

Измерительно-вычислительный комплекс для магнитотеллурического мониторинга геодинимических процессов (ИВК-МТМ)

Светов Б.С., Кукса Ю.И., Институт геоэлектроманнитных исследований РАН;
Одинцов В.И., Амиантов А.С., Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН,
г. Троицк, Московской обл.

В статье описан программно-аппаратный комплекс (ИВК-МТМ) для режимных наблюдений магнитотеллурического поля в инфранизкочастотном диапазоне, а также огибающей сейсмического поля в сейсмоактивных областях Земли. Дано описание аппаратных средств, программного обеспечения и особенностей эксплуатации комплекса. Приводится алгоритм адаптивной обработки данных ИВК-МТМ, программного обеспечения дает возможность проводить вычисления в глобальной сети Интернет с использованием технологии MATLAB Web Server, развиваемой при финансовой поддержке РФФИ в рамках испытаний в Кавказском регионе.

Назначение

ИВК-МТМ предназначен для долговременных (недели, месяцы, годы) режимных наблюдений естественного электромагнитного (магнитотеллурического) поля в инфранизкочастотном диапазоне, а также огибающей сейсмического поля в сейсмоактивных регионах Земли. В ИВК-МТМ программно реализована обработка данных в квазиреальном масштабе времени, суть которой сводится к ослаблению полей внешнего (ионосферного) происхождения для выделения внутренних (геодинимических) полей и, одновременно, к отслеживанию изменений передаточных функций магнитотеллурического (МТ) поля, отражающих изменения во времени геоэлектрического разреза в точке наблюдения [1].

Аппаратные средства и основные параметры

ИВК-МТМ состоит из измерительного блока, связанного соединительными кабелями с датчиками поля, и интерфейсного блока, подключенного к COM-порту компьютера (IBM PC). Интерфейсный блок и компьютер размещаются в аппаратном помещении, а на удалении от него (в целях ослабления помех) на расстояние до 100 метров устанавливается измерительный блок. К измерительному блоку подключаются трехкомпонентный блок кварцевых датчиков магнитного поля (рис.2), две электрические линии, заканчи-

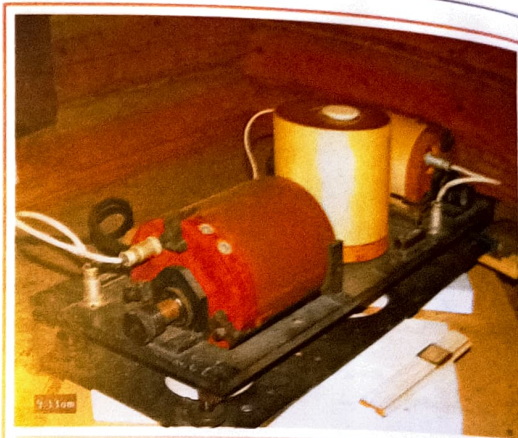


Рис. 2. Блок кварцевых датчиков.

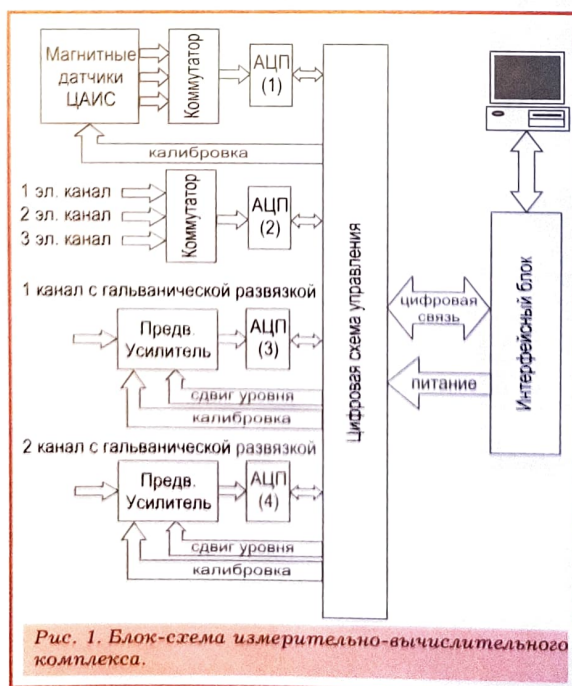


Рис. 1. Блок-схема измерительно-вычислительного комплекса.

