

УДК 550.837: 550.343

ВАРИАЦИИ КАЖУЩЕГОСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В ПЕРИОД КИЗИЛЮРТОВСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 1999 г. В ДАГЕСТАНЕ

© 2013 г. Ш.Г. Идармачев¹, М.М. Алиев²

¹ *Институт геологии Дагестанского научного центра РАН, г. Махачкала, Россия*

² *Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН, г. Махачкала, Россия*

Рассматриваются результаты дипольного электрического зондирования Хадумского купола (Дагестан) в период Кизилюртовского землетрясения 31.01.1999 г. Перед основными толчками с магнитудами 5.7–4.6 зарегистрировано аномальное (на 85–20%) уменьшение кажущегося электрического сопротивления горных пород исследуемого массива, связанное с подготовкой разрывов в земной коре. Пространственное распределение эпицентров Кизилюртовского землетрясения и его афтершоков свидетельствует о связи этих событий с землетрясением 14.05.1970 г.

Сделано предположение о связи вариаций кажущегося сопротивления с процессом растяжения горных пород перед землетрясением, создающим электрический экран между питающим и приемным диполями установки электрического зондирования. Проведено лабораторное моделирование, подтвердившее экранирование поля.

Ключевые слова: очаг землетрясения, дипольное зондирование, афтершок, кажущееся электрическое сопротивление.

Введение

Чиркейская, Миатлинская и Кизилюртовская гидроэлектростанции, составляющие каскад Сулакских ГЭС, находятся в наиболее сейсмоопасной зоне Северного Кавказа – в области перехода горной части Дагестана в предгорную. В разные годы в этой зоне происходили сильные землетрясения (рис. 1). Река Сулак, на которой расположены названные гидроэлектростанции, протекает в глубоком каньоне с обрывистыми бортами. Она разделяет Гимринскую и Салатаускую антиклинали, образующие в рельефе одноименные хребты с высотными отметками от 2000 до 3000 м. Плотина самой крупной в каскаде Чиркейской ГЭС имеет высоту 232 м и преграждает реку Сулак в Чиркейском ущелье в зоне развития верхнемеловых известняков, образуя водохранилище объемом 2.9 км³. Три водохранилища Сулакского каскада располагаются в западной части афтершоковой области сильного землетрясения, произошедшего в регионе 14.05.1970 г. с $M=6.6$ [Арефьев, Стасюк, Ривера, 2004]. Направление разрывов двух первых сильных толчков этого землетрясения совпадают с Нараттюбинским разломом; третий вспорол земную кору в области под водохранилищем в направлении восток–запад.

При заполнении Чиркейского водохранилища был отмечен резкий рост числа слабых толчков [Идармачев и др., 1977]. Когда уровень воды превысил отметку 100 м относительно основания плотины, произошло несколько сильных землетрясений – Каранайский рой ($M=4.5$); Салатауское ($M=5.0$); Буйнакское ($M=5.2$). Район Чиркейского водохранилища до настоящего времени остается наиболее высокосейсмичным в Дагестане. Как показало произошедшее 31.01.1999 г. Кизилюртовское землетрясение ($M=5.7$), вероятность нового сильного события в районе весьма велика, в связи с чем изучение закономерностей проявления сейсмичности и выявление предвестников, позволяющих в перспективе предупреждать о возможной сейсмической катастрофе, снижая этим ее последствия, – важная исследовательская и прикладная задача.

