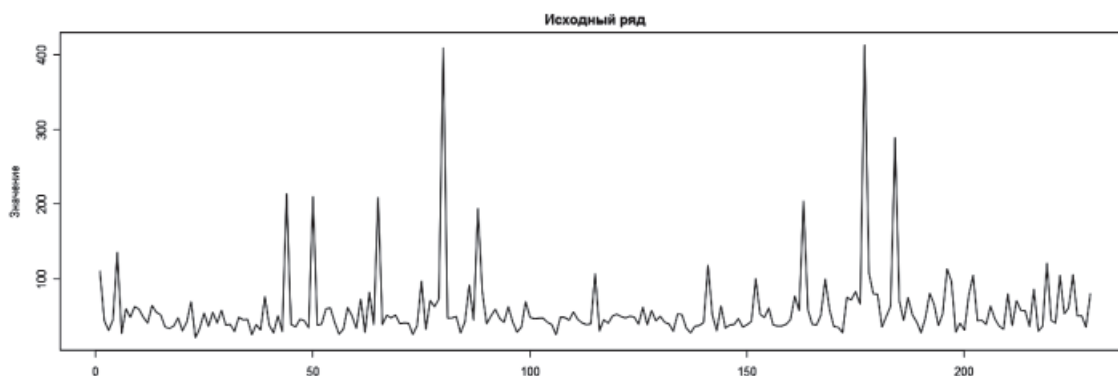


Рис. 3. Исходный ряд наблюдаемых значений ЭМИ. Показана реализация на интервале 250 с

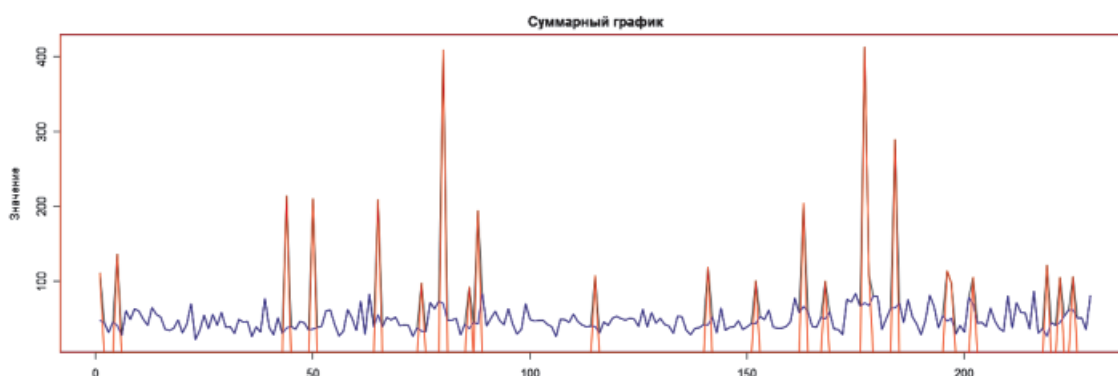


Рис. 4. Результирующий ряд фоновой (синий цвет) и пиковой (красный цвет) составляющих

Задача определения источника сигнала и его природы является предметом дополнительного исследования. Трудность решения данной задачи можно наглядно увидеть при сравнении рис. 4 и 5.

На рис. 4 вторая серия состоит из двух пиков, а последняя из трех. Во втором случае при обработке данных во второй серии появляется три пика, а в последней – пять.



Рис. 5. Результирующий ряд фоновой (синий цвет) и пиковой (красный цвет) составляющих

