

УДК 550.837:550.343

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИПОЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ХАДУМСКОГО КУПОЛА В ПЕРИОД КИЗИЛЮРТОВСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 1999 г. В ДАГЕСТАНЕ

© 2012 Ш. Г. Идармачев<sup>1</sup>, д.ф.-м.н., М. М. Алиев<sup>2</sup>, А. Ш. Идармачев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии Дагестанского научного центра РАН, Россия, 367030, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, 75, e-mail: idarmachev@yandex.ru

<sup>2</sup> Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН, Россия, 367030, Республика Дагестан, г. Махачкала, просп. и. Шамиля, д. 39а

Рассматриваются данные дипольного электрического зондирования Хадумского купола, расположенного в центре Сулакского каскада ГЭС в период сильного землетрясения в Дагестане, происшедшего 31 января 1999 г. Пространственное распределение эпицентров данного землетрясения показывает наличие связи его афтершоков с сильным землетрясением 14 мая 1970 г. Перед всеми основными толчками в интервале магнитуд 5,7–4,6 зарегистрированы аномальные уменьшения кажущегося электрического сопротивления массива горных пород на 85–20%, связанные с подготовкой к разрывам в земной коре.

**Ключевые слова:** дипольное электрическое зондирование, эпицентр землетрясения, кажущееся электрическое сопротивление, афтершок

### Введение

Каскад Сулакских ГЭС, состоящий из Чиркейской, Миатлинской и Кизилюртовской, располагается в наиболее сейсмоопасной зоне Северного Кавказа в полосе перехода горной части Дагестана в предгорную, где в ретроспективный период располагались очаги сильных землетрясений (рис. 1). Самая крупная из них – Чиркейская ГЭС. Река Сулак разделяет здесь Гимринскую и Салатаускую антиклинали, образующие в рельефе одноименные хребты с высотными отметками от 2000 до 3000 м и протекает в глубоком каньоне с обрывистыми бортами. Плотина ГЭС высотой 232 м преграждает реку Сулак в Чиркейском ущелье, в зоне развития верхнемеловых известняков и образует водохранилище объемом 2,9 км<sup>3</sup>. Все три водохранилища располагаются в западной части афтершоковой области сильного землетрясения, происшедшего 14 мая 1970 г. с магнитудой 6,6 [Арефьев, Стасюк, Ривера, 2004]. Направления разрывов первых двух сильных толчков совпадают с Наратюбинским разломом. Третий по величине разрыв вспорол земную кору в области под водохранилищем в направлении В – З. Западная часть афтершоковой зоны заполнила всю область под водохранилищем.

При заполнении Чиркейского водохранилища было отмечено резкое увеличение числа слабых толчков [Идармачев, 1977], а затем, при превышении уровня воды 100 м относительно основания плотины ГЭС, произошло несколько весьма сильных землетрясений, которые получили названия «Каранайский рой», «Салатауское» и «Буйнакское» землетрясения с магнитудами 4,5, 5,0 и 5,2 соответственно [Асманов и др., 1976; Левкович, 1977].

Район Чиркейского водохранилища до настоящего времени является наиболее высокосейсмичным районом Дагестана. Как показало сейсмическое событие с магнитудой  $M=5,7$ , произошедшее 31 января 1999 г., опасность возникновения нового сильного землетрясения в районе весьма велика. Поэтому изучение закономерностей поведения сейсмичности, а также выявление предвестников, позволяющих в перспективе предупреждать о возможной сейсмической катастрофе и тем самым снизить ее последствия, представляется важной исследовательской и прикладной задачей.

### Исходные данные и методика наблюдений

Для анализа использовались данные Дагестанского филиала Геофизической службы РАН [Общий каталог..., 2007] и дипольного электрического зондирования Хадумского купола [Даниялов, Идармачев, Левкович, 2006].

