

ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ В РАЙОНЕ ЧИРКЕЙСКОЙ ГЭС В РЕЗУЛЬТАТЕ СЕЗОННЫХ НАГРУЗОК ОТ ВОДОХРАНИЛИЩА

ASSESSMENT OF CRUSTAL DEFORMATIONS IN THE AREA OF THE CHIRKEY HYDROPOWER PLANT DUE TO SEASONAL LOADS FROM THE RESERVOIR

ИДАРМАЧЕВ Ш.Г.

Заведующий лабораторией сейсмопрогностических исследований Института геологии Дагестанского научного центра РАН, д.ф.-м.н., г. Махачкала, idarmachev@yandex.ru

ЧЕРКАШИН В.И.

Директор Института геологии Дагестанского научного центра РАН, д.г.-м.н., г. Махачкала, dangeo@mail.ru

МУСАЕВ М.А.

Ведущий инженер Института геологии Дагестанского научного центра РАН, г. Махачкала

ИДАРМАЧЕВ И.Ш.

Аспирант Института геологии Дагестанского научного центра РАН, г. Махачкала, ibra182@yandex.ru

IDARMACHEV SH.G.

Head of the Seismic Prediction Research Laboratory of the Geology Institute of the Dagestan Scientific Center of the RAS, PhD (doctor of science in Physics and Mathematics), Makhachkala, idarmachev@yandex.ru

CHERKASHIN V.I.

Director of the Geology Institute of the Dagestan Scientific Center of the RAS, PhD (doctor of science in Geology and Mineralogy), Makhachkala, dangeo@mail.ru

MUSAEV M.A.

Leading engineer of the Geology Institute of the Dagestan Scientific Center of the RAS, Makhachkala

IDARMACHEV I.SH.

Postgraduate student of the Geology Institute of the Dagestan Scientific Center of the RAS, Makhachkala, ibra182@yandex.ru

Ключевые слова:

Чиркейская ГЭС; кажущееся удельное электрическое сопротивление; деформации земной коры; уровень водохранилища.

Key words:

Chirkey hydropower plant; apparent resistivity; crustal deformations; reservoir water level.

Аннотация

Для анализа результатов длительных наблюдений за кажущимся электрическим сопротивлением скальных пород в скважине, расположенной в районе плотины Чиркейской ГЭС, сделаны численные оценки деформаций пород под водохранилищем. Они подтверждают возможность изменений кажущегося сопротивления в зависимости от сезонного веса водохранилища.

Введение

Результаты деятельности человека в особо крупных масштабах нарушают равновесие окружающей среды, при этом в отдельных случаях приводят к обострению экологической ситуации. Например, заполнение крупных водохранилищ ведет к изменению ландшафтов территорий, климата, к деформациям земной коры, увеличению сейсмичности, а в отдельных случаях — к возникновению сильных землетрясений с магнитудами M более 6 даже на асейсмичных платформенных территориях.

Механизм возникновения таких землетрясений пока не определен, но имеется несколько предположений на этот счет, например [14]:

- вес водохранилища создает дополнительную нагрузку на земную кору, которая приводит к подвижкам блоков по разломам в тех местах, где упругие напряжения близки к пределу прочности материала;
- рост порово-трещинного давления от напора воды в водохранилище ведет к снижению эффективного давления пород и их прочности на сдвиг (другими словами, изменение физических свойств породы от заполнения водохранилища нарушает равновесное состояние блоков, способствует их подвижкам).

Решение задач, связанных с определением механизмов плотинных землетрясений и их предвестников, с целью снижения рисков возможных негативных последствий остается весьма актуальным.

Abstract

For analysis of the results of long-term observations of the apparent resistivity of rocks in the borehole located near the dam of the Chirkey hydropower plant the authors numerically estimated deformations of rocks under the reservoir. The obtained estimations confirm possibility of changing the apparent resistivity due to the reservoir seasonal weight.



В ряде литературных источников [3, 15 и др.] показано, что наполнение крупного водохранилища может привести к нарушению равновесного состояния земной коры. Рассмотрим некоторые примеры.