Метод Ирвина-Трофименко

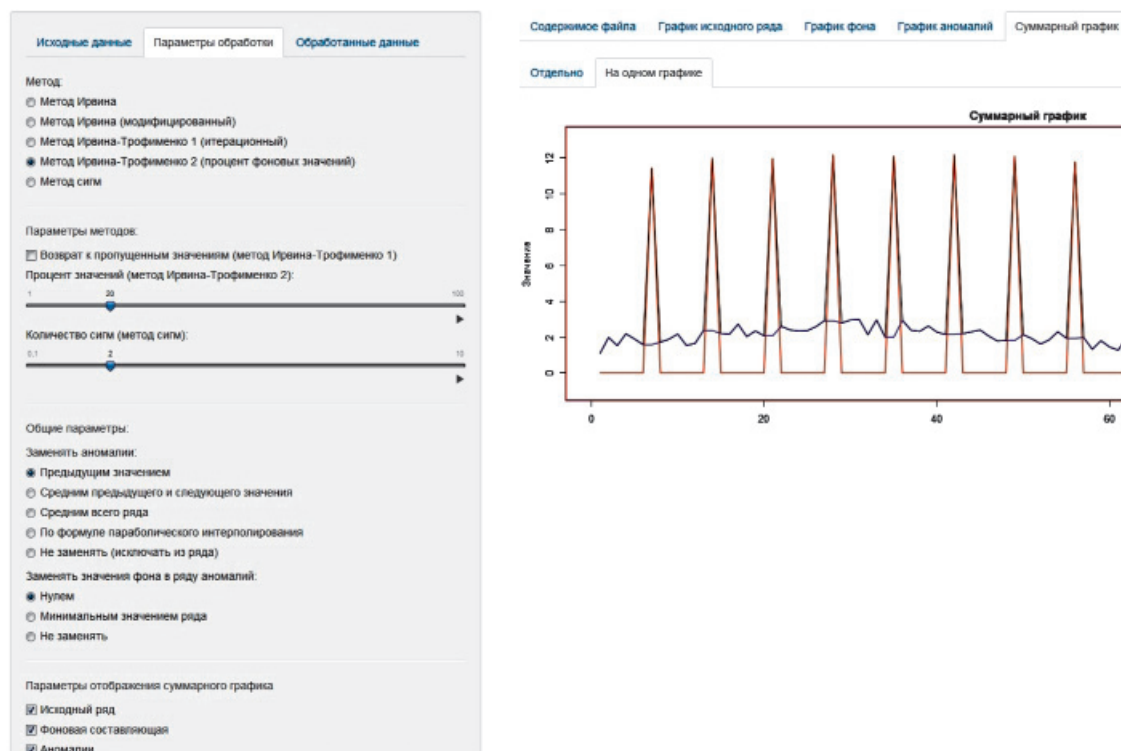


Рис. 6. Меню программы разделения полей

На рис. 6 показано меню программы разделения полей в интерактивном режиме. В зависимости от выбора метода разделения и способа представления выходных данных можно получить различные варианты представления фоновой и пиковой компонент. В конечном итоге именно результат данного этапа решения задачи определяет качество последующей интерпретации при выделении аномалий ЭМИ тектонической природы. Программа доступна по адресу <http://split.marshalov.org>. Программой можно пользоваться с любого компьютера без установки каких-либо дополнительных программ.

Список литературы

1. Воробьев А.А. Равновесие и преобразование видов энергии в недрах. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1980. – 211 с.
2. Козлов В.И., Муллаяров В.А. Грозовая активность в Якутии. – Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2004. – 104 с.
3. Трофименко С.В. Геофизические поля и сейсмичность Южной Якутии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2007. – Т. 17. – № 1. – С. 188–196.
4. Трофименко С.В. Проявление землетрясений на фоне стационарного сейсмического процесса Олекмо-Становой зоны (ОСЗ) // Горный информационно-аналитиче-

ский бюллетень (научно-технический журнал). – 2007. – Т. 17. – № 1. – С. 208–213.

5. Трофименко С.В., Гриб Н.Н., Никитин В.М. Вариации электромагнитного поля как отражение сейсмотектонических процессов Олекмо-Становой зоны // Известия Томского политехнического университета «Науки о Земле». – 2009. – Т. 314. – № 1. – С. 48–53.

6. Трофименко С.В. Методы и примеры статистических оценок временных рядов // Международный журнал экспериментального образования. – 2013. – № 9. – С. 41–42. URL: www.rae.ru/meo/?section=content&op=show_article&article_id=4185.

7. Трофименко С.В. Детальные геолого-геофизические исследования зон активных разломов и сейсмическая опасность Южно-Якутского региона / А.Н. Овсюченко, С.В. Трофименко, А.В. Мараханов, П.С. Карасев, Е.А. Рогожин, В.С. Имаев, В.М. Никитин, Н.Н. Гриб // Тихоокеанская геология. – 2009. – Т. 28. – № 4. – С. 55–74.

8. Трофименко С.В. Очаговые зоны сильных землетрясений Южной Якутии / А.Н. Овсюченко, С.В. Трофименко, А.В. Мараханов, П.С. Карасев, Е.А. Рогожин // Физика Земли. – 2009. – № 2. – С. 15–33.