вающиеся неполяризуемыми электродами (рис.3), одна дополнительная электрическая линия и сейсмодатчик. Связь между измерительным и интерфейсным блоками осуществляется по двум кабелям. По одному из них подается питание к измерительному блоку и, далее, к блоку датчиков магнитного поля, а по другому осуществляется цифровая связь между компьютером и измерительным блоком. Электрические линии подключаются к измерительному блоку через каналы с гальванической развязкой. Блок-схема ИВК-МТМ показана на рис.1. К дополнительным электрическим каналам подключены: еще одна электрическая линия через блок с гальванической развязкой, сейсмодатчик (через блок детектирования и выделения сейсмической огибающей) и датчик температуры блока датчиков магнитного поля. Динамический диапазон по всем каналам - 22 разряда. Периодичность измерений по каждому каналу - 2 измерения в секунду. Скорость ввода информации в компьютер - 80 Кбит/с (при длине кабеля связи - 100 м). Потребляемая мощность от сети переменного тока 220 В при подключенных датчиках магнитного поля - 15 Вт. Входное сопротивление 1 МОм (500 кОм для каналов с гальванической развязкой). Частота среза (по уровню -3 дБ) 1 Гц. Полоса измерения сейсмической огибающей 0,002 - 40 Гц. Частота среза после детектирования (-3дБ) - 1 Гц. Предусмотрена программная (на этапе запуска или отладки) калибровка магнитных и электрических каналов. Возможна программная компенсация постоянной составляющей по входу электрических каналов с гальванической развязкой.



Рис. 3. Неполаризующийся электрод.

Программное обеспечение и особенности эксплуатации

Разработанное для управления ИБК-МТМ обеспечивает оперативную обработку данных мониторинга, получаемых в процессе работы комплекса, повторную обработку ранее полученных данных с другими заданными параметрами, а также усреднение результатов обработки и вывод усредненных графиков за продолжительные интервалы времени (до 1 года). Все программное обеспечение состоит из двух частей – управляющие программы и программы адаптивной обработки данных электромагнитного мониторинга.

В состав пакета управляющих программ входит резидентная программа для ввода (по приему данных от СОМ-порта персонального компьютера) и регистрации отсчетов данных ИБК-МТМ в ПК. Данные накапливаются в памяти и каждую минуту записываются на диск в файл блоками размером 121 запись по 15 байт. Параллельно с вводом данных ПК может использоваться для выполнения других задач, включая обработку получаемых данных в квазиреальном времени. В первую минуту каждого часа формируется новый файл, имя которого имеет следующую структуру:

YYMMDDHH, где YY-год, MM-месяц, DD-день, HH-час начала записи в файл.

Другие программы пакета предназначены для управления функциями измерительного блока ИБК-МТМ и проверки параметров его каналов. Управление осуществляется через СОМ-порт компьютера. Для калибровки АЦП служит инициализирующая программа. Программа сдвига позволяет компенсировать постоянную составляющую в каналах с гальванической развязкой в пределах ± 105 мВ. Этот диапазон разбит на 128 ступеней, т.е. одна ступень соответствует компенсации примерно 1,6 мВ.

Программа калибровки формирует сигналы для калибровки магнитных и электрических каналов в форме меандра с периодом 20 с (4 периода). В кольцах калибровки магнитных датчиков подается ток, задающий магнитное поле ± 100 нТл. В каналах с гальванической развязкой напряжение ± 17 мВ подается на резистор, включенный последовательно с измерительной электрической линией. В пакет также входит программа, позволяющая оценить шумы каналов при закороченном входе и отключенных датчиках. Эта программа рассчитывает среднеквадра-

тические отклонения в каналах по любому числу измерений (до 120, или одной минуты).

