

МЕТОДЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОНИТОРИНГА

Берикова Г.К.

Институт горного дела и горных технологий им. академика У. Асаналиева КГТУ им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан

В данной статье рассматриваются основные методы и современный аппаратный комплекс при исследовании геодинамических объектов.

In this article the main methods and a modern hardware complex are considered at research of geodynamic objects

Как известно, в разные годы на территории Кыргызстана функционировали 12 МВС (магнитовариационных станций) из них пять (Ананьево, Боом, Таш-Мойнок, Новостройка и Арал) – Опытно-методической сейсмологической экспедиции (ОМСЭ) ИС НАН КР, семь (Ак-Суу,

Шавай, Чонкурчак, Кегеты, Таш-Башат, Иссык-Ата, Карагай-Булак) – Научной станции Российской Академией наук (НС РАН) (6).

Магнитовариационные станции в основном территориально были расположены в пределах Северо-Тянь-Шаньской сейсмогенерирующей

зоне (Бишкекский и Иссык-Кульский прогностические полигоны), на территории которого произошли катастрофические и разрушительные землетрясения (9–10-балльные Беловодское 1885 г. и Верненское 1987 г., 10–11-балльное Кеминское 1911 г. и 10-балльное Чиликское 1889 г. др.). В Центральном Тянь-Шане на территории которого повышенной сейсмической активностью характеризуются Сонкульская, Джумгало-Суусамырская зоны расположена МВС Арал. В 1992 году на данной станции были зафиксированы геомагнитные аномалии предшествующие Суусамырскому землетрясению с $M=7.3$, произошедшего в Джумгало-Суусамырская зоне (7).

В геологическом строении рассматриваемой кыргызской части Тянь-Шаня участвуют два крупных мегакомплекса горных пород: консолидированный докембрийский фундамент и мезозойско-кайнозойский покров. Нижний – представлен осадочно-вулканогенными, осадочными, магматическими и метаморфическими горными породами допалеозойского и палеозойского возраста, слагающими хребты и днища впадин, а верхний – сложен морскими и континентальными осадочными толщами мезозоя и кайнозоя [7]. Весь этот комплекс геологических образований образует сейсмоактивный слой верхней части земной коры Тянь-Шаня.

На Бишкекском полигоне в разные годы проводились работы по созданию периодически действующей экспериментальной сети аудиоманнитотеллурического мониторинга (АМТ) сейсмической активности в диапазоне сверхнизких частот, и исследование вариаций удельного электрического сопротивления горных пород и аномалий ЭМИ, вызванных изменениями напряженного состояния горных пород под воздействием приливов твердой земли и сейсмических событий [1].

Полевые экспериментальные измерения были проведены на территории Бишкекского полигона на участках: Кызыл-Туу, Орок, Кызыл-Бирлик, Уч-Эмчек, Тогуз-: Джеламыш, Орок, Кызыл-Бирлик, Таш-Башат, Учмчек.

Основной задачей этих исследований являлось расширение сети стационарных МВС и создание периодически действующей экспериментальной сети аудиоманнитотеллурического (АМТ) мониторинга; проведение полевых экспериментальных работ на Бишкекском полигоне по изучению особенностей приливных изменений кажущегося сопротивления и вариаций ЭМИ; обработка и анализ режимных материалов вариаций геомагнитного поля по данным МВС, обработка и анализ результатов полевых работ, выбор оптимальных частот для мониторинга кажущегося сопротивления и наиболее информативных характеристик ЭМИ при изучении напряжённого состояния геологической среды.

На постоянно действующих магнитовариационных станциях и пунктах повторных наблюдений в разные годы измерения проводились по единой методике с соблюдением требований к точности измерений (1,2).

При проведении дискретных и непрерывных измерений компонент магнитного поля, применялись мобильные высокоточные протонные магнитометры типа ММП-203, МВ-01, компонентный магнитометр (КПМ) на базе ММП-203 конструкции ЛО ИЗМИРАН, мобильные квантовые магнитометры М-33, измерения вариаций полного вектора геомагнитного поля T выполнялись магнитовариационными станциями типа «ИЗМИРАН-4» (Ананьево, Боом, Таш-Мойнок, Новостройка и Арал). Разностные значения магнитного поля рассчитывались относительно базовой геомагнитной обсерватории Таш-Мойнок.