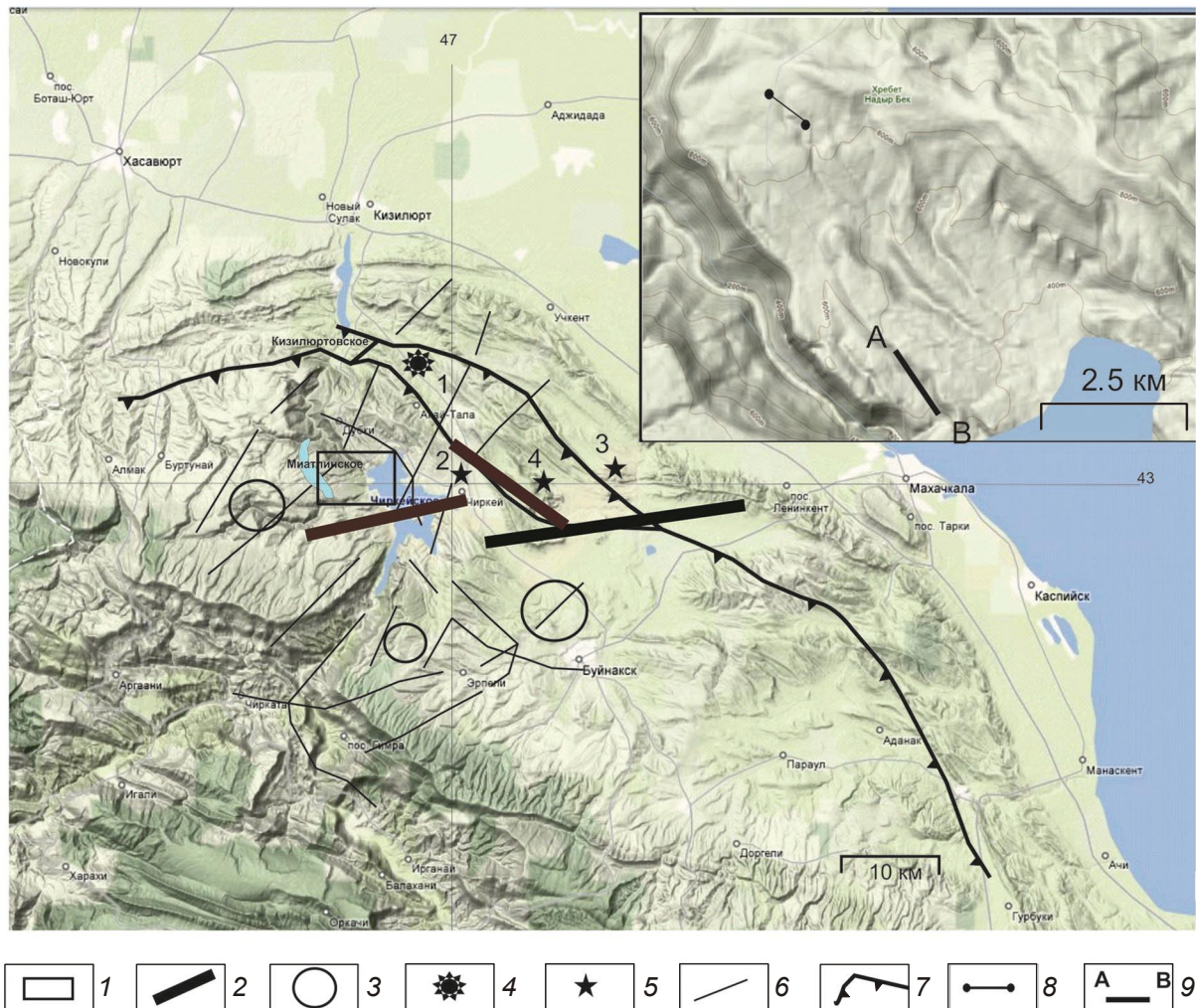


Рис. 1. Схема исследуемого региона с указанием положения очагов событий, описываемых в работе, и Хадумского купола, на котором выполнялось дипольное электрическое зондирование
 1 – границы исследуемого участка, включающего Хадумский купол; 2 – пространственное положение очагов землетрясения 14.05. 1970 г. ($M=6.6$); 3 – очаги землетрясений, произошедших в 1974–1975 гг. с $M \geq 5$ при заполнении Чиркейского водохранилища; 4 – эпицентр главного толчка Кизилортотского землетрясения 1999 г.; 5 – эпицентры трех сильных афтершоков Кизилортотского землетрясения (цифрами отмечена последовательность толчков); 6 – разломы, выявленные по космическим снимкам; 7 – Нараттубинский разлом. На врезке – расположение приемного (8) и питающего (9) диполей установки электрического зондирования, используемой при исследовании Хадумского купола

Методика эксперимента

Для анализа были использованы данные Дагестанского филиала Геофизической службы РАН [Общий ..., 2007] и результаты дипольного электрического зондирования, выполненного на Хадумском куполе одним из авторов данной статьи совместно с М.Г. Данияловым и Р.А. Левковичем [Даниялов, Идармачев, Левкович, 2006].

Хадумский купол расположен между Чиркейским и Миатлинским водохранилищами (см. рис. 1); высота купола от уровня моря – 900 м, от уровня водохранилища – 600 м. Зондирование осуществлялось на постоянном токе с использованием электрических диполей. Излучающий диполь длиной 700 м располагался в южной части основания купола; приемный длиной 150 м был закреплен на вершине купола в населенном пункте Дубки. Расстояние между диполями составляло 5.6 км (см. врезку на рис. 1).

Необходимость обеспечения точности повторных измерений ρ_k предъявляла к используемой аппаратуре особые требования. Для уменьшения утечек тока на электрических линиях провода диполей были подвешены на деревянных опорах с керамическими изоляторами. Для питающей линии использовался голый алюминиевый провод сечением 36 мм^2 , для приемной – бифилярный сталемедный геофизический провод марки ГПСМП с сопротивлением изоляции не менее 100 МОм . Два раза в месяц измерялись переходные сопротивления заземлений и сопротивления утечек линий. Переходные сопротивления заземлений диполей менялись в зависимости от времени года в пределах $400\text{--}550 \text{ Ом}$ для приемного и $10\text{--}15 \text{ Ом}$ для питающего; сопротивления утечек для первого составляли $60\text{--}80 \text{ МОм}$, для второго – $12\text{--}25 \text{ МОм}$.