Район исследований, Хадумский купол, расположен между Чиркейским и Митатлинским водохранилищами (рис. 1). Высотная отметка его равна 900 м от уровня моря или же 600 м от уровня водохранилища. Зондирование осуществляется на постоянном токе с использованием электрических диполей. Излучающий диполь длиной 700 м располагается в южной части основания купола, а приемный диполь длиной 150 м закреплен в населенном пункте Дубки, который находится на его вершине. Для электрической линии, соединяющей приемные электроды с цифровым вольтметром, используется бифилярный геофизический провод сопротивлением изоляции 100 мОм, подвешенный на столбах. Приемные электроды, состоящие из свинцовых пластин, закопаны в земле на глубине 1 м. Разность поляризации электродов не превышает  $U=25$  мВ. Расстояние между излучающим и приемным диполями равно 5,6 км. Излучающий диполь питает генератор мощностью 25 кВт. В землю при помощи электрической линии, концы которой соединены с десятью металлическими штырями забитыми в грунт, пропускают ток  $I=20-25$  А в виде серии из 50 знакопеременных импульсов прямоугольной формы. Для исключения возможных утечек тока линия подвешена на столбах с изоляторами. Одновременно на питающей и приемной станциях производится запись импульсов, а затем определяется среднее значение величины тока в питающей линии  $I$  и разности потенциалов на приемной линии  $U$ . Для измерений используются цифровые вольтметры класса точности  $\pm 2\%$ . Величина кажущегося удельного электрического сопротивления горных пород определяется по формуле:

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

где  $k$  – геометрический коэффициент дипольной установки, зависящий от расстояния и азимутального угла между диполями,  $U$  – разность потенциалов на приемном диполе в вольтах,  $I$  – сила тока в излучающем диполе в амперах.

При неизменных расположениях диполей на местности коэффициент  $k = \text{const}$ , тогда вариации  $\rho_k$  во временной развертке можно определить по изменению отношения  $U/I$ . Среднеквадратичное отклонение результатов измерений не превышает  $\pm 5-6\%$ .

В графическом виде результаты измерений представляются как отклонение, выраженное в процентах относительно первоначально измеренного значения, т.е.  $(\rho_k^1 - \rho_k^i) / \rho_k^1 \times 100\%$ . Измерения были начаты 16.11.1998 г. Для периода 26.12.1998–27.01.1999 гг. измерения не производились по техническим причинам.

