

УДК 550.837 (575.2-17)

ЭТАПЫ СТАНОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОНИТОРИНГА НА СЕВЕРЕ КИРГИЗИИ

В.А. Мухамадеева

Изложены основные этапы организации электромагнитного мониторинга в пределах Бишкекского геодинамического полигона, расположенного в северной части Киргизии.

Ключевые слова: зондирование; мониторинг; диполь; кажущееся удельное электрическое сопротивление; землетрясение.

ABOUT THE MAIN PHASES OF ELECTROMAGNETIC MONITORING IN THE NORTH OF KYRGYZSTAN

V.A. Mukhamadeeva

The main phases of electromagnetic monitoring within the territory of Bishkek Geodynamic Proving Ground located in the north of the Kyrgyzstan are stated.

Key words: sounding; monitoring; dipole; apparent electrical resistance; earthquake.

В 70-х годах прошлого столетия вопросы прогноза землетрясений казались делом почти решенным. Оптимизм внушали случаи успешного прогноза землетрясений по всему миру. Среди эффективных предвестников землетрясений рассматривались и вариации кажущегося удельного электрического сопротивления ρ_k . Их изучением занимались в США, Италии, Японии и других странах. Однако при проведении наблюдений применялись, как правило, малоглубинные электроразведочные установки с недостаточно мощными искусственными источниками возбуждения поля или изучались вариации естественных полей Земли, а сами измерения зачастую проводились фрагментарно как во времени, так и в пространстве.

Определенную ясность в процесс изучения природы землетрясений могли внести данные об изменениях электрических параметров в области формирования их очагов – применительно к территории Северного Тянь-Шаня – это глубины преимущественно 5–15 км (до 25 км). Именно на глубинные методы электроразведки – частотное зондирование (ЧЗ) и зондирование становлением поля (ЗС) с использованием мощных источников возбуждения электромагнитного поля (МГД-генераторов), магнитотеллурическое зондирование (МТЗ), основанное на изучении есте-

ственного электромагнитного поля Земли – была сделана ставка в далеком 1978 г., когда Советом Министров СССР было принято решение об организации на территории Киргизии Фрунзенского прогностического полигона (сейчас это Бишкекский геодинамический полигон – БГП).

Основные этапы электромагнитного мониторинга с указанием целей, стоящих перед каждым из методов, и информацией о методике и технике работ за более чем 30-летнюю историю наблюдений, в хронологической последовательности приведены в таблице 1.

На начальном этапе исследований в центральной части полигона (рисунок 1а) были проведены вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ), по результатам которых была получена информация о строении верхней части геоэлектрического разреза прилегающей к Научной станции территории, выбраны места для устройства заземлений питающего диполя для предстоящих глубинных электромагнитных зондирований и начаты режимные наблюдения методом ВЭЗ.

Впоследствии было установлено, что изменения сопротивления были связаны с процессами, происходящими в верхнем маломощном горизонте, обусловленными промерзанием и последующим оттаиванием грунтов, причем влияние гидрометеоро-