Приемные электроды были изготовлены из свинцовых пластин размером $25 \times 25 \text{ см}$. Для уменьшения поляризационных эффектов места пайки провода к свинцовому электроду тщательно изолировались битумным покрытием. Электроды закладывались в землю на глубине около 1 м на “подушке” из бентонита; разность их поляризации не превышала 25 мВ . Азимут приемного диполя подбирался экспериментально по направлению максимального сигнала; уровень сигнала составлял 1.6 мВ .

Для питания излучающего диполя использовался генератор мощностью 25 кВт , состоящий из трехфазного развязывающего трансформатора, выпрямителя, инвертора тока и блока управления. Диполь заземлялся с помощью десяти металлических штырей, забитых в грунт. Сила тока в диполе составляла $20\text{--}25 \text{ А}$.

Блок управления позволял работать в двух режимах – ручном и автоматическом. В данной статье представлены результаты работы в ручном режиме.

Начатые $16.11.1998 \text{ г.}$ измерения по техническим причинам в период с $26.12.1998 \text{ г.}$ по $27.01.1999 \text{ г.}$ не выполнялись. До $31.01.1999 \text{ г.}$ измерения проводились через каждые $3\text{--}4$ дня, позже – во все рабочие дни. Зондирования начинались в 12 ч по сигналу точного времени радиостанции “Маяк”; длительность зондирования – 600 с ; интервал между переключениями тока – 12 с .

Для измерения разности потенциалов на приемной линии и калибровочном сопротивлении, включенном последовательно в цепь питающего диполя, использовались цифровые приборы Ц300 (класс точности $0.05/0.02$) с цифropечатающей приставкой, входное сопротивление которого на пределе 100 мВ составляло не менее 100 МОм . Калибровка измерительного прибора проводилась нормальным насыщенным элементом марки X480 (класс точности 0.005 при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$). Всего регистрировалось 50 знакопеременных импульсов прямоугольной формы без синхронизации между питающей и приемной станциями.

Обработка данных осуществлялась операторами вручную; вычислялись средние значения разности потенциалов на приемной линии U и тока питающего диполя I . Среднеквадратичные отклонения результатов измерений составляли $\pm(4.0\text{--}5.0)\%$ для U и $\pm(0.5\text{--}1.0)\%$ для I ; общая погрешность лежала в пределах $\pm(4.5\text{--}6.0)\%$.

Величина кажущегося сопротивления ρ_k вычислялась по известной формуле

$$\rho_k = k(U/I), \quad (1)$$

где k – геометрический коэффициент дипольной установки, зависящий от расстояния и азимутального угла между диполями. При неизменном положении диполей на местности коэффициент k постоянен, и в этом случае вариации ρ_k во временной развертке можно определить по изменению отношения U/I . В графическом виде результаты измерений представляются как отклонение ρ_k от его первоначального значения, выраженное в процентах: $(\rho_k^1 - \rho_k^i) / \rho_k^1 \cdot 100\%$, где ρ_k^1 – первое измерение, ρ_k^i – последующие измерения.

Обсуждение результатов

Графики кажущегося удельного электрического сопротивления горных пород Хадумского купола представлены на рис. 2. Над графиками стрелками отмечены моменты главного толчка Кизилюртовского землетрясения 1999 г. и трех его сильных афтершоков (положение эпицентров этих событий см. на рис. 1). За рассматриваемый период (с 01.11.1998 г. по 01.01.2000 г.) по имеющимся данным было зарегистрировано 700 повторных толчков с энергетическими классами $K \geq 6.0$ [Общий ..., 2007].