Алгоритм адаптивной обработки данных ИБК-МТМ

В основу пакета программ адаптивной обработки данных электромагнитного мониторинга в реальном масштабе времени положен метод так называемой «адаптивной фильтрации». Рассмотрим суть этого метода на примере вычисления передаточных функций (функций связи) между компонентами электромагнитного поля. Для этого представим связь вертикальной компоненты геомагнитного поля H_z с горизонтальными компонентами H_x и H_y в виде следующего соотношения:

$$H_z(t) = H_x(t) \cdot I_{zx}(t) + H_y(t) \cdot I_{zy}(t) + \Delta H_z(t), \quad (5)$$

где $I_{zx}(t)$ и $I_{zy}(t)$ – компоненты индукционного вектора или, в более общей трактовке, импульсные переходные характеристики соответствующих передаточных функций. Они отражают электрическое строение Земли в окрестности точки наблюдения. Вариации остаточного поля (ΔH_z) в значительной степени освобождены от зависимости от ионосферных токов, в них существенный вклад вносят поля внутреннего, геодинамического происхождения. Последние возникают в недрах Земли в результате разнообразных механоэлектрических преобразований и могут быть эффективно использованы для целей геодинамического мониторинга. Если в результате каких-либо геодинамических процессов не только генерируются электромагнитные поля, но и изменяется геоэлектрическое строение среды, то, соответственно, изменяются и передаточные функции $I_{zx}(t)$ и $I_{zy}(t)$. Анализ их изменений дает независимую по сравнению с остаточными полями информацию о процессах, протекающих внутри Земли.

Передаточные функции $I_{zx}(t)$ и $I_{zy}(t)$ могут быть найдены путем решения интегральных уравнений свертки на некотором интервале времени, на котором заданы значения временных рядов измерений компонент электромагнитного поля. Решение интегральных уравнений свертки может быть найдено хорошо известными методами [2, 3], однако, для целей непрерывных наблюдений наиболее подходящими представляются итерационные адаптивные методы [4]. В таких методах последовательно вычисляемые решения уравнений получаются при постоянно обновляющихся с течением времени данных временных рядов измерений. Если связи между рядами не изменяются, то передаточные функции $I_{zx}(t)$ и $I_{zy}(t)$ принимают после ряда итераций установившиеся значения, и в дальнейшем колеблются в их малой окрестности. Если стационарность связей между рядами нарушается, то адаптивный процесс отслеживает изменения передаточных функций по времени. Это, конечно, возможно лишь при более медленных их изменениях по сравнению с вариациями самих временных рядов. Наиболее простой и в то же время эффективный адаптивный метод решения систем алгебраических уравнений, к которым после дискретизации сводятся интегральные уравнения, – метод наименьших квадратов Уидроу-Хоффа [4]. Итерационный алгоритм этого метода чрезвычайно прост. Если, например, два ряда $y(t)$ и $x(t)$ связаны между собой линейной причинно-следственной связью, то выражение

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА СЕГОДНЯ И ЗАВТРА
ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ



свертки, описывающее эту связь, можно представить в следующем интегральном виде:

$$y(t) = \int_0^t g(\tau) \cdot x(t-\tau) d\tau + \Delta y(t), \quad (1)$$

где $g(\tau)$ - некоторая передаточная функция (точнее - ее импульсная переходная характеристика), а $\Delta y(t)$ - невязка, характеризующая точность выполнения сверточной связи. Если среди наблюдаемых рядов можно выделить N независимых процессов, то любой другой ряд, порождаемый этими процессами, будет описываться векторным соотношением свертки:

$$y(t) = \sum_{i=1}^N g_i(t) * x_i(t). \quad (2)$$

Обновление коэффициентов импульсных переходных характеристик при решении уравнений свертки адаптивными методами производится на каждом шаге вычислений в соответствии с итерационным алгоритмом Уидроу-Хоффа:

$$g_i(k+1, l) = g_i(k, l) + \mu \Delta y(k) x_i(k-l), \quad (3)$$

где индекс k указывает дискретизированное текущее время наблюдений, l обозначает время задержки импульсной переходной характеристики g_i , а μ - величину параметра сходимости. Значения $\Delta y(k)$ находятся путем вычитания из наблюдаемого значения временного ряда $y(k)$ его синтезированного значения $y^s(k)$:

$$y^s(k) = \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^L g_i(k, l) \cdot x_i(k-l) \cdot \Delta t. \quad (4)$$

Последнее выражение представляет собой дискретизированную форму соотношения свертки (2) с определенными на k -ом времени значениями передаточных функций, здесь Δt - интервал дискретизации.

Блок-схема вычислительного алгоритма представлена на рис. 4.