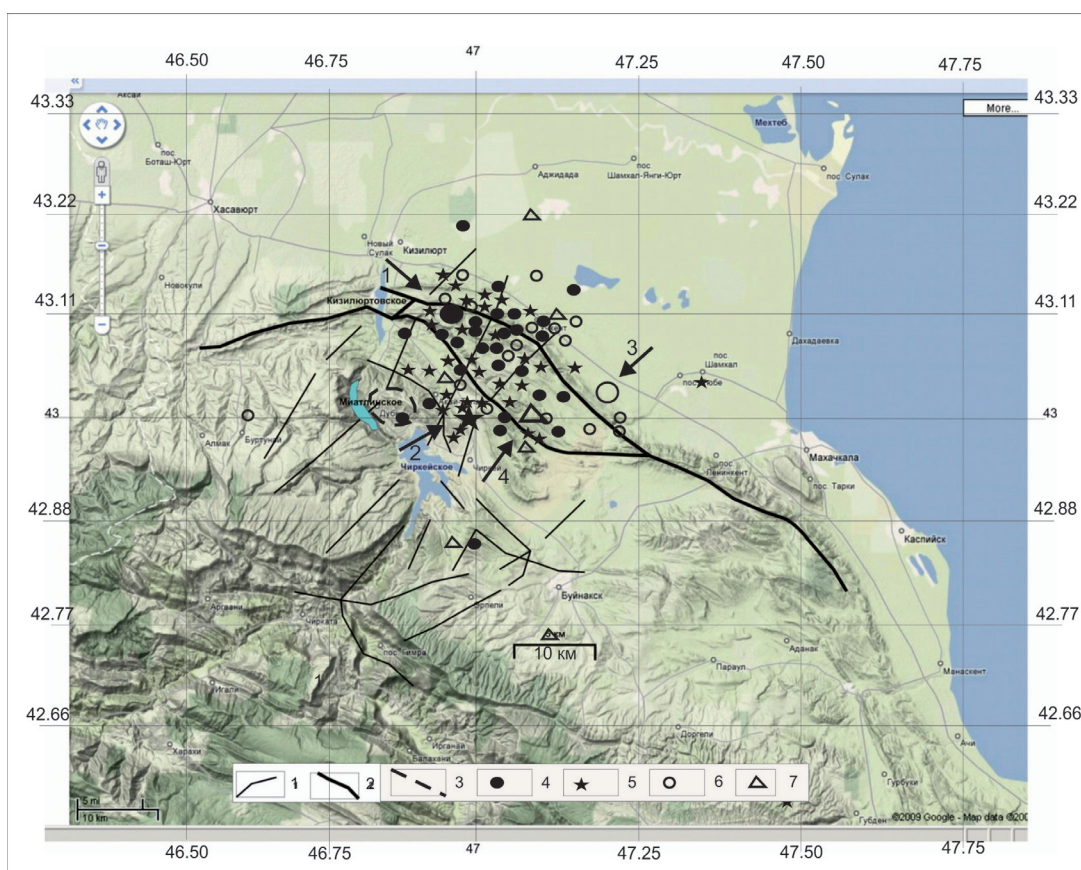


Рис. 1. Расположение Хадумского купола и эпицентров землетрясений 1999 г.: 1 – разломы, выявленные по космоснимкам; 2 – Нараттубинский разлом; 3 – Хадумский купол; 4 – очаг и афтершоки первого толчка; 5 – то же для второго толчка; 6 – то же для третьего толчка; 7 – то же для четвертого толчка

### Обсуждение результатов

На рис. 2 представлен график реальных измерений  $\rho_k$  (а) и его сглаженного вида (б). На нем также отмечены времена четырех сильных толчков Кизилортовского землетрясения. По данным [Общий каталог..., 2007], всего за год, было зарегистрировано 700 повторных толчков с энергетическими классами  $K \geq 6,0$ , где  $K = \lg E$  (Дж). На рис. 2 можно видеть бухтообразное уменьшение  $\rho_k$  перед каждым сильным толчком, а после, наблюдается полное или частичное восстановление, при этом, длительности этих периодов разные, например, для 1-го и 2-го толчков они составляют 13 и 27 суток соответственно, а для 3 и 4 – 63 и 90 суток. Это позволило предположить наличие нескольких основных толчков со своими афтершоками, проработка которых приводит к снятию упругих напряжений в различных зонах исследуемой области.

На рис. 3 показана карта эпицентров, построенная для землетрясений, начиная с  $K \geq 10$ . Это было сделано потому, что учет всех слабых толчков привел бы к заполнению всего пространства между 4 основными толчками и облако эпицентров размывало бы всю пространственную картину. В энергетическом плане слабые землетрясения не вносят существенного вклада в общую картину, т.к. энергия толчков  $K=6-7$  в 10000–1000 раз ниже, чем для землетрясения  $K=10$ . Поэтому такой подход к построению карты эпицентров позволяет получить более наглядную картину их распределения на исследуемой нами площади. На карте эпицентров основ-