Таблица 1 – Виды электромагнитного мониторинга

Метод	Краткая информация о цели, методике и технике наблюдений
ВЭЗ	<p>1. Изучение геоэлектрического строения верхней части разреза центральной части полигона и детализационные работы по выбору места для заземлений питающего диполя (1980–1981 гг.) МГД-установки. Наблюдения по 7 профилям с АВ = 450 м с детализацией (50 × 50 м на участке южного заземления)</p> <p>2. Режимные наблюдения на стационарных и передвижных пунктах ВЭЗ (1982–1991 гг.) с целью изучения вариаций кажущегося удельного электрического сопротивления рк и оценки влияния гидрометеорологических, гидрогеологических факторов и приповерхностных деформационных процессов на результаты глубинных э/м зондирований. Наблюдения выполнялись установкой Веннера с 3-мя питающими линиями АВ: 100, 300, 1000 м и приемными линиями MN соответственно 10, 30 и 100 м. На стационарах использовались крестовые установки ВЭЗ. Дискретность измерений – 2 раза в сутки; при наличии аномалий сопротивления – через каждые 2 часа до ее окончания. Источники питания: специально разработанные для стационаров генераторные устройства с питанием от промышленных ЛЭП и батареи 69-ГРМЦ-6 при работах на передвижных пунктах наблюдений. Измерительная аппаратура: АЭ-72</p>
ДЭЗ	<p>1. Режимные наблюдения на стационарных и передвижных пунктах наблюдений за вариациями рк (1983–1990). Наблюдения проводились с применением 2-х закрепленных на местности питающих диполей: большого, длиной 4200 м (для удаленных точек с разносом до 28 км), ориентированного в направлении север – юг, и малого диполя длиной 620 м (для точек в ближней зоне, с разносом до 8 км), расположенного ортогонально к большому диполу. Зондирование осуществлялось знакопеременными импульсами длительностью 4 с (позднее – 4,8 с). Дискретность измерений – 1 раз в 3–5 дней с регистрацией информации на магнитную ленту. Источники питания: ЭРС-67 (до августа 1983 г.), позже – разработанные силами Научной станции электроимпульсные системы (с питанием от промышленной ЛЭП): ЭИС-100 (1983 г.), ЭИС-300 (1984 г.), ЭИС-630 (1986 г.). Сила тока, подаваемая на питающие диполи – 100 А, 300 А, 630 А. Измерительная аппаратура: специально созданные ИВТАН-1 и ИВТАН-1М (1982–1987 гг.), КИЦ-М и КИЦ-МА (1987–1988 гг.) соответственно для стационаров и рядовых пунктов измерений (на базе автомобиля ЗИЛ-131, ГАЗ-66)</p> <p>2. Изучение геоэлектрического строения полигона в дополнение к частотным зондированиям</p>
ЧЗ	<p>1. Режимные наблюдения на стационарных и передвижных пунктах наблюдений (1983–1990 гг.) за вариациями рк в варианте “диполь-диполь” (АВ = 4200 м, MN от 100 до 1000 м) одиночными мощными импульсами. Синхронная работа генераторной и приемной станций осуществлялась по сигналам точного времени ГСВЧ в КВ-диапазоне. Дискретность измерений: 2 раза в месяц (“горячие пуски”) и 4 раза в неделю – “холодные” пуски. Измеряемые параметры: Ех, Еу. Источники питания: твердотопливные МГД-установки “Прогноз-1” и “Памир-2” (“горячие пуски”, с 1983 г.), батарея конденсаторов системы начального возбуждения МГД-установки “Прогноз-1” (“холодные” пуски, с 1984 г.). Характеристики для установки “Прогноз-1”: макс. значение тока в нагрузке – от 1,23 до 2,88 кА, время действия импульса – 2,2 с – 3,2 с; для установки “Памир-2” – соответственно 1,86–2,3 кА и 10,5–12,1 с. При “холодных” пусках амплитуда тока в питающем диполе 4–5 кА, длительность импульса – 0,5–0,6 с. Измерительная аппаратура: аналоговая аппаратура на базе самописцев Н 336 (до августа 1984 г.), позже – цифровой измерительный комплекс КИЦ и КИЦ-1М (на стационарах) с выводом информации на цифropечать и ИВТАН-1 (для передвижных станций на базе ГАЗ-66) с записью информации на магнитную ленту</p> <p>2. Изучение геоэлектрического строения района с целью построения моделей разного уровня детальности и выбора дополнительных точек для сети мониторинга (1988–1990 гг.). Выполнены зондирования более чем на 200 пунктах ЧЗ с использованием вертолета МИ-8 для работ в высокогорных и сильно удаленных от полигона точках. Интерпретация данных кривых зондирования производилась с использованием автоматизированной системы ЭРА, разработанной в лаборатории электромагнитных полей ИГФ СО РАН</p>
ЗСД	<p>1. Режимные наблюдения на стационарных и передвижных пунктах наблюдений за вариациями рк (с 1987 г. по наст. время). Зондирования выполнялись в варианте “диполь-диполь” (АВ=4200 м, MN от 100 до 1000 м). Зондирующий сигнал – периодическая последовательность разнополярных прямоугольных импульсов тока амплитудой 600–800 А (в ЭРГУ-600-2 до 1400 А); длительность импульса – 5 с, продолжительность сеанса – 15–20 мин. Синхронная работа генераторной и приемной станций ранее осуществлялась по сигналам точного времени ГСВЧ в КВ-диапазоне, в настоящее время – по часам GPS-приемников. Дискретность измерений: на стационарах – ежедневно по 6 сеансов в день (кроме праздников и выходных); на рядовых пунктах – 1 раз в 3 дня (до 1992 г.), в наст. время – 1 раз в неделю. Измеряемые параметры: Ех, Еу (на отдельных стационарах).</p>