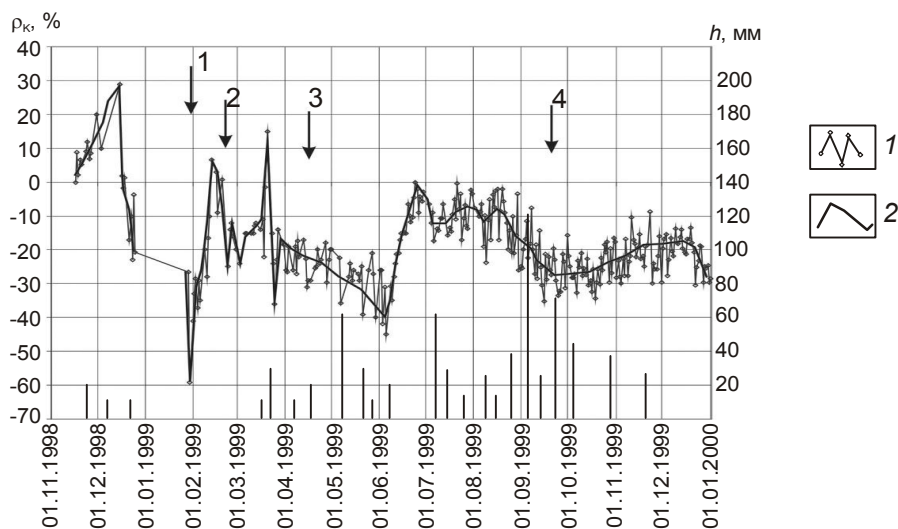


Рис. 2. Результаты дипольного электрического зондирования горных пород Хадумского купола за период с 01.11.1998 г. по 01.01.2000 г. Графики изменения во времени $(\rho_k^1 - \rho_k^i) / \rho_k^1 \cdot 100\%$ (левая вертикальная ось): *a* – реальная кривая; *b* – сглаженная. Стрелки над графиками – моменты главного толчка (1) и трех сильных афтершоков (2–4) Кизилюртовского землетрясения 1999 г.; вертикальные отрезки под графиками – количество атмосферных осадков h , мм (правая вертикальная ось)

На графике ρ_k (см. рис. 2) можно видеть, что перед главным толчком 1 Кизилюртовского землетрясения и тремя его афтершоками 2–4 происходило уменьшение измеряемого параметра; после этих событий наблюдается полное (или частичное) его восстановление. Обращает на себя внимание то, что промежуток времени от начала резкого спада ρ_k до момента толчка и продолжительность периода его восстановления для событий 1–4 различна (табл. 1).

Рассматривая пространственное распределение землетрясений, произошедших в исследуемом районе в разные годы, можно видеть, что очаг главного толчка 1 Кизилюртовского землетрясения 1999 г. не совпадает ни с одним из очагов более раннего землетрясения 14.05.1970 г. (см. рис. 1). При этом эпицентры афтершоков 2 и 4

Таблица 1. К анализу результатов дипольного электрического зондирования Хадумского купола до и после Кизилюртовского землетрясения 1999 г.

	Временной интервал от начала резкого спада ρ_k до момента толчка, сут	Длительность периода восстановления ρ_k , сут
Главный толчок 1	47	13
Афтершок 2	9	27
Афтершок 3	29	63
Афтершок 4	33	90

совпадают с эпицентрами основных толчков 1970 г., а эпицентр афтершока 3 лежит в его афтершоковой области.

Глубины залегания очагов основных толчков двух рассматриваемых землетрясений приведены в табл. 2. При их сравнении можно видеть, что гипоцентры трех толчков 1999 г. (главного толчка 1, афтершоков 2, 4) залегают глубже, чем очаги основных событий 1970 г. Это означает, что очаги событий 1970 г. находятся в пределах осадочно-го чехла исследуемого района, а событий 1999 г. – в кристаллическом фундаменте. Исключение составляет афтершок 3, очаг которого лежит на глубине 8 км в осадочном чехле.

Таблица 2. Глубина залегания очагов основных толчков землетрясений, произошедших в исследуемом районе в 1970 и 1999 гг.

Глубина залегания основных очагов землетрясения h , км		
1970 г.	1999 г.	
12–15	33	Главный толчок 1
	32	Афтершок 2
	8	Афтершок 3
	29	Афтершок 4

Амплитуды изменения ρ_k перед сильными толчками определялись по сглаженному графику (см. рис. 2) от начала уменьшения измеряемого параметра до момента толчка. Так, с 13.12.1988 г. по 28.01.1999 г., когда произошел главный толчок 1, значение ρ_k уменьшилось на 85%. Интересно, что непосредственно перед толчком 1 в течение суток – с 27 по 28.01.1999 г. – ρ_k скачком уменьшилось на 33%, после чего сначала также скачком повысилось на 31%, а затем плавно восстановилось до первоначального уровня.

После 12.02.1999 г. ρ_k снова начинает уменьшаться, и перед афтершоком 2 амплитуда его изменения составляют 30%. С 20.03.1999 г. наблюдается новый спад ρ_k . В течение трех суток перед афтершоком 3 ρ_k скачком уменьшается на 50%, затем за сутки увеличивается на 23%. После скачкообразных изменений в течение двух месяцев ρ_k плавно уменьшается на 23%.

Изменение ρ_k перед афтершоком 3 определено по амплитуде его восстановления за период 01–22.06.1999 г., так как скачкообразные изменения, предшествовавшие этому толчку, не позволяют уверенно определить амплитуду вариаций перед ним. Амплитуда вариаций ρ_k для периода восстановления составила 40%.

С 15.08.1999 г. наблюдается новое, происходящее без каких-либо скачков, уменьшение ρ_k , предшествующее афтершоку 4. Амплитуда изменения ρ_k от начала устойчивого снижения до момента толчка – 20%.