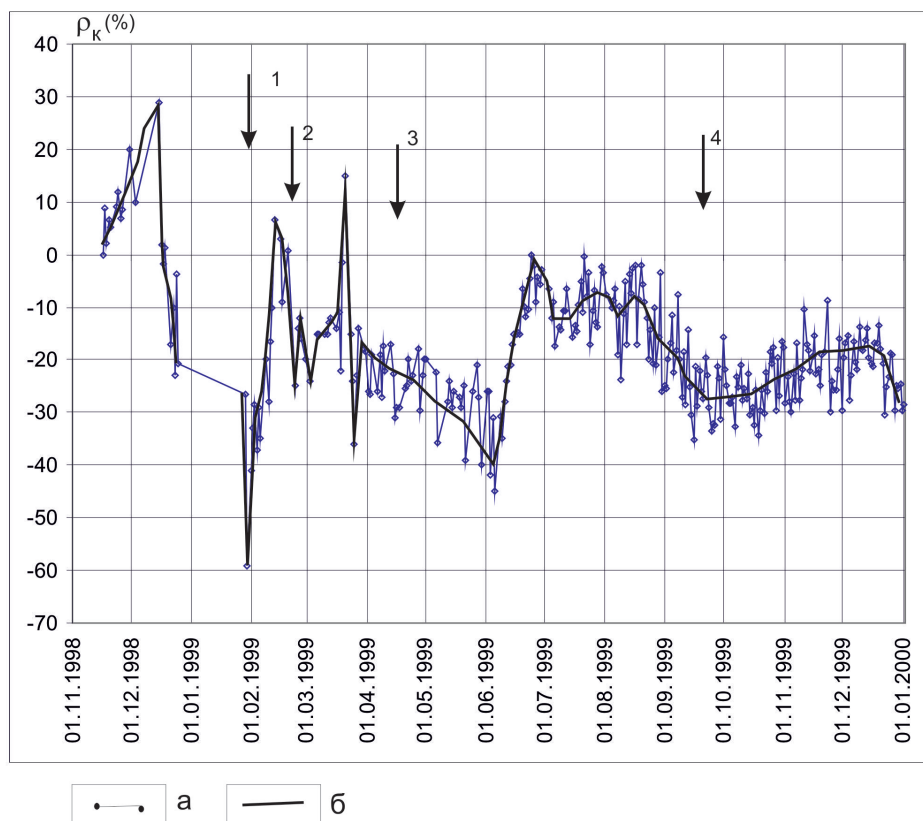


Рис. 2. Графики кажущегося удельного электрического сопротивления горных пород Хадумского купола: а – реальная кривая; б – сглаженная

ные толчки показаны стрелками, в их последовательности соответствующей рис. 2, при этом для каждого из них показано также пространственное распределение афтершоков.

После первого землетрясения в ближайшей окрестности в течении суток произошло 78 толчков, из них 14  $K \geq 10$ . Последующие 12 суток афтершоки мигрировали в юго-восточном направлении от эпицентра 1-го толчка. Все три повторные сильные толчки отстоят от основного первого толчка на расстояниях 13–22 км. Расстояния между толчками 2, 3 и 4 составляют 7–8 км.

Второму толчку произошедшему 21.02.1999 предшествует практически скачкообразное уменьшение  $\rho_k$  на 28%. В течении первого часа число афтершоков  $K \geq 10$  составляет 7, при этом эпицентры концентрируются вокруг второго землетрясения.

В последующем афтершоки мигрируют в северном направлении и сливаются с афтершоками первого землетрясения.

Отличительной чертой для периодов, когда произошли 3 и 4 толчки, является большая продолжительность бухтообразного уменьшения  $\rho_k$ , малое число повторных толчков. Так, например, для 3 и 4 землетрясений число толчков  $K \geq 10$  составляет 15 и 3 соответственно. В отличие от первых двух случаев повторные толчки не концентрируются вокруг эпицентров 3 и 4 землетрясений, а сливаются с большей частью афтершоковой области 1 и 2 землетрясений.

Сравнивая пространственное расположение эпицентров на рис. 1 и 3 видно, что первое землетрясение 31.01.1999 г. располагается вблизи Кизилюртовского водохранилища и не совпадает ни с одним из очагов землетрясений 14 мая 1970 г., а афтершоковые области сливаются только частично. Эпицентры остальных земле-