На представленной схеме блоки «Адаптивный фильтр 1» и «Адаптивный фильтр 2» реализуют вычислительный процесс итерационного алгоритма метода наименьших квадратов Уидроу-Хоффа в соответствии с выражением (3). В качестве опорных сигналов на входе для примера взяты две горизонтальные компоненты геомагнитного поля (H_x , H_y), в качестве основного (рабочего) - вертикальная компонента магнитного поля H_z , либо горизонтальные компоненты электрического поля E_x или E_y . Разностный сигнал на выходе находится путем вычитания из наблюдаемого значения H_z (E_x или E_y) их синтезированных значений в соответствии с выражением (4).

Алгоритм адаптивной обработки данных первоначально был реализован в виде пакета программ на языке PASCAL для обработки

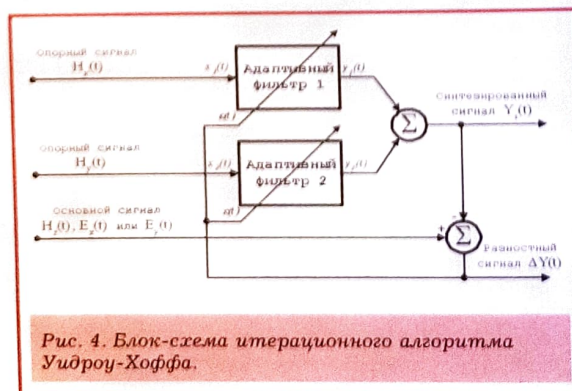


Рис. 4. Блок-схема итерационного алгоритма Уидроу-Хоффа.

данных в реальном масштабе времени. В дальнейшем была проведена полная ревизия прикладного программного обеспечения и разработана его обновленная версия на языке MATLAB. В настоящее время, при финансовой поддержке РФФИ в рамках гранта 03-07-90066 «Интерактивный WEB-ресурс для адаптивной обработки экспериментальных данных на основе инструментального средства MATLAB на основе Server», на сервере ИЗМИРАН организован сетевой доступ к вычислительным средствам MATLAB с использованием стандартного Web-браузера <http://matlab.izmiran.ru/>. Web Server дает возможность воспользоваться вычислительными возможностями MATLAB даже тем пользователям, на компьютерах которых MATLAB не установлен. Для этого достаточно иметь подключение к Интернет и стандартный Web-браузер.

Адаптивная обработка данных ИВК-МТМ в реальном масштабе времени, повторная их обработка и работа с архивами данных

Обработка данных в реальном масштабе времени работы ИВК-МТМ и их повторная обработка производится в трех частотных поддиапазонах.

Таблица 1. Параметры цифрового фильтра в поддиапазонах.

Поддиапазон (периоды)	Шаг дискретизации	Длина окна (дискрет/время)	Шаг окна (дискрет/время)	Интервал усреднения (дискрет/время)
1 (1 - 60 с)	0,5 с	360 / 3 мин	120 / 1 мин	30 / 15 с
2 (1 - 60 мин)	15 с	360 / 90 мин	60 / 15 мин	20 / 5 мин
3 (1 - 30 час)	15 мин	360 / 90 час	12 / 3 час	12 / 3 час

Разделение входных данных на частотные поддиапазоны (в периодах): $T=1-60$ с, $T=1-60$ мин и $T=1-30$ час производится скользящим цифровым фильтром, длина которого составляет 1 или 60 мин или 30 час, в зависимости от поддиапазона (количество дискретов выбирается в соответствии с таблицей 1). Задержка по времени на фильтрацию и адаптивную обработку составляет в 1-ом поддиапазоне - 2 минуты, во 2-ом - 2 часа и 3-ем поддиапазоне - 45 часов. В процессе фильтрации, при необходимости, осуществляется автоматическое редактирование исходных данных - выбросы и помехи техногенного происхождения в пределах заданной длительности и величины замещаются интерполированными значениями. Пороговые значения длительности и величины редактируемых выбросов задаются оператором в начале работы и могут изменяться по мере накопления опыта обработки экспериментальных данных. В качестве опорных сигналов при адаптивной фильтрации используются горизонтальные магнитные компоненты. Визуализация результатов обработки по всем обрабатываемым каналам производится в виде пяти последовательных графиков: 1) исходное поле; 2) остаточное поле; 3) спектральный временной разрез остаточного поля; 4) и 5) динамические разрезы в виде двух передаточных функций. Вывод результатов обработки производится автоматически реализациями длиной: 1 час - каждый целый час в 1-ом поддиапазоне, 1 сутки - каждые сутки во 2-ом поддиапазоне и 28, 29, 30 или 31 суток - каждый целый месяц в 3-ем поддиапазоне. При этом формируются и сохраняются файлы обработанных данных по всем компонентам, в том числе - файл

передаточных функций, файл данных спектрально-временного анализа остаточного поля и файл значений исходного и остаточного полей, которые могут быть просмотрены с помощью программ графического вывода.