Известно, что не только тектонические деформации, но и экзогенные факторы могут оказывать существенное влияние на кажущееся электрическое сопротивление большого массива горных пород. В частности, причиной бухтообразных вариаций ρ_k могут быть атмосферные осадки, заметно влияющие на верхний слой земной коры [Сидорин, 1984]. Это влияние резко снижается с увеличением разностей диполей измерительной установки.

Как показывают результаты исследований на Гармском полигоне [Дещеревский, Журавлев, Сидорин, 1994], на больших разностях ($AB=5000$ м) сезонный ход ρ_k не превышает 4%; в весенние периоды изменения ρ_k амплитудой 1–2%, связаны с таянием снежного покрова [Сидорин, 1986].

Анализ связи между вариациями кажущегося сопротивления и атмосферных осадков был выполнен с привлечением данных о количестве последних из архива

метеообсерватории в г. Махачкала для ближайшей к Хадумскому куполу метеостанции, расположенной в 25 км от него. Наибольшее количество осадков выпало с августа по ноябрь 1999 г. (см. рис. 2). Связанный с ливнем максимум осадков ($h=123$ мм), пришедшийся на 05.09.1999 г., не повлиял на ход изменения ρ_k , уменьшение которого началось задолго до этого момента – 16.08.1999 г. Не произошло заметных изменений ρ_k и после 23.09.1999 г., когда был отмечен второй пик осадков ($h=65$ мм). Максимальные изменения ρ_k наблюдались с 01.11.1998 г. по 01.04.1999 г., в период выпадения наименьшего количества осадков, составившего в сумме 65 мм.

Сопоставление как скачкообразных, так и бухтообразных вариаций ρ_k , прослеживаемых на рис. 2, с динамикой выпавших в виде интенсивных дождей атмосферных осадков не дает оснований для выявления значимой связи между ними.

Бухтообразное уменьшение ρ_k перед сильными толчками 1999 г. составляло 85% для главного толчка 1 ($M=5.7$); 30% для афтершока 2 ($M=5.0$); 40% для афтершока 3 ($M=4.8$); 20% для афтершока 4 ($M=4.6$). С учетом восстановления ρ_k после каждого из этих спадов можно сделать вывод о связи вариаций кажущегося электрического сопротивления с процессами, происходящими в области очагов рассматриваемых событий как на этапе подготовки вспарывания земной коры, так и на этапе сброса упругих напряжений. Основанием для такого вывода служит и то, что гипоцентры четырех рассматриваемых толчков находятся на глубинах 33, 32, 8, 29 км и удалены от пункта наблюдения на 36, 33, 27, 33 км, т.е. их очаги располагаются практически под наблюдательным пунктом. Следовательно, эти толчки могут вызвать в окрестности пункта наблюдения деформацию горных пород, пропорциональную магнитуде землетрясения.

Прослеженные экспериментально вариации электрического сопротивления массива горных пород Хадумского купола перед землетрясениями 1999 г. позволяют оценить коэффициент тензочувствительности электрического сопротивления горных пород T (табл. 3).

Для оценки относительной деформации от очага землетрясения применяется формула

$$\Delta\varepsilon/\varepsilon = 10^{0.37M-6.89} / r^{0.85}, \quad (2)$$

где M – магнитуда землетрясения; r – радиус деформации, км [Зубков, 1993]. Нами использовались гипоцентральные расстояния, т.е. учитывалась глубина залегания каждого из очагов.

Коэффициент тензочувствительности T определялся по формуле:

$$T = (\Delta\rho_k/\rho_k)/(\Delta\varepsilon/\varepsilon). \quad (3)$$

Таблица 3. Относительная деформации $\Delta\varepsilon/\varepsilon$ и коэффициенты тензочувствительности T , вычисленные по экспериментальным данным об электрическом сопротивлении пород исследуемого региона (M – магнитуда землетрясения, r – радиус деформации, км)

События 1999 г.	M	r , км	$\Delta\rho_k/\rho_k$	$\Delta\varepsilon/\varepsilon$	T
Главный толчок 1	5.7	36	0.85	$7.8 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^6$
Афтершок 2	5.0	33	0.30	$5.0 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^5$
Афтершок 3	4.8	27	0.40	$4.4 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^5$
Афтершок 4	4.6	33	0.20	$3.1 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^5$

Результаты расчетов позволяют сделать вывод о том, что коэффициент тензочувствительности массива горных пород Хадумского купола по электрическому сопротивлению составляет в среднем $0.77 \cdot 10^6$. Природа такой чувствительности пока не ясна, однако понятно, что наблюдаемые изменения удельного электрического сопротивления в реальной среде не могут быть следствием деформации, тем более в упругом режиме.

Можно только предположить, что вариации ρ_k связаны со сжатием–растяжением трещинных зон вертикального простирания, секущих Хадумский купол, которые могут быть “природными усилителями” изменения ρ_k вследствие деформации.