Мобильные протонные магнитометры типа ММП-203 и КПМ на базе ММП-203 конструкции ЛО ИЗМИРАН, применяемые в стационарных и повторных наблюдениях при измерении абсолютного значения магнитного поля (компонент-составляющих магнитное поле), характеризуются погрешностью отсчета ± 1 нТл, время установления рабочего режима – 60 с. Получение сигнала осуществляется с помощью обмотки, выполненной в виде встречных включенных прямоугольных катушек. Измерительная часть магнитометра построена по схеме прямоотчетного дискретного частотомера.

Полевая магнитовариационная станция МВ-01 по метрологическим, энергетическим, функциональным и масс-габаритным характеристикам аналогов среди магнитометрической аппаратуры на современном этапе в странах СНГ не имеет. Станция создана на основе ядерно-процессионных преобразователей с применением микропроцессорных технологий на отечественных электронных компонентах. Систематическая погрешность абсолютных измерений МВ-01 не превышает $\pm 1,0$ нТл.

Протонные магнитометры типа КПМ постоянно используются для введения базисных значений на геомагнитных станциях Ананьево, Боом, Таш-Мойнок, Новостройка и Арал. Колечная система КПМ на базе ММП-203 конструкции ЛО ИЗМИРАН позволяет измерять компоненты составляющего магнитного поля.

Следует отметить, что протонные магнитометры действуют по принципу ядерной процессии, заключающейся в преобразовании магнитной индукции переменного электрического напряжения, частота которого строго пропорциональна магнитной индукции, сводится к измерению одной из наиболее точно измеряемой в настоящее время физической величины – частоты. Благодаря стабильности атомных констант и линейной зависимости частоты резонанса с внешним магнитным полем, протонные магнитометры

обладают рядом важных метрологических преимуществ – абсолютность получаемой информации, высокая чувствительность, стабильность показаний и др. Характерной особенностью протонных магнитометров является дискретность измерения

Для измерения полного вектора напряженности магнитного поля Т квантовые мобильные автоматические магнитометры М-33 использовались в комплексе, на опорных и временных пунктах наблюдений.

Передвижные повторные наблюдения на одиннадцати полевых пунктах проводились с периодичностью посещения 3–5 дней, длительностью сеанса наблюдения 15 мин, дискретностью 5 сек. Синхронность измерений на режимных станциях и полевых пунктах обеспечивается путем запуска часов всех магнитометров, по радиосигналам точного времени с погрешностью не более 0,4 сек.

Принцип действия протонных магнитометров (другие наименования: ядерные, ядерно-прецессионные) основан на взаимодействии магнитных моментов протонов рабочего вещества (воды, спирта или керосина) с внешним магнитным полем. Согласно упрощенному объяснению в рамках классической физики, атомное ядро, имеющее определенный магнитный момент, прецессирует (вращается конусообразно) в магнитном поле вокруг его направления с частотой (в Гц), определяемой соотношением Лармора:

$$f = (\gamma/2\pi) B,$$

где B — магнитная индукция (модуль); γ — гиромагнитное отношение ядра (отношение магнитного момента к механическому).

Протонный магнитометр позволяет производить измерения только дискретно, причем определяется модуль полной силы поля без ее направления. Порог чувствительности этих магнитометров от 1 до 0,01 нТл в зависимости от длительности цикла измерений. Их показания достаточно устойчивы.

Для измерений удельного электрического сопротивления горных пород использовалась аппаратура АКФ-4М, которая предназначена для работ методами АМТЗ и СНЧЗ, а также для мониторинга сейсмической активности. Четырехканальный прибор АКФ-4М имеет диапазон рабочих частот от 1 до 800 Гц, обеспечивает регистрацию спектрограмм измеряемых сигналов электрического и магнитного полей и прямую запись сигналов с разрешением по частоте от 0,0005 до 15 Гц. Режим регистрации спектрограмм используется для зондирования и наблюдений за вариациями кажущегося сопротивления. Изучение аномалий ЭМИ производится в режиме прямой записи сигналов.

При проведении наземных высокоточных модульных измерений на опорных пунктах определялись и абсолютные значения магнитного поля по всем составляющим, для оценки

однаправленности полных геомагнитных векторов. Базовым пунктом являлась геомагнитная станция «Таш-Мойнок». При проведении геомагнитных исследований руководствовались инструкциями. Не допускалась установка опорных и рядовых пунктов МВС поблизости от мощных статических масс, и других мешающих факторов.