Примеры регистрации обработки

На рис. 5 - приведен пример обработки в первом поддиапазоне. Первый график отображает первичное наблюдаемое поле. По вертикальной оси графика отложена интенсивность магнитного поля (в пТл), а по горизонтальной - время в мин. Горизонтальная ось для всех графиков имеет одинаковую размерность. На втором графике показано остаточное поле, полученное в результате обработки (в том же масштабе, что и первичное поле). Как видно из графиков, первичное поле после обработки ослаблено почти в 2,5 раза в результате устранения эффектов ионосферно-магнитосферного влияния.

Третий график дает представление о спектрально-временных характеристиках остаточного поля. По вертикальной оси графика отложены в логарифмическом масштабе периоды гармонических составляющих в секундах, а цветом отражена интенсивность, шкала которой показана справа вверх. На четвертом и пятом графиках приведены динамические разрезы импульсных переходных характеристик компонент индукционного вектора магнитного поля. По вертикальной оси этих графиков в логарифмическом масштабе показана временная задержка импульсных переходных характеристик (время становления поля) в секундах, а в цвете - интенсивность, шкала которой изображена справа внизу.

На рис. 6 приведен пример обработки данных во втором поддиапазоне.

В этом случае на графиках результатов обработки во втором поддиапазоне в отличие от первого изменился масштаб по горизонтальным осям - время отложено не в минутах, а в часах. Кроме того, изменился масштаб по вертикальной оси графика результатов спектрально-временного анализа остаточного поля - периоды спектральных составляющих выражены в минутах, а не в секундах, как это было в первом поддиапазоне.

На рис. 7-8 даны примеры обработки для вертикальной магнитной компоненты поля в третьем поддиапазоне. Как видно из графиков, изменился масштаб по горизонтальным осям - время выражено в днях месяца (рис. 7) или в днях года (рис. 8). Изменился также масштаб по

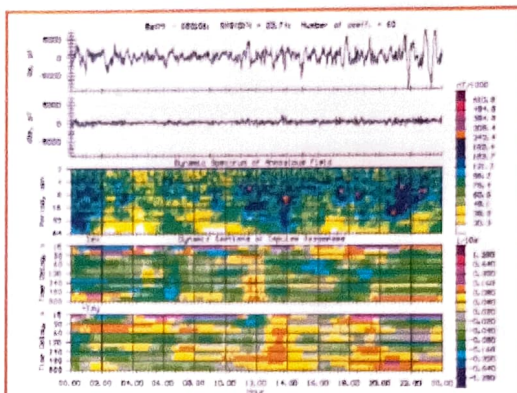


Рис. 6. Пример обработки вертикальной магнитной компоненты поля во втором поддиапазоне.

вертикальной оси графиков результатов спектрально-временного анализа - периоды гармонических составляющих представлены в часах. Масштаб по вертикальным осям разрезов передаточных функций выражен в минутах.

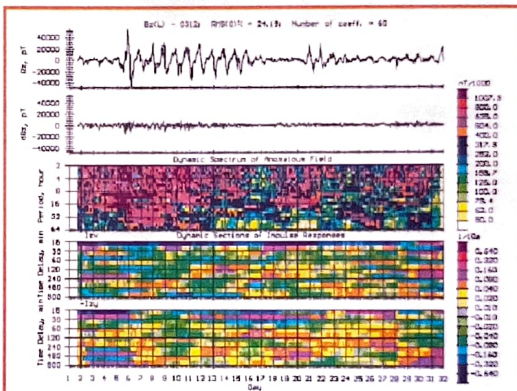


Рис. 7. Пример обработки вертикальной магнитной компоненты поля в третьем поддиапазоне.