Хадумский купол сложен в основном высокоомными ($\rho_k=900$ Ом·м) карбонатными породами, что подтверждает обезвоженность пород, расположенных выше уровня водохранилища. По всему диаметру купола нет воды в оврагах, которые высыхают сразу же после дождя. Из-за отсутствия грунтовых вод п. Дубки, расположенный на вершине купола, снабжается водой из Чиркейского водохранилища.

Сжатие–растяжение вертикальных трещинных зон может вызвать изменение площади контакта блоков в зоне между питающим и приемным диполями, создавая слои, изолирующие электрическое поле. При отсутствии воды в трещинах воздушные прослойки между питающим и приемным диполями могут служить своего рода изоляторами. Заполнение трещинных зон водой также приводит к уменьшению ρ_k массива в результате экранирования поля питающего диполя. Так, например, в период после наполнения Чиркейского водохранилища 1976–1977 гг. проводились наблюдения за изменением массива горных пород, расположенного под водохранилищем. Полученные результаты показали, что вода из водохранилища фильтруется в окружающий массив по трещинным зонам; при этом фильтрация меняется как во времени, так и в пространстве в зависимости от активности тектонического процесса, вызывающего сжатие–растяжение трещинных зон. В отдельных случаях вариации ρ_k составили от 29% до 40% [Идармачев, Арефьев, 2009].

Заполнение трещин газом также может привести к значительному изменению ρ_k массива пород. Например, после произошедшего на нефтегазовом месторождении в Узбекистане Газлийского землетрясения 08.04.1976 г. в его эпицентральной зоне перед афтершоком с $M=5.0$ дипольной установкой было зарегистрировано скачкообразное уменьшение кажущегося сопротивления на 57% [Электрические..., 1983]. Длительность аномалии ρ_k при этом составила 14 ч. Спустя 30 ч рядом с первым произошел второй толчок такого же энергетического класса, но аномалий ρ_k при этом зарегистрировано не было. Сказанное убеждает нас в том, что аномалии ρ_k связаны с раскрытием трещинных зон в земной коре, экранирующих поле питающего диполя. Процессы раскрытия трещин могут сопровождаться выбросами газа на поверхность. Так, во время сильных землетрясений в Каспийском регионе в ноябре–декабре 2000 г. ($M=6.8, 6.4, 7.4$) установкой вертикального электрического зондирования на Дмитровском нефтегазовом месторождении в Дагестане были зарегистрированы импульсные изменения ρ_k на 11–14%. В этом случае природа увеличения ρ_k связывается с прохождением газа через водонасыщенные рыхлые отложения. Замещение поровой воды газом способно вызвать десятикратное увеличение ρ_k пласта [Электроразведка, 1980].

Субвертикальные трещинные зоны в земной коре могут рассматриваться как геоэлектрические аномалии, если их удельное электрическое сопротивление контрастно отличается от удельного сопротивления вмещающей среды. Расположение такой зоны между питающим и приемным диполями должно приводить к уменьшению ρ_k вследствие экранирования поля питающего диполя [Алелов, Любошиц, 1981].

Для объяснения полученных в районе Чиркейского водохранилища результатов дипольного зондирования [Идармачев, Арефьев, 2009] нами было выполнено моделирование для вертикального пласта с удельным сопротивлением, в 10 раз меньшим по сравнению с удельным сопротивлением окружающей среды. Вертикальный пласт располагался перпендикулярно оси дипольной установки и имел бесконечное простирание. Для случая, когда пласт располагался посередине между диполями, амплитуда уменьшения ρ_k составляла 47%–70% и слабо зависела от толщины самого пласта – например, при сжатии пласта в 50 раз $\Delta\rho_k/\rho_k$ менялось в 1.6 раза [Идармачев, 2007].

Несмотря на свою привлекательность, модели, допускающие обводнение горных пород, в нашем случае вряд ли могут рассматриваться, так как исследуемый Хадумский купол сложен сухими породами верхнего и нижнего мела мощностью 450–500 м, о чем свидетельствует его высокоомный разрез. Наличие трещинных зон между питающим и приемным диполями установлено по результатам геологического обследования местности. Было выявлено несколько взбросов, ориентированных перпендикулярно оси дипольной установки; кроме того, был прослежен разлом, совпадающий с направлением трещинных зон и секущий купол примерно посередине (см. рис. 1).

Для проверки предположения о том, что основной причиной наблюдаемых аномалий ρ_k может быть растяжение трещинных зон купола в поле меняющихся тектонических напряжений в период подготовки очагов землетрясений, приводящее к экранированию поля питающего диполя, было выполнено моделирование дипольного зондирования в лабораторных условиях. Использовалась пластмассовая ванна размером 65×42×30 см, наполненная водой с удельным электрическим сопротивлением 800–900 Ом·м. Дипольная установка состояла из питающего диполя $AB=3.5$ см и приемного диполя $MN=1.5$ см; расстояние между диполями – 20 см. Электроды, изготовленные из луженого медного провода диаметром 1 мм, погружались в воду на 1 см.