Выбор места и окончательная установка каждого опорного и рядового пункта для ежегодных повторных наблюдений была осуществлена после проведения рекогносцировочной съемки с помощью мобильных протонных магнитометров, по площади $25 \times 25 \text{ м}^2$ по прямоугольной сети. Пункты повторных наблюдений были выбраны на основании геолого-тектонических и площадных магнитометрических съемок.

Периодические измерения геомагнитного поля на этих пунктах были крайне необходимы для получения значений уровня магнитного поля до сейсмического события, а также для изучения магнитного поля во время повторных толчков. Известно, что локальное геомагнитное поле может быть обусловлено неоднородностью электромагнитной индукции: электрическим полем фильтрационной природы, геохимическими процессами в приповерхностных слоях земной коры. Эти составляющие локального магнитного поля обычно сводились к минимуму в процессе создания сети наблюдений, выбором определенного места расположения МВС. Очевидно, что информативность того или иного прогностического параметра зависит от конкретных геологических условий, особенностей режима и влияния различных факторов.

Так результаты многолетних исследований показали, что изменение намагниченности горных пород находятся в определенной связи с направлениями главных осей напряжения. Этот факт указывает на необходимость учета распределения тектонических напряжений при анализе локального магнитного поля.

В аппаратно-программном комплексе АКФ-4М, предназначенном для работы методами АМТЗ и СНЧЗ, а также для мониторинга сейсмической активности, использованы 24 разрядные АЦП в каждом канале измерений и сигнал-процессор ADSP 2189M с интерфейсом Ethernet. Объем внутренней памяти 128 Мб. Программное управление аппаратурой осуществляется при помощи компьютера Notebook. Встроенный GPS-приемник предназначен для определения координат и точного времени измерения. Аппаратура позволил производить четырехкомпонентные (тензорные) и двухкомпонентные (скалярные) измерения в рабочем диапазоне частот, а также мониторинг на одной частоте с программным управлением процессом измерений [1].

Полученные данные компонент магнитного поля проходили первичную компьютерную обработку комплексом программ в целях определения: среднечасовых, среднесуточных,

среднемесячных, среднегодовых значений, среднеквадратичного отклонения и разностного поля.

Построения разностных значений поля по всем компонентам МПЗ (магнитного поля Земли) проводятся по каждой МВС в связи с различными методами изучения магнитного поля. Геомагнитное поле изучается опосредованно через изучение передаточной функции Z/H , где Z – вертикальная, а H – горизонтальная составляющая геомагнитного поля. Для каждой станции строятся графики: истинный модуль полного вектора T , с поправками на вариации и на годовой ход магнитного поля; среднее квадратическое отклонение истинной величины модуля T -поля и годового изменения абсолютного поля T для каждой станции.

Для изучения Z/H используются нерегулярные геомагнитные бури, импульсы, внезапные начальные и бухтообразные возмущения по данным пяти магнитовариационным станциям с помощью МВС типа «ИЗМИРАН-4» – Ананьево, Боом, Арал, Таш-Мойнок, Новостройка. Для расчета спектров геомагнитного поля применялись МВС «ИЗМИРАН-4» с чувствительностью 2–3 нТл/мм, позволило четко регистрировать возмущения перечисленных выше типов.

Разностные поля по всем компонентам МПЗ рассчитывались по спокойному часу относительно базового пункта Таш-Мойнок. Ежесуточные компоненты разности осреднялись по пяти точкам. По осредненным данным определялось главное направление изменения разностного поля и рассчитывалось приращение трендовой составляющей по отдельным компонентам МПЗ в месячном интервале. Средняя величина трендового разностного поля достраивалась с учетом знака к начальным значениям каждого из разностных линейных векторов. По полученным данным строились суммарные проекции разностного полного геомагнитного вектора для плоскостей: $H-D$, $D-Z$, $H-Z$.

Различного рода помехи (в их число входят и вариации, полученные за счет внешнего поля – его неоднородности и индукционных эффектов) могут иметь такую же частотную характеристику, как и ожидаемые аномальные эффекты. В связи с чем, определяется природа тех или иных вариаций геомагнитного поля. Для этого используются разностные ряды ΔT , полученные по магнитоспокойным периодам и ряды, контролирующие работу аппаратуры (среднесуточные значения разностей по двум приборам на каждой станции).

Результаты режимных наблюдений за вариациями модуля геомагнитного поля T обрабатываются комплексом программ на базе общепринятой разностной методики, а также новым программ, способствующим более объективной интерпретации полученных результатов.