Полевые испытания ИВК-МТМ в Кавказском регионе

ИВК-МТМ был установлен южнее г. Кисловодск на горе Шиджатмаз на высоте 2000 м над уровнем моря в районе астрономической станции с одноименным названием. Регистрация МТ поля осуществлялась с 16.10.99 по 07.11.99. Она избилует фрагментарностью из-за

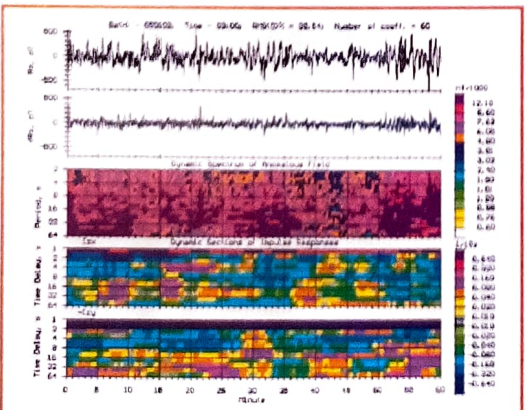


Рис. 5. Пример регистрации и обработки вертикальной магнитной компоненты поля в первом поддиапазоне.

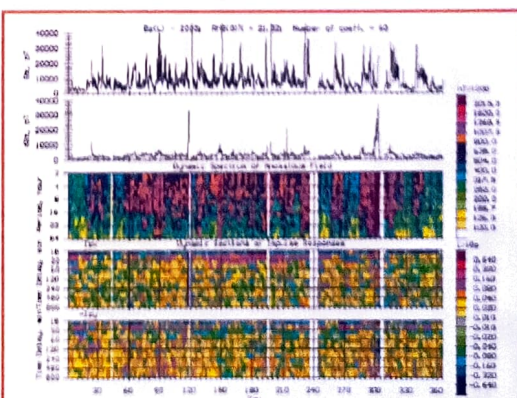


Рис. 8. Пример обработки вертикальной магнитной компоненты поля в третьем поддиапазоне.

Таблица 2. Геодинамические возмущения в районе наблюдений.

Дата события	Время события	Магнитуда	Характер события
03.11.99	17 ч. 56 мин	3,4	Землетрясение
04.11.99	17 ч. 56 мин	-	Промышленный взрыв

длительных выключений (до нескольких суток) электроэнергии, а также из-за поломки аппаратуры. Как оказалось, в районе регистрации создавались сильные электромагнитные помехи, вызванные включениями и выключениями силовых установок астрономической станции. Кроме того, были помехи от биологических объектов (крыс-землероек, засыпавших грунтом магнитометры и от передвижения скота по склонам горы, где были расположены датчики поля). За время регистрации МТ поля, примерно в 100 км от точки наблюдения, имели место механические возмущения геодинамического или техногенного происхождения (таблица 2).

Пример регистрации и обработки в среднечастотном диапазоне B_z , E_x , E_y показан на рис. 9 - 11. Стрелкой на нижнем графике отмечено время события.

Обработка данных в высокочастотном диапазоне проводилась в квазиреальном времени с задержкой в 1+2 минуты по отношению к времени регистрации МТ поля. Периодически, по мере накопления данных, осуществлялась обработка в среднечастотном и низкочастотном диапазонах. В целом, кавказские данные характеризуются сильными и частыми изменениями передаточных функций за сравнительно короткий

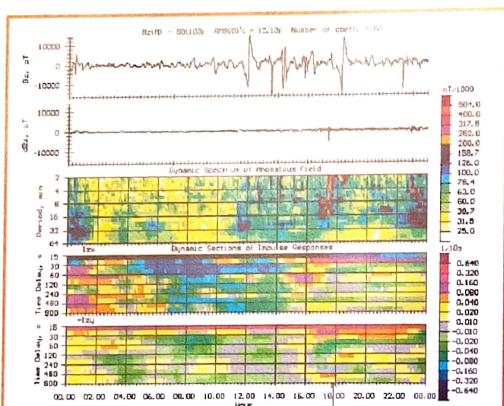


Рис. 9. Суточная реализация вертикальной магнитной компоненты за 03.11.99 г.