ЗСД	<p>Источники питания: ЭИС-630 с питанием от промышленной сети переменного тока 10 кВ; ЭРГУ-600. Измерительная аппаратура: токовые станции – ИТ-1 и ТИС-1 (до 2009 г.), позже – ТИС-2, ТИС-3; приемные станции – КИЦ-М (на стационарах) и КИЦ-МА (на передвижных станциях на базе ГА3-66) до 2009 г., сейчас – ИС-2</p> <p>2. Изучение геоэлектрического строения района (1988–1990 гг.) и расширение сети электромагнитного мониторинга. Зондирования проведены более чем на 100 пунктах ЗСД с использованием вертолета МИ-8 при работах в высокогорных и сильно удаленных от полигона точках. Интерпретация данных кривых зондирования производилась с использованием автоматизированной системы ЭРА, разработанной в ИГФ СО РАН</p>
ЗСБ	<p>Опытно-методические работы на станции Карагай-Булак (северный берег оз. Иссык-Куль) и на отдельных площадках полигона с целью изучения возможности применения метода ЗСБ для получения информации о верхней части разреза в дополнение к наблюдениям методами ЧЗ и ЗСД. Работы (1987–1988 гг.) производились в варианте совмещенных петель (100 × 100 м) с использованием аппаратуры “Каскад”. Дискретность наблюдений – не менее 2 раз в сутки. Измерения в одном сеансе проводились в режиме накопления на 30 фиксированных временах. Обработка материалов полевых наблюдений проводилась на ЭВМ СМ-4 или ПК IBM</p>
МТЗ	<p>Режимные наблюдения по изучению вариаций кажущегося сопротивления в глубоких горизонтах земной коры. Наблюдения ведутся с 2003 г. вблизи 2-х стационарных пунктов ЗСД (Аксу, Чонкурчак) с непрерывной регистрацией 5 компонент естественного электромагнитного поля (Ех, Еу, Нх, Ну, Нз). Интервал регистрируемых периодов - от 0,003 с до 10000 с (при необходимости – до нескольких часов). Измерительная установка включает в себя две линии М1N1 и М2N2 (для Ех- и Еу-компонент поля) длиной 50–100 м, ориентированных в направлениях “север – юг” и “запад – восток”, и 3 индукционных датчика (для Нх, Ну, Нз). Измерительная аппаратура: станция MTU-5D канадской компании “Феникс Геофизикс”. Стандартная методика обработки измерений реализована в программе SSMT2000 (прилагается к станции) и дополнена программами MTEditor и CORRECTOR, разработанными соответственно в Центре электромагнитных исследований (Москва) и в геофизической компании “Северо-Запад” (Москва)</p>

логических факторов с увеличением глубинности (при АВ больше 300 м) прекращалось. Совпадение по времени аномальных изменений ρ_k на полигоне с удаленными сильными землетрясениями свидетельствовало о том, что это единый деформационный процесс. Однако отмечались случаи, когда сильные землетрясения не проявляли себя в вариациях ρ_k , что указывало, по всей видимости, на ограниченность прогностических возможностей ВЭЗ в силу их малой глубинности [1].

В 1983 г. к указанным выше наблюдениям добавились дипольные электрические зондирования (ДЭЗ), которые, в отличие от ВЭЗ, имели большую глубинность и дальность исследований. Практически сразу же после начала работ стало ясно, что для решения поставленных задач необходимо создание принципиально новых, мощных источников возбуждения поля и соответствующей регистрирующей аппаратуры. При активном участии специалистов Научной станции были разработаны генераторные установки – электроимпульсные системы, осуществляющие преобразование непрерывного потока энергии первичного энергообеспечения (ток от промышленных ЛЭП) в дискретные потоки энергии с заданными параметрами: ЭИС-100 (1983 г.), ЭИС-300 (1984 г.), ЭИС-630 (1986 г.), развивающие ток в активной нагрузке (диполе) соответственно 100, 300 и 630 А.

Данные по ВЭЗ и ДЭЗ использовались позже для оценки влияния гидрометеорологических и гидрогеологических факторов, приповерхностных деформационных процессов на результаты глубинных зондирований и позволили впоследствии “дополнить” информацией (первые 2–3 км) данные, полученные при частотных зондированиях.