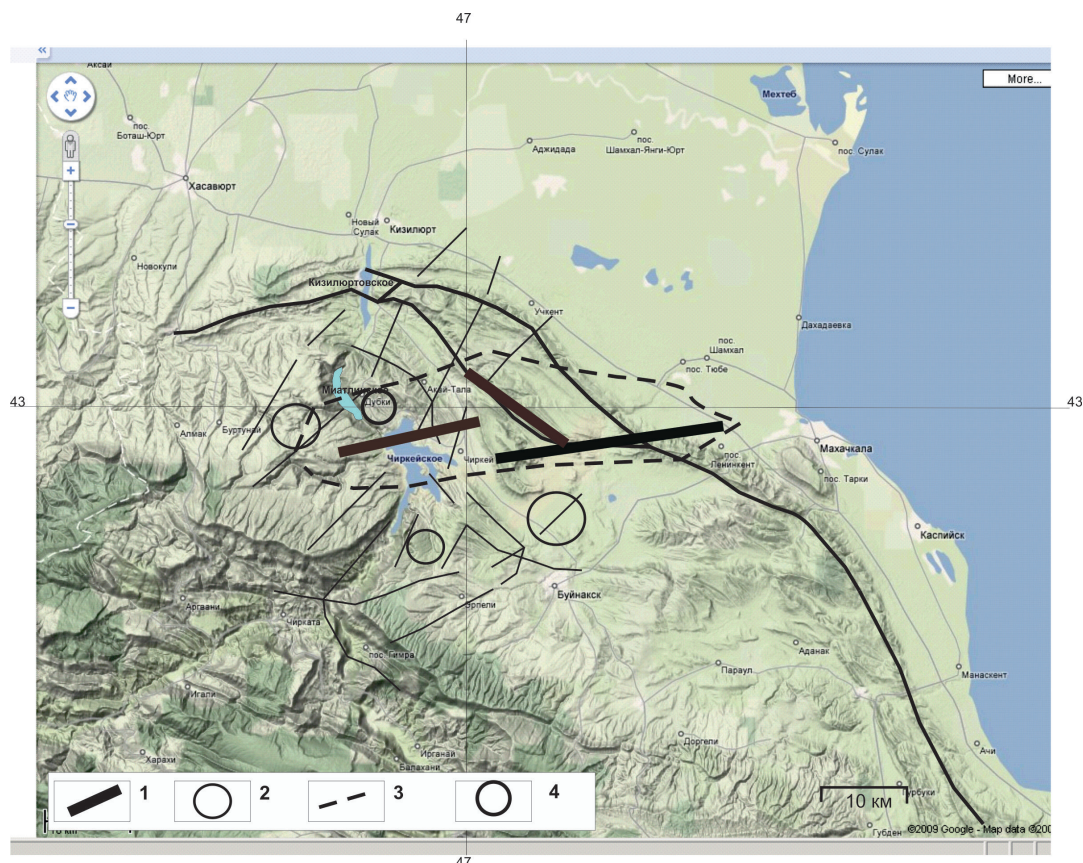


Рис. 3. Расположение основных очагов землетрясения 1970 г. (1), очаги землетрясений, происшедших в период заполнения Чиркейского водохранилища (2), контуры афтершоковой области землетрясения 1970 г. (3), место расположения дипольной установки электрического зондирования (4)

трясений располагаются в области афтершоков землетрясения 1970 г., при этом, 2 и 4 толчки землетрясения 1999 г. совпадают с основными толчками землетрясения 1970 г., а 3 толчок располагается в его афтершоковой области.

Землетрясения 1999 г. отличаются от основных очагов землетрясения 1970 г. большими глубинами гипоцентров, например, глубины расположения очагов 1, 2, и 4 толчков составляют 33, 32 и 29 км, в то время как глубины основных очагов землетрясения 1970 г. лежат в пределах 12–15 км, т.е. первые лежат в кристаллическом фундаменте, а последние находятся в пределах осадочного чехла исследуемого района. Только 3 землетрясение 1999 г. имеет глубину 8 км и лежит в осадочном чехле.