Измерения выполнялись с помощью специальной станции “Георезистор” [Идармачев и др., 2001], генератор которой преобразовывал постоянный ток в разнополярные импульсы прямоугольной формы с частотой переключения 10 с. Амплитуды тока питающего диполя и разности потенциалов на приемном диполе измерялись 24-разрядным АЦП, сопряженным с компьютером. Продолжительность одного сеанса измерений ρ_k составляла 10 мин, обеспечивая погрешность последующих измерений относительно первоначального значения в пределах $\pm 0.1\%$.

Сначала измерения ρ_k выполнялись без экрана. Затем посередине между питающим и приемным диполями перпендикулярно оси установки помещался непроводящий экран – лист стеклотекстолита размером 22×15 см. Измерения выполнялись при разной глубине погружения экрана (1, 2, 4, 6, 8 см) для двух видов установки – осевой и азимутальной. В первом случае питающий и приемный диполи были направлены вдоль соединяющей их оси; во втором располагались перпендикулярно оси.

На рис. 3 приведены результаты измерений для различного погружения экрана в безразмерных величинах h/r ; рядом с точками замеров показаны относительные значения $(\Delta\rho_k/\rho_k)\%$. Можно видеть, что чувствительность осевой дипольной установки

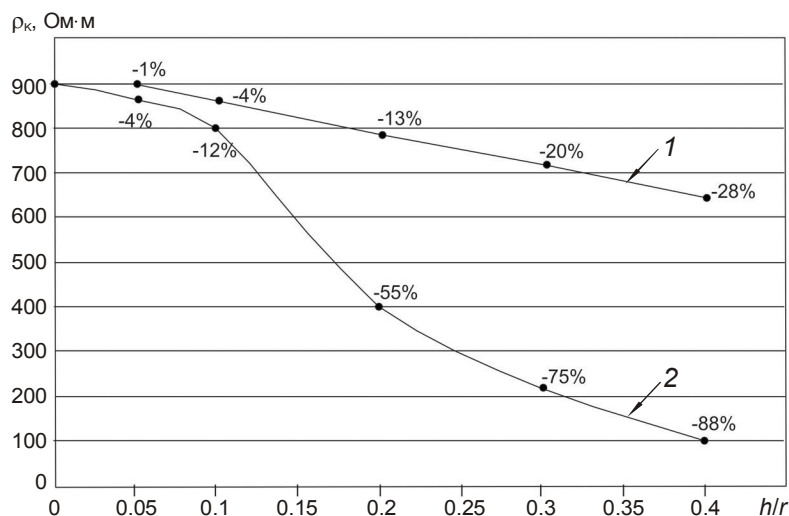


Рис. 3. Результаты измерений при моделировании дипольного зондирования для азимутальной (1) и осевой (2) установок (описание см. в тексте)

к непроводящему экрану в три раза выше, чем азимутальной. Максимальное изменение ρ_k (на 88%) для осевой установки достигается при глубине экрана, составляющей 0.4 разности диполей.

Для измерения ρ_k пород Хадумского купола использовалась осевая установка, максимально чувствительная к наличию вертикального экрана, которым в данном случае были секущие купол трещинные зоны вертикального простирания.

Таким образом, данные лабораторного моделирования подтверждают возможность возникновения экранирующего эффекта в результате растяжения трещинных зон, секущих купол.

Выводы

Перед главным толчком Кизилюртовского землетрясения 1999 г. ($M=5.7$) впервые в практике электромагнитных исследований горных пород на сейсмопрогностических полигонах при эпицентральной дистанции, сравнимом с длиной разрыва очага ($L=16.6$ км), зарегистрировано уменьшение кажущегося удельного электрического сопротивления ρ_k с максимальной амплитудой $85\pm 6\%$. Перед тремя последующими сильными толчками – афтершоками с $M=5.0$, 4.8 и 4.6 – также наблюдалось уменьшение ρ_k на $30\pm 6\%$, $40\pm 6\%$ и $20\pm 6\%$ соответственно.

Тензочувствительность массива горных пород в районе Хадумского купола по ρ_k , определенная по результатам дипольного зондирования во время названного землетрясения, составляет $6 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^6$. Для объяснения столь высокого значения коэффициента T предлагается модель, связанная с раскрытием субвертикальных трещинных зон – при растяжении земной коры трещины раскрываются, формируя зону, экранирующую поле питающего диполя, в результате чего происходит уменьшение ρ_k . Предлагаемый механизм подтверждается лабораторными экспериментами.

Главный толчок Кизилюртовского землетрясения 1999 г. с $M=5.7$ произошел в северо-восточной окрестности более раннего сильного землетрясения 14.05.1970 г. Это дает основание полагать, что снятие упругих напряжений в зоне разлома после землетрясения 1970 г. вызвало концентрацию напряжений в северной узловой части разломной зоны, имеющей форму, похожую на параллелограмм. Положение эпицентров толчков 1–4 землетрясения 1999 г. в афтершоковой области событий 1970 г. свидетельствует о наличии связи между двумя этими землетрясениями.