9. Трофименко С.В. Сейсмотектоника переходной области от Байкальской рифтовой зоны к орогенному поднятию Станового хребта / А.Н. Овсюченко, С.В. Трофименко, А.В. Мараханов, П.С. Карасев, Е.А. Рогожин // Геотектоника. – 2010. – № 1. – С. 29–51.

10. Трофименко С.В. Тектоническая интерпретация статистической модели распределений азимутов аномалий гравимагнитных полей Алданского щита. – Тихоокеанская геология. – 2010. – Т. 29. – № 3. – С. 64–77.

11. Трофименко С.В. Активные нектонические нарушения участка Алдан-Нагорный нефтепроводной системы Восточная Сибирь – Тихий океан / П.С. Карасев, А.Н. Овсяченко, А.В. Мараханов, С.В. Трофименко // Нефтяное хозяйство. – 2008. – № 9. – С. 80–84.

References

1. Vorobev A.A. Ravnovesie i preobrazovanie vidov energii v nedrah. – Tomsk: Izg-vo Tomskogo un-ta, 1980. 211 p.

2. Kozlov V.I., Mulloyarov V.A. Grozovaya aktivnost v Yakutii. Yakutsk: YaF Izd-va SO RAN, 2004. 104 p.

3. Trofimenko S.V. Geofizicheskie polya i seismichnost Yuzhnoi Yakutii // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal). 2007. T. 17. no. 1. pp. 188–196.

4. Trofimenko S.V. Proyavlenie zemletryaseni na fone statsionarnogo seysmicheskogo protsessa Olekmo-Stanovoy zoni (OSZ) // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal). 2007. T. 17. no. 1. pp. 208–213.

5. Trofimenko S.V., Grib N.N., Nikinin V.M. Variatsii elektromagnitnogo polya kak otrashenie seysmotektonicheskikh protsessov Olekmo-Stanovoy zoni // Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Tom 314. no. 1, 2009. «Nauki o Zemle». pp. 48–53.

6. Trofimenko S.V. Metodi i primeri statisticheskikh otsenok vremennih ryadov // Mezhdunarodnii zhurnal eksperimentalnogo obrazovaniya. no. 9. 2013. pp. 41–42. URL: www.rae.ru/meo/?section=content&op=show_article&article_id=4185.

7. Trofimenko S.V. Detalnie geologo-geofizicheskie issledovaniya zon aktivnih razlomov i seismicheskaya opasnost Yuzhno-Yakutskogo regiona / Ovsyuchenko A.N., Trofimenko S.V., Marahanov A.V., Karasev P.S., Rogozhin E.A.,

Imaev V.S., Nikitin V.M., Grib N.N. // Tihookeanskaya geologiya. 2009. Tom 28. no. 4. pp. 55–74.

8. Trofimenko S.V. Ochagovye zoni silnih zemletryaseni Yuzhnoi Yakutii / Ovsyuchenko A.N., Trofimenko S.V., Marahanov A.V., Karasev P.S., Rogozhin E.A. // Fizika Zemli. 2009. no. 2. pp. 15–33.

9. Trofimenko S.V. Seismotektonika perehodnoi oblasti ot Baikalskoi riftovoi zoni k orogennomu podnyatiyu Stanovogo hrebta / Ovsyuchenko A.N., Trofimenko S.V., Marahanov A.V., Karasev P.S., Rogozhin E.A. // Geotektonika, 2010, no. 1, pp. 29–51.

10. Trofimenko S.V. Tektonicheskaya interpretatsiya statisticheskoy modeli raspredeleniy azimutov anomalii gravimagnitnykh poley Aldanskogo schita. Tihookeanskaya geologiya. 2010. Tom 29. no. 3. pp. 64–77.

11. Trofimenko S.V. Aktivnie neotektonicheskie narusheniya uchasyka Aldan-Nagornii nefteprovodnoi sistemi Vostochnaya Sibir Tihii okean / Karasev P.S., Ovsyuchenko A.N., Marahanov A.V., Trofimenko S.V. // Neftyanoe hozyaistvo. 2008. no. 9. pp. 80–84.

Рецензенты:

Омельяненко А.В., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории инженерной геокриологии Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск;

Имаев В.С., д.г.-м.н., профессор, главный научный сотрудник Института земной коры СО РАН, г. Иркутск.

Работа поступила в редакцию 30.10.2014.