В конце 1983 г. начались импульсные частотные зондирования (ЧЗ) на базе твердотопливных МГД-установок “Прогноз-1” и, главным образом, “Памир-2” (“горячие пуски”). Дискретность измерений составляла до 4-х пусков в месяц. После успешного проведения (с конца 1984 г.) опытно-методических работ с использованием батареи конденсаторов системы начального возбуждения МГД-установки “Прогноз-1” (“холодные” пуски), количество “горячих” пусков сократилось до 2 раз в месяц и к началу 1990 г. работы с МГД-генератором были прекращены.

Параллельно с ЧЗ со второй половины 1987 г. началось производство регулярных наблюдений методом ЗСД в режиме накопления сигналов с использованием электроимпульсной системы ЭИС-630, питающего диполя (АВ = 4200 м) и приемных линий, применявшихся при ЧЗ и ДЭЗ. Как показали результаты дальнейших исследований, применение электрического диполя при проведении глубинных зондирований способствовало

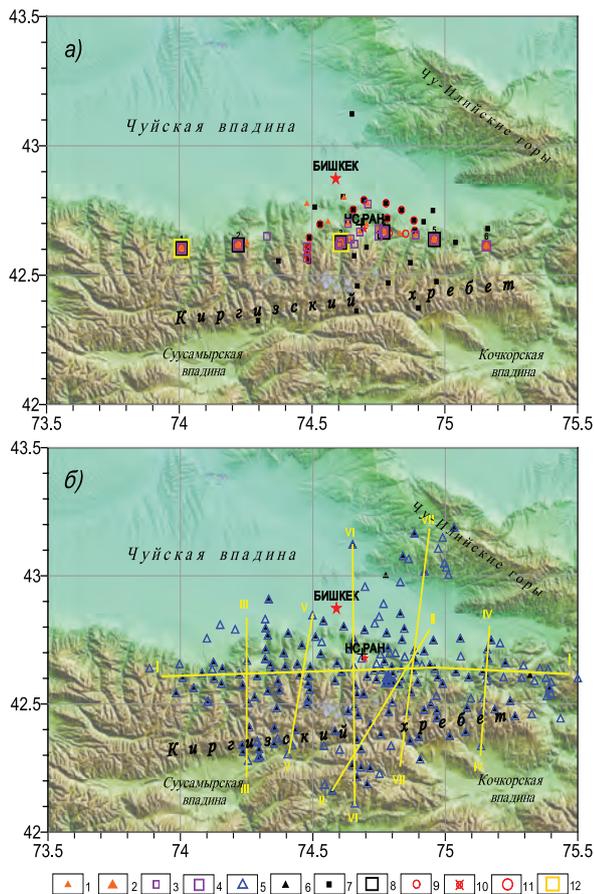


Рисунок 1 – Расположение пунктов сети электромагнитного мониторинга (по разным методам за весь период наблюдений) (а) и пунктов площадных исследований методами ЧЗ и ЗСД с указанием положения профилей, по которым построены геоэлектрические разрезы (б). Условные обозначения: 1, 3, 5, 7 – рядовые и 2, 4, 6, 8 – стационарные пункты режимных наблюдений методами ВЭЗ, ДЭЗ, ЧЗ, ЗСД соответственно (а); 5, 7 – точки зондирования методами ЧЗ и ЗСД при площадной съемке (б); 9 – положение питающего диполя АВ; 10, 11 – действующие пункты ЗСД-мониторинга: рядовые (10) и стационарные (11); 12 – пункты МТЗ-мониторинга

существенному увеличению территории, охваченной режимными наблюдениями (примерно в радиусе 60 км от НС РАН); стало возможным регулярное наблюдение за развитием деформационных процессов (через вариации ρ_k) не только по площади, но и по разрезу земной коры.

Эффективность разрешения геоэлектрического разреза при использовании методов ЧЗ и ЗСД в волновой зоне оказалась потенциально одинаковой, однако технологическая трудоемкость получения кривых ЧЗ, ввиду необходимости расчета

спектральных характеристик принятого сигнала и тока, была значительно больше, чем кривых ЗСД. К тому же большинство алгоритмов накопления, используемых в ЗСД, могло быть легко реализовано в реальном времени, т. е. получение кривой зондирования и оценка ее точности могли производиться непосредственно в пункте наблюдения. Следует добавить, что качество кривых ЗС при использовании накопления периодических последовательностей импульсов оказалось выше, чем кривых ЧЗ, получаемых при зондировании одиночными импульсами [1].