В 1969 г. при заполнении крупнейшего в мире водохранилища Кариба (р. Замбези, Зимбабве, Замбия) с объемом воды 150 км^3 были зарегистрированы деформации земной коры на большой площади. По данным повторных нивелировок, проведенных до и после заполнения водохранилища, было выявлено опускание дна в наиболее глубокой части на 13 см. Скорость опускания во время заполнения и в первые годы после него составляла 10–12 мм/год.

На крупном водохранилище Мид (р. Колорадо, США) с объемом воды 35 км^3 была проведена высоточная нивелировка в период заполнения в 1935 г. и через 5 лет после него по нескольким линиям (в т.ч. и пересекающим чашу заполнения) общей протяженностью более 1000 км. Результаты измерений показали, что в период, когда водохранилище наполнилось на 80%, максимальное прогибание земной коры составило 12 см. Общая площадь прогиба земной поверхности составила не менее $30\,000 \text{ км}^2$, т.е. оказалась на два порядка больше, чем площадь водного зеркала. Максимум погружения соответствует области максимальной нагрузки.

Бывают примеры и другого плана. В процессе строительства плотины Красноярской ГЭС длиной более 1 км и высотой до 120 м, заложенной в гранитах и сиенитах палеозойского возраста, она начала оседать. В центральной части плотины осадка составила 30 мм относительно пунктов, удаленных от нее на 0,3–0,5 км. В период строительства плотина в результате неравномерных осадок наклонилась на 30–40 см по гребню в сторону нижнего бьефа. После заполнения водохранилища в результате прогибания его ложа наклон плотины изменился в противоположную сторону. Данный случай показывает, что нагрузка от водохранилища деформирует породы, в т.ч. те, которые расположены в районе плотины.

В первые годы после заполнения расположенного на Северном Кавказе Чиркейского водохранилища с объемом воды $2,8 \text{ км}^3$ в его районе проводились повторные нивелировки. По данным, приведенным в работе [4], в отдельных точках наблюдались опускания земной поверхности на 23–26 мм. При сезонных изменениях веса водохранилища были зафиксированы опускания и подъемы земной поверхности с амплитудами 5–6 и 3 мм соответственно. Эти данные свидетельствуют о том, что первоначальное заполнение привело к пластическим деформациям земной коры, а при последующих сезонных изменениях веса водохранилища она начала вести себя как упругое тело [4].

Детальное исследование сейсмичности района Чиркейского водохранилища авторами [2, 7, 8] показало, что его заполнение вызвало увеличение сейсмической активности в первые годы в 50 раз, а в последующее время прямой связи с сезонными изменениями уровня воды не наблюдалось — имела место двухгодичная периодичность.

Об упругом характере деформирования земной коры в районе Чиркейского водохранилища под дей-

ствием сезонных нагрузок свидетельствуют данные наблюдений за геомагнитным полем [11]. Годовой временной ход геомагнитного поля имеет стереотипный вид: с увеличением уровня воды наблюдается уменьшение магнитного поля. Подобного типа зависимость отмечалась и на других водохранилищах мира [9, 12]. Предполагается, что деформирование земной коры приводит к возникновению магнитоупругого эффекта.

В настоящей статье сделана попытка объяснить новые результаты режимных наблюдений за кажущимся электрическим сопротивлением скальных пород в скважине, расположенной в районе плотины Чиркейской ГЭС, и за упругим деформированием земной коры под действием сезонных нагрузок от водохранилища. Сделанные в работе несложные оценки деформаций земной коры для ложа водохранилища позволяют предположить, что сезонные изменения кажущегося сопротивления пород в скважине, которые имеют высокие коэффициенты корреляции с изменениями уровня воды ($R = -0,8$), могут быть обусловлены процессами сжатия или растяжения пород. Это предположение основывается также на результатах лабораторного определения тензочувствительности образцов пород, взятых в районе исследований. Для отдельных водонасыщенных образцов коэффициент тензочувствительности для электрического сопротивления достигает величины $6 \cdot 10^3$.