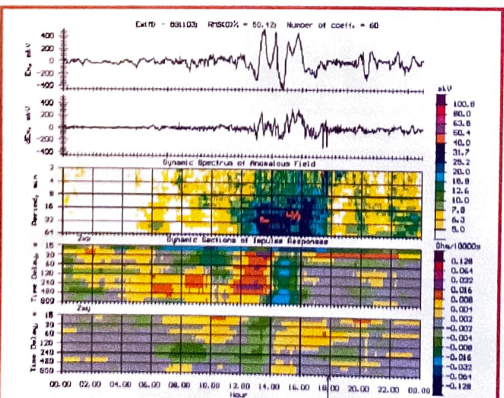


Рис. 10. Суточная реализация электрической компоненты E_x за 03.11.99 г.

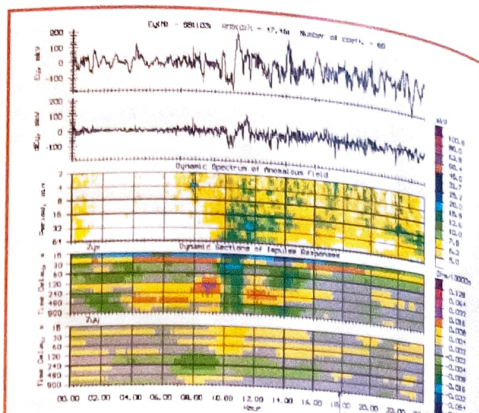


Рис. 11. Суточная реализация электрической компоненты E_y за 03.11.99 г.

промежутков времени, а также возрастанием остаточного поля в дневное время и его снижением к ночи. Это видно и на рисунках 9+11. На рис. 10-11 видны отчетливые изменения импеданса, предшествующие событию.

В низкочастотном диапазоне (рис. 12 - 14) можно проследить за изменением передаточных функций и их возможной связью с прошедшими событиями. Здесь также стрелкой помечены события на нижнем графике. В вертикальной магнитной компоненте (рис. 12) в период, предшествующий землетрясению 3 ноября, были изменения, вплоть до смены знака, в I_{zx} . В электрической компоненте E_x (рис. 13) в Z_{xx} видны существенные изменения на события от 3 ноября. В электрической компоненте E_y (рис. 14) видно резкое изменение со сменой знака перед событием 3 ноября. В то же время по Z_{yy} видны очень малые изменения за весь период наблюдений.

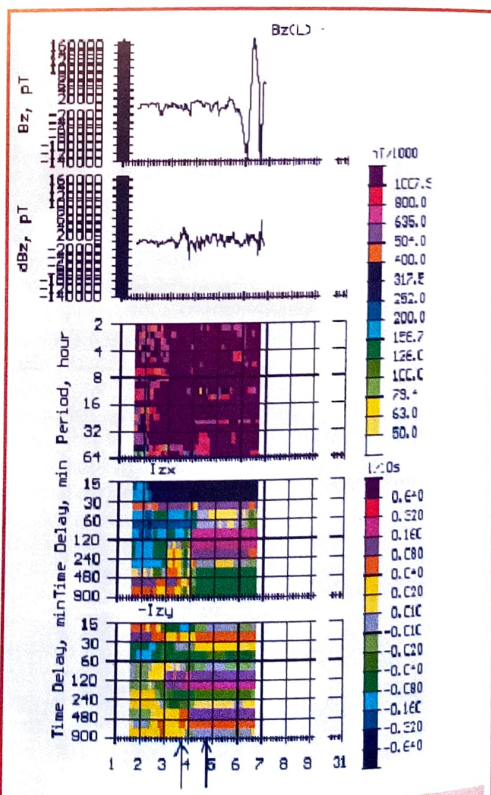


Рис. 12. Реализация вертикальной магнитной компоненты в низкочастотном диапазоне за ноябрь 1999 г.