Для полноценного анализа наблюдаемых вариаций ρ_k на различных пунктах мониторинга потребовалось знание геоэлектрического строения всего полигона (примерно в радиусе 60 км от него). С этой целью на всей площади полигона в 1988–1990 гг. были проведены масштабные наблюдения на более чем 200 пунктах ЧЗ и более 100 пунктах ЗСД (рисунок 1б). По результатам интерпретации полученных данных были построены модели геоэлектрического строения полигона разного уровня детальности и оптимизирована сеть наблюдений для получения максимально возможной информации о геодинамическом процессе в наиболее интересных с сеймотектонической точки зрения геологических объектах [1].

На геоэлектрических разрезах проявились некоторые особенности строения Бишкекского геодинамического полигона: были выделены проводящие горизонты, относительно которых высказано предположение о том, что они, по всей видимости, играют существенную роль в пространственном распределении землетрясений и, соответственно, в развитии сейсмических процессов на рассматриваемой территории [2].

С учетом результатов площадных зондирований к концу 1991 г. сеть электромагнитных наблюдений насчитывала 6 стационарных и 28 рядовых пунктов, однако развал Советского Союза и последовавшее за ним резкое уменьшение объемов финансирования привели к значительному их сокращению: с 1992 г. и практически до настоящего времени в сеть наблюдений входят 6 стационарных и 14 рядовых пунктов ЗСД (рисунок 1а), включая организованные в 2002 г. 2 новых пункта с 4-мя приемными диполями, ориентированными по направлениям через 45 градусов с целью изучения проявлений анизотропии электрических характеристик земной коры в периоды сейсмической активизации региона [3].

Анализ данных многолетнего электромагнитного мониторинга на БПП показал, что контрастность изменений электрического сопротивления максимальна в глубоких горизонтах земной коры.

Выявленная особенность, вероятнее всего, определяется тем, что напряженно-деформационные процессы в глубинных горизонтах коры протекают наиболее интенсивно и, следовательно, источник, возбуждающий эти процессы, необходимо искать в низах коры [2].

Для изучения геодинамических процессов, протекающих в глубоких горизонтах земной коры, в 2003 г. в пределах Бишкекского полигона были установлены станции магнитотеллурического (МТ) мониторинга с использованием аппаратуры нового поколения Феникс MTU-5D (Канада) для регистрации полей естественного происхождения (рисунок 1а). Результаты сравнительного анализа материалов непрерывных МТ-наблюдений и режимных ЗСД уже за первые 3 года эксперимента подтвердили информативность электромагнитных полей естественного происхождения и возможность их применения для постоянного наблюдения за развитием геодинамических процессов в нижней части коры (глубина > 20 км) [4, 5].

В 2009–2010 гг. была проведена модернизация измерительного комплекса, используемого при ЗСД. В ближайшей перспективе стоят задачи постоянного усовершенствования всей системы электромагнитного мониторинга с целью повышения ее технических и эксплуатационных параметров, обеспечивающих качество научных исследований, а также продолжения работ по внедрению в технологию активного электромагнитного мониторинга земной коры шумоподобных сигналов (ШПС) [6].

Литература

1. Проявление геодинамических процессов в геофизических полях / А.М. Волыхин, В.Д. Брагин, А.В. Зубович и др. М.: Наука, 1993. 158 с.
2. Брагин В.Д. Активный электромагнитный мониторинг территории Бишкекского прогностического полигона: дис. ... канд. физ.-мат. наук / В.Д. Брагин. М., 2001. 135 с.
3. Мухамадеева В.А. Проявление анизотропии кажущегося удельного электрического сопротивления в пределах Бишкекского геодинамического полигона / В.А. Мухамадеева, В.Д. Брагин // Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: материалы V междунар. симп. 19–24 июня 2011 г. Бишкек, 2011. С. 72–79.
4. Batalev V. Magnetotelluric monitoring experiment in the Northern Tien Shan seismogenic zone: first results / A. Rybin, V. Batalev, L. Fox, A. Ingerov, G. Schelochkov // Вестник КPCY. 2006. № 3. С. 87–94.
5. 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.
6. Ильичев П.В. Технологические аспекты применения шумоподобных сигналов в системах активной геоэлектроразведки, математическое моделирование / П.В. Ильичев // Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: матер. V междунар. симп. 19–24 июня 2011 г. Бишкек, 2011. С. 165–178.