Несмотря на упрощенную модель расчета деформаций в результате сезонных нагрузок от дополнительного веса воды в водохранилище, полученные количественные данные по изменениям электрического сопротивления карбонатных пород находятся в хорошем соответствии с наблюдаемыми кажущимися сопротивлениями пород в скважине. Однако, несмотря на очевидную связь между уровнем воды и кажущимся сопротивлением, в отдельных случаях можно видеть их неполное совпадение, например при неизменном уровне воды в водохранилище кажущееся сопротивление продолжает изменяться, нет также совпадения между пиками в периоды минимального уровня воды. На эти вопросы у нас пока нет ответов. Тем не менее приведенные в работе фактические данные могут быть полезными для специалистов, изучающих механизмы возбужденных землетрясений. Авторы статьи готовы обсуждать с ними и другие модели и механизмы, позволяющие объяснить противоречивые моменты данной работы.

Результаты наблюдений

Результаты электрометрических наблюдений в скважине, расположенной в районе правого борта плотины Чиркейской ГЭС, показали наличие противофазных ходов графиков кажущегося электрического сопротивления пород и сезонных изменений уровня воды в водохранилище [5]. Предполагается, что сезонные изменения нагрузок, создаваемых весом водохранилища, приводят к упругим деформациям земной коры, в т.ч. массива горных пород в районе плотины. Основанием для такого предположения послужило то, что электрическое сопротивление очень чувствительно реагирует на деформации грунтов.

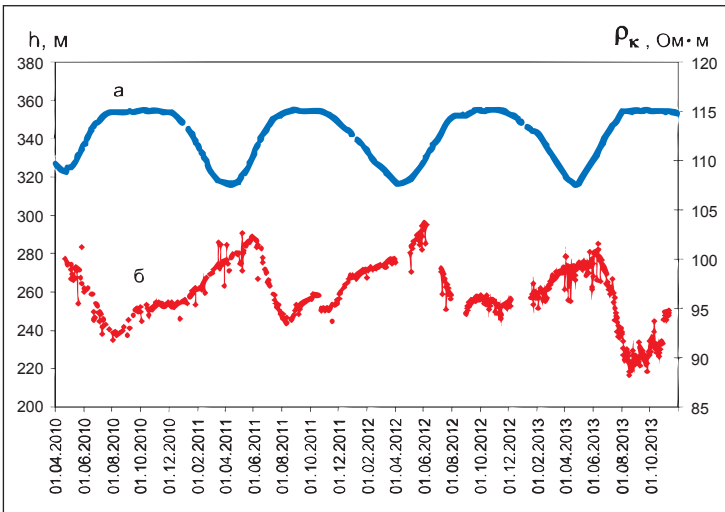


Рис. 1. Графики среднесуточных значений: а — уровня воды в Чиркейском водохранилище h ; б — кажущегося сопротивления пород ρ_k в скважине, расположенной в районе плотины. Горизонтальная ось — даты

В условиях естественного залегания горных пород в земных недрах их удельное электрическое сопротивление практически не зависит от сопротивления минерального скелета, а определяется количеством и минерализацией воды в порах и трещинах грунтов, их трещиноватостью, пористостью, структурой, температурой и давлением. Минерализацию и температуру воды в породах, расположенных ниже уровня грунтовых вод, можно считать постоянными величинами, а вот порово-трещинный объем, извилистость поровых каналов проводимости тесно связаны между собой и имеют сильную зависимость от деформаций. При сжатии породы трещины, ориентированные перпендикулярно оси сжатия, закрываются, извилистость поровых каналов проводимости растет, порово-трещинный объем уменьшается, что приводит к увеличению сопротивления. При растяжении все происходит наоборот.

При упругом изгибе грунта трещины в нем открываются, в результате чего порово-трещинный объем

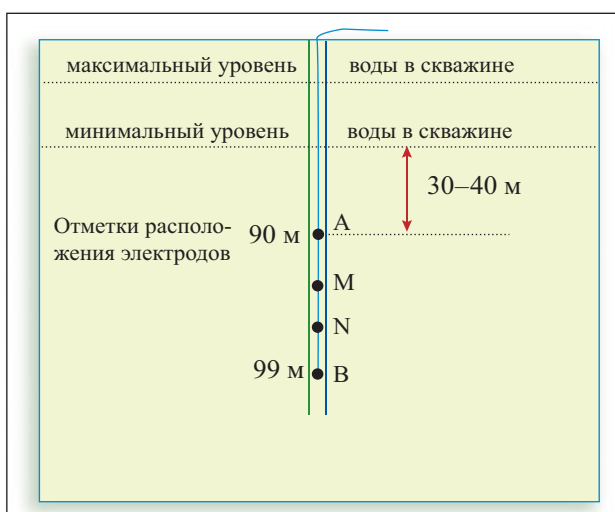


Рис. 2. Расположение питающих (А, В) и приемных (М, N) электродов установки электрического зондирования в скважине в районе правого борта плотины Чиркейской ГЭС

