

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  $\rho_k$ . 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 диполю. 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 ГАЗ-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  $\rho_k$  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  $\rho_k$ , 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

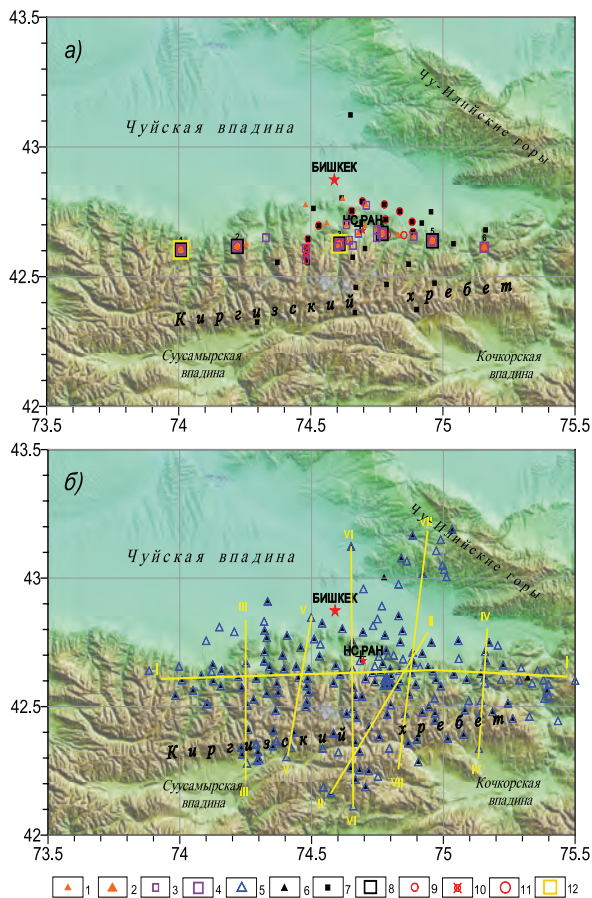


Рисунок 1 – Расположение пунктов сети электромагнитного мониторинга (по разным методам за весь период наблюдений) (а) и пунктов площадных исследований методами ЧЗ и ЗСД с указанием положения профилей, по которым построены геоэлектрические разрезы (б). Условные обозначения: 1, 3, 5, 7 – рядовые и 2, 4, 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  $\rho_k$ ) 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  $\rho_k$  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 КPCУ. 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.