Механизм повторных толчков в области очагов землетрясения 1970 г. может быть триггерным, т.е. главный толчок землетрясения 1999 г. в результате встряски земной коры способствовал разрядке упругих напряжений, которые оставались в коре очаговой области после землетрясения 1970 г. или же накопились там за 28 лет между двумя сильными событиями.

Литература

- Алелов Ю.А., Любошиц В.М. Об одном из электрических предвестников землетрясений // Физика Земли. 1981. № 10. С.103–107.
- Арефьев С.С., Стасюк Е.И., Ривера Л. Модель очага Дагестанского землетрясения 1970 г. // Физика Земли. 2004. № 2. С.15–27.
- Даниялов М.Г., Идармачев Ш.Г., Левкович Р.А. Вариации кажущегося сопротивления горных пород в связи с сейсмичностью территории Дагестана // Вестник Дагестанского научного центра РАН. 2006. № 25. С.17–20.
- Децеровский А.В., Журавлев В.И., Сидорин А.Я. Сезонные вариации кажущегося сопротивления на Гармском прогностическом полигоне. Изучение природы вариаций геофизических полей. М.: ОИФЗ РАН, 1994. С.60–78.

- Зубков С.И. О краткосрочных предвестниках землетрясений // Физика Земли. 1993. № 9. С.67–70.
- Идармачев Ш.Г., Левкович Р.А., Арефьев С.С., Дейнега Г.И. Изменение некоторых характеристик сейсмичности района Чиркейской ГЭС в период его заполнения. Сейсмический режим территории Дагестана. Махачкала: Ин-т геол. Дагестанского филиал АН СССР, 1977. Вып. 1. С.3–9.
- Идармачев Ш.Г., Алиев М.М., Абдулаев Ш-С.О., Хаджи Б.А. Станция для электрического зондирования “Теорезистор” // Современная геодинамика, глубинное строение и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов: Материалы Междунар. конф. Воронеж. 2001. С.86–87.
- Идармачев Ш.Г., Арефьев С.С. Результаты дипольного электрического зондирования в районе Чиркейского водохранилища после его заполнения // Физика Земли. 2009. № 9. С.75–85.
- Идармачев Ш.Г. Исследование геоэлектрической модели очага землетрясения // Сейсмический мониторинг и изучение геодинамики территории Дагестана и акватории Среднего Каспия. Тр. Дагестанского ФГС РАН. 2007. № 1. С.149–159.
- Общий каталог землетрясений на территории Дагестана. Махачкала: Эпоха, 2007. 393 с.
- Электрические и магнитные предвестники землетрясений. Ташкент: Изд-во “ФАН”, 1983. 133 с.
- Сидорин А.Я. Вариации электрического сопротивления верхнего слоя земной коры // Докл. АН СССР. 1984. Т. 278, № 2. С.330–334.
- Сидорин А.Я. Результаты прецизионных наблюдений за вариациями кажущегося сопротивления на Гармском полигоне // Докл. АН СССР. 1986. Т. 290, № 1. С.81–84.
- Электроразведка. М.: Недра, 1980. 517 с.

Сведения об авторах

ИДАРМАЧЕВ Шамиль Гасанович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии Дагестанского научного центра РАН. 367030, г. Махачкала, ул. Ярагского, д. 75. Тел.: +8(722)629395. сот. 79604082190. E-mail: idarmachev@yandex.ru

АЛИЕВ Магомед Махачевич – старший научный сотрудник, Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН. 367030, г. Махачкала, ул. Шамиля, д. 39. Тел.: +8(772)629357. E-mail: mm_aliev@rambler.ru

VARIATIONS OF APPARENT ELECTRIC ROCK RESISTIVITY DURING THE KIZILYURT EARTHQUAKE OF 1999 IN DAGESTAN

Sh.G. Idarmachev¹, M.M. Aliev²

¹ *Institute of Geology, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia*

² *Institute for Geothermal Problems of the Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia*

Abstract. We consider the dipole electric sounding data on the Khadum dome during the Kizilyurt earthquake, which occurred January 31, 1999. Before the major thrusts in the magnitude range of 5.7–4.6 an anomalous 85–20% decrease of the apparent resistivity of the rock mass, associated with the preparation for ruptures in the crust, was detected. Spatial distribution of epicenters of the Kizilyurt earthquake and its aftershocks confirms their connection to the earthquake of May 14, 1970. It is suggested that variations in apparent resistivity resulted from rock extension before the earthquake, which creates an electric screen between the supply and receiving dipoles of the sounding system. A laboratory simulation, which confirms the process of screening of the field, was conducted.

Keywords: earthquake, dipole sounding, aftershock, apparent electric resistance.