Бухтообразные уменьшения  $\rho_k$  перед всеми наблюдаемыми сильными толчками землетрясений 1999 г.  $M=5,7, 5,0, 4,8$  и  $4,6$  на 85%, 30%, 40% и 20%, а также восстановления после афтершоковых периодов каждого из них позволяют сделать вывод о связи вариаций  $\rho_k$  с процессами, происходящими в области очагов этих землетрясений, как в периоды их подготовок к процессам вспарывания земной коры, так и сброса упругих напряжений в афтершоковые периоды. Основанием для таких предположений является то, что расстояния от гипоцентров до дневной поверхности Земли и пункта наблюдения за  $\rho_k$  составляют 33 км, 32 км, 8 км, 29 км, 36 км, 33 км, 27 км, 33 км, соответственно. Другими словами, очаги землетрясений располагаются, фактически, под наблюдательным пунктом и могут вызвать деформацию горных пород в районе измерительного пункта пропорционально магнитуде землетрясений.

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать некоторые оценки тензочувствительности дипольной установки по электрическому сопротивлению массива горных пород Хадумского купола. Эти данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

| № толчка | Магнитуда | $\Delta\rho_k/\rho_k$ | $\Delta\varepsilon/\varepsilon$ | T              | г, км |
|----------|-----------|-----------------------|---------------------------------|----------------|-------|
| 1        | 5,7       | 0,85                  | $7,8 \cdot 10^{-7}$             | $1 \cdot 10^6$ | 36    |
| 2        | 5,0       | 0,30                  | $5,0 \cdot 10^{-7}$             | $6 \cdot 10^5$ | 33    |
| 3        | 4,8       | 0,40                  | $4,4 \cdot 10^{-7}$             | $9 \cdot 10^5$ | 27    |
| 4        | 4,6       | 0,20                  | $3,1 \cdot 10^{-7}$             | $6 \cdot 10^5$ | 33    |

Для оценки относительной деформации ( $\Delta\varepsilon/\varepsilon$ ) от очага землетрясения использовалась формула Зубкова [Зубков, 1993]:

$$\Delta\varepsilon/\varepsilon = 10^{0,37M-6,89/r^{0,85}}, \quad (2)$$

где M – магнитуда землетрясения; r – радиус деформации в километрах.

В данном случае для оценки деформации использовались гипоцентральные расстояния от очагов, то есть учитывались глубины расположений каждого из очагов.

Коэффициент тензочувствительности пород (T) определялся по формуле:

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

### Заключение

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что массив горных пород Хадумского купола обладает коэффициентом тензочувствительности (T) близким к предельному значению. Природа такой чувствительности пока не ясна, однако понятно, что такого порядка изменения удельного электрического сопротивления в реальной среде вследствие деформации произойти не могут и тем более в упругом режиме. Можно только предположить, что вариации  $\rho_k$  связаны с сжатием – растяжением трещинных зон вертикального простирания, секущих Хадумский купол, которые могут являться «природными усилителями» изменения  $\rho_k$  от деформации.

В геологическом плане Хадумский купол состоит в основном из высокоомных карбонатных пород. Величина  $\rho_k = 900$  Ом·м. Это подтверждает обезвоженность пород расположенных выше уровня водохранилища. Сжатие – растяжение вертикальных трещинных зон может вызвать изменение площади контакта между блоками в зоне между питающим и приемным диполями, тем самым, создавая слои изолирующие электрическое поле от приемного диполя. При отсутствии воды в трещинах воздушные прослойки между питающим и приемным диполями могут служить своего рода изоляторами. Вариации  $\rho_k = 85\%$  зарегистрированы впервые (для справки, из литературных источников издательств академии наук СССР, США, Китая, Италии и др. известные максимальные амплитуды изменения  $\rho_k$  в сейсмоактивных районах равны 40% [Идармачев, Барсуков, 1978; Bella et al., 1987]).

Таким образом, анализ результатов, полученных в районе Хадумского купола показал, что метод дипольного электрического зондирования является эффективным средством для контроля над накоплением тектонических напряжений, представляющих опасность для района Сулакского каскада ГЭС и ближайших к нему населенных пунктов.

## Выводы

1. Впервые в практике электромагнитных исследований горных пород на сейсмопрогностических полигонах перед сильным землетрясением  $M=5,7$  на эпицентральном расстоянии сравнимым с длиной разрыва очага ( $L=16,6$  км) зарегистрировано уменьшение  $\rho_k$  с максимальной амплитудой 85%. Перед всеми остальными сильными толчками  $M=5,0, 4,8$  и  $4,6$  Кизилюртовского землетрясения также наблюдались вариации  $\rho_k$  на 30%, 40% и 20% соответственно.