Программное обеспечение аппаратуры АКФ-4М предназначено для работ методами АМТЗ и СНЧЗ, а также для мониторинга сейсмической активности, состоит из трех частей:

-первая часть предназначена для управления процессом измерений и обеспечивает установку измерительных параметров, сохранение получаемых данных и их экспорт на внешний компьютер;

-вторая часть производит обработку данных (спектральный анализ данных, учет амплитудных и фазочастотных характеристик каналов и магнитных датчиков, расчет кривых импедансов, кажущихся сопротивлений и фаз импедансов);

-третья часть предназначена для интерпретации и визуализации результатов измерений [1].

Длительность геомагнитного T -предвестника от момента его возникновения до момента землетрясения, по разным источникам, варьирует в разных интервалах. В основном, его форма представлена в виде асимметричной бухты, характеризующейся до события направленным и постепенным изменением геомагнитного поля, которое быстро меняет свой знак. Реже изменение знака T -поля происходит мгновенно. В целом, многочисленные исследования с применением современного аппаратного комплекса магнитных явлений на разных полигонах показали, что связь между вариациями геомагнитного поля и землетрясениями имеется, но не однозначная. Исследования изменения кажущегося электрического сопротивления ориентированы для прогнозных исследований. Прогнозирование места будущего землетрясения возможно при наличии сети станций, применением современного аппаратного комплекса или пунктов по наблюдениям за изменениями кажущегося электрического сопротивления, а так же в комплексе с другими полями (сейсмологическими, гидрогеохимическими, гидродинамическими и т.д.) (4,5). Таким образом, анализ материалов позволяет сделать некоторые выводы: изменения геомагнитного поля, связанные с процессами в земной коре, могут быть вызваны сейсмическими (сейсмической активностью, землетрясениями и афтершоковой деятельностью), вулканическими, тектоническими, химическими и другими естественными и искусственными процессами. Возрастающие напряжения порождают предвестники геомагнитного поля (пьезомагнитный эффект), а дилатантно-диффузионные процессы порождают предвестники по земным токам и электросопротивлению. Характерные времена и интенсивность обнаруженных аномальных геомагнитных эффектов лежат в широких пределах. Отсутствие магнитных эффектов объясняется суперпозицией тектономагнитных сигналов (наложением

нескольких процессов изменений в напряженно-деформированной среде).

Появление «ложных» магнитных аномалий происходит за счет изменения преимущественного направления (поляризации) длиннопериодных вариаций геомагнитного поля.

Отмечены региональные области вариаций магнитного поля интенсивностью от 1,0 до 10 нТл, имеющие значительные размеры (первые сотни километров), которые, вероятнее всего, обусловлены региональными процессами, протекающими под земной корой или с течением электрических зарядов, образующихся в результате вязкого течения подкорового вещества.

Локальные изменения магнитного поля (первые десятки километров) интенсивностью от 3 до 17 нТл, возможно, обусловлены деформационными процессами в земной коре, сопровождающими подготовку и проявление сейсмических событий.

Литература:

1. Бакиров К.Б. Геомагнитные явления и сейсмотектонические процессы Кыргызского Тянь-Шаня. Бишкек: Илим, 2003. – 144 с.
2. Головков В.П., Иванов Н.А., Пудовкин И.М., Шапиро В.А. Инструкция по поискам и изучению аномалий векового хода геомагнитного поля // Москва: АН СССР, 1977. – 24 с.
3. Касахара К. Механика землетрясений. Москва: Мир, 1985. – 263 с.
4. Каталог геомагнитных предвестников землетрясений. – Под ред. С.И. Зубкова. – Москва: ИФЗ АН СССР, 1984. – 44 с.
5. Каталог импульсных электромагнитных предвестников землетрясений. М.: Институт физики Земли АН СССР. – 1991. – 128 с.
6. Трапезников Ю.А. О результатах проведения опытно-методических электромагнитных прогностических наблюдений в пределах сейсмогенных зон Средней Азии в 1991-1994 г.г. // Отчет ИВТАН. – Бишкек, 1994. – 340 с
7. Юдахин Ф.Н. Геофизические поля, глубинная структура и сейсмичность Тянь-Шаня. – Фрунзе: Илим, 1983. – 248 с.
8. Яновский Б.М. Земной магнетизм. – Л.: ЛГУ, 1978. – 592 с.