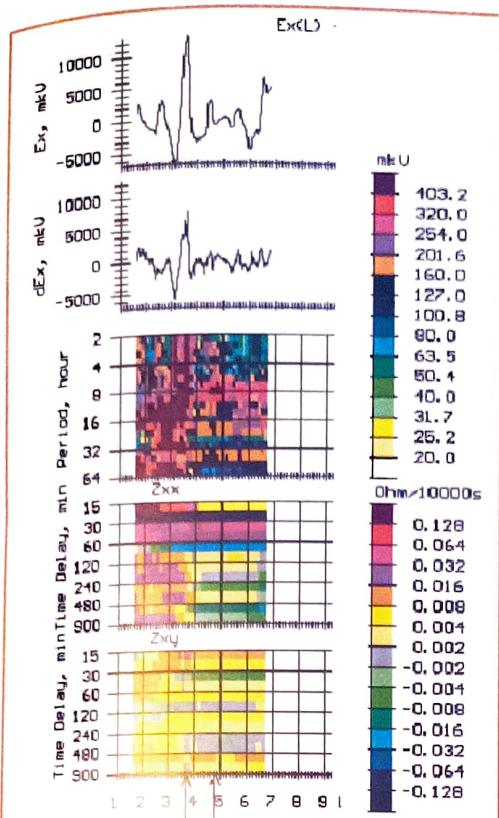


Рис. 13. Реализация электрической компоненты E_x в низкочастотном диапазоне за ноябрь 1999 г.

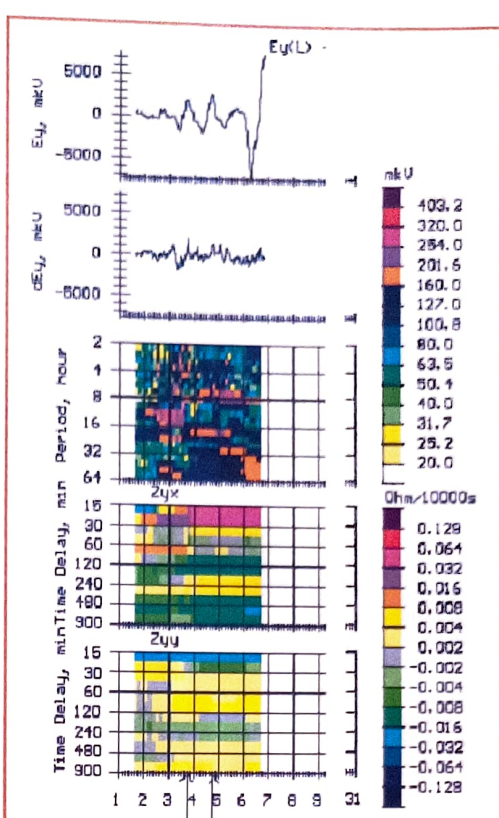


Рис. 14. Реализация электрической компоненты E_y в низкочастотном диапазоне за ноябрь 1999 г.

Заключение

Необходимо отметить, что в первоначальном варианте ИВК-МТМ, прошедшем испытания в Кавказском регионе, отсутствовал сейсмодатчик. После испытаний была проведена доработка комплекса, и сейсмодатчик был включен в состав ИВК-МТМ. С конца сентября 2002 г. и по настоящее время ИВК-МТМ проходит длительные (свыше трех лет) испытания по непрерывной регистрации и обработке магнитотеллурического поля на территории ИЗМИРАН (г. Троицк Московской обл.). Испытания показали высокую

надежность комплекса, отвечающую его функциональному назначению.

Литература

1. Светов Б.С., Каринский С.Д., Кукса Ю.И., Одинцов В.И., «Магнитотеллурический мониторинг геодинамических процессов», Физика Земли, 1997, №5, с. 36-46.
2. Тихонов Н. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М., Наука, 1979, 285 с.
3. Светов Б. С., Шимелевич М. И. Определение линейных связей между компонентами магнитотеллурического поля - основные принципы. Физика Земли, 1982, №5, с. 59-67.
4. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. М., Радио и связь, 1989, 440 с.

ПОДПИШИСЬ

Персональная информация о подписчике/Почтовый адрес организации

ФАМИЛИЯ		ИМЯ		ОТЧЕСТВО	
ПОЛНОЕ НАИМЕНОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ					
ОТДЕЛ/ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ			ДОЛЖНОСТЬ		
ИНДЕКС	СТРАНА	ГОРОД	ОБЛАСТЬ/РАЙОН		
АДРЕС					
КОД ГОРОДА	ТЕЛЕФОН	ФАКС	E-MAIL		

Россия, 410019, г. Саратов, ул. Крайняя 129, СО "ЕАГО" - в редакцию "Приборы и системы разведочной физики"

Стоимость годовой подписки (с почтовой пересылкой и НДС - 10%)

Наименование издания

1 Комплект (4 годовых номера)

Журнал "Приборы и системы разведочной геофизики"

1760 руб.

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА СЕГОДНЯ И ЗАВТРА ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