2. Основной толчок Кизилюртовского землетрясения  $M=5,7$  произошел в северо-восточной окрестности сильного землетрясения 14 мая 1970 г., что дает основание полагать, что снятие упругих напряжений в зоне разлома после землетрясения 1970 г. вызвало концентрацию напряжений в северной узловых части разломной зоны, имеющей форму похожую на параллелограмм. Расположение повторных сильных толчков, а также их афтершоков в афтершоковой области землетрясения 1970 г. показывает существование связи между землетрясениями 1999 г. и 1970 г. Механизм повторных толчков, происшедших в области очагов землетрясения 1970 г. может быть триггерным, т.е. основной толчок землетрясения 1999 г. в результате встряски земной коры способствовал разрядке упругих напряжений в земной коре, оставшихся в очаговой области после землетрясения 1970 г. или накопившихся там за период (28 лет) между двумя сильными землетрясениями.

## Литература

1. Арефьев С. С., Стасюк Е. И., Ривера Л. Модель очага дагестанского землетрясения 1970 г. // Физика Земли. 2004, № 2. – С. 15–27.
2. Идармачев Ш. Г., Левкович Р. А., Арефьев С. С. и др. Изменение некоторых характеристик сейсмичности района Чиркейской ГЭС в период его заполнения. Сейсмический режим территории Дагестана. Махачкала: Институт геологии Дагестанского филиала АН СССР, 1977, Вып. 1. – С. 3–9.
3. Асманов О. А., Арефьев С. С., Идармачев Ш. Г. и др. Салауское землетрясение 23 декабря 1974 г. в Дагестане // Землетрясения в СССР в 1975. М.: Наука, 1976. – С. 43–52.
4. Левкович Р. А. Буйнакское землетрясение 9 января 1975 г. // Сейсмический бюллетень Кавказа 1975 г. Тбилиси: Мацниереба, 1977. – С. 171–192.
5. Общий каталог землетрясений на территории Дагестана. Махачкала: Эпоха, 2007. – 393 с.
6. 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.
7. Зубков С. И. О краткосрочных предвестниках землетрясений // Физика Земли. 1993, № 9. – С. 67–70.
8. Идармачев Ш. Г., Барсуков О. М. Плотинные землетрясения и вариации электросопротивления массива горных пород в районе Чиркейского водохранилища // ДАН СССР. 1978, Т. 240, № 2. – С. 301–305.
9. Bella F., Biargi P., Della M. G. et al. Some possible precursors of the main earthquake of the Torniparte (Central Italy); Seismic sequence occurred in 1985 // Nuovo cim. C. 1987. Vol. 10. No. 4. P. 455–463.

---

---

## ANALYSIS OF DIPOLE ELECTRIC SOUNDING OF KHADUM DOME IN THE PERIOD OF EARTHQUAKE KIZILYURT 1999 IN DAGHESTAN

Idarmachev Sh. G.<sup>1</sup>, Sc. Doctor (Phys.-math.), Aliev M. M.<sup>2</sup>, Idarmachev A. Sh.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of geology, Dagestan scientific center RAS, Makhachkala, Russia

<sup>2</sup> Institute of Problems of the Geothermie, Makhachkala, Russia

We consider the electric dipole sounding data Khadum dome, located in the center of the cascade of Sulak hydroelectric power during the strong earthquake in Daghestan (Russia, Caucasus), which occurred in January 31, 1999. The distribution of epicenters of earthquakes shows the presence of its connection with the aftershocks of a strong earthquake on May 14 1970. Before the major thrusts in the range of magnitude 5.7–4.6 reported anomalous decrease of the apparent resistivity of the rock in the 85–20% associated with the preparation for the gap in the crust.

**Keywords:** dipole electrical sounding, the epicenter of the earthquake, the apparent resistivity, aftershock.