увеличивается, а извилистость поровых каналов уменьшается, что приводит к уменьшению электрического сопротивления.

В отдельных случаях коэффициент зависимости электрического сопротивления породы от деформации достигает очень больших величин. Другими словами, электрическое сопротивление грунтов является своего рода чувствительным индикатором их деформирования, при этом наибольшая чувствительность характерна для малых деформаций. Максимальный коэффициент усиления, полученный в лабораторных условиях, не превышает 10^5 [1, 13].

В современных условиях использование компьютерных систем позволяет проводить непрерывные высокоточные измерения электрического сопротивления пород, при этом погрешности относительных измерений не превышают $\pm 0,1, 0,01\%$ в зависимости от используемой аппаратуры и различного рода электрических помех. При использовании таких систем для измерения электрического сопротивления грунтов с коэффициентом усиления деформации $10^3 \div 10^5$ можно надежно регистрировать малые относительные деформации порядка $10^{-8} \div 10^{-9}$.

На основании этих данных и было сделано предположение о том, что асинхронные изменения уровня воды в Чиркейском водохранилище и кажущегося сопротивления в скважине, расположенной в районе плотины, могут быть связаны с процессом деформирования земной коры в зависимости от изменения веса водохранилища.

На рисунке 1 представлены графики среднесуточных значений уровня воды в водохранилище и кажущегося сопротивления пород в скважине за период 2010–2013 гг.

Для измерения кажущегося сопротивления пород используется четырехэлектродная установка электрического зондирования (рис. 2). Измерительный зонд всегда находится ниже уровня воды в скважине. На питающие электроды А, В, которые расположены на глубинах 90 и 99 м, при помощи генератора подаются разнополярные импульсы постоянного стабилизированного тока $I = 0,02$ А со скважностью 10, а с приемного диполя, образуемого электродами М, N, длиной 3 м, расположенного посередине между питающими электродами, снимается разность потенциалов U , которая пропорциональна силе тока в питающем диполе и кажущемуся сопротивлению ρ_k . Последнее зависит от строения геоэлектрического разреза, удельных сопротивлений слоев и их мощностей.

Величина кажущегося сопротивления определяется формулой:

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

где k — геометрический коэффициент, зависящий от расстояний между электродами А, В, М, N.

Для измерения кажущегося сопротивления используется специальная установка «Георезистор», сконструированная и изготовленная в Институте геологии Дагестанского научного центра РАН [6]. Разработанная там же компьютерная программа управления установкой обеспечивает непрерывный режим измерения. В соответствии с этой программой на первый дифферен-



циальный канал платы сбора данных подается сигнал, снимаемый с калибровочного шунта, включенного в цепь питающей линии и подключенного к электродам А, В. На вход второго канала поступают сигналы от приемных электродов М, N. Длительность измерений одного цикла равна 59 минутам. В конце каждого часа полученный массив данных обрабатывается программой и записывается на жесткий диск: фиксируются текущие дата и время, сила тока I в цепи питающего диполя, напряжение на приемном диполе U , среднечасовое кажущееся сопротивление ρ_k . Относительная погрешность измерений среднесуточных значений ρ_k не превышает $\pm 0,1\%$.

Графики, приведенные на рис. 1, демонстрируют, что изменения кажущегося сопротивления пород в скважине имеют сезонный ход. Повышению уровня воды в водохранилище в период паводка рек с мая по август примерно на 35–40 м соответствует уменьшение кажущегося сопротивления пород, при этом начало этого уменьшения отстает на 30–40 суток. Когда уровень воды находится на максимуме в стабильном состоянии с августа по ноябрь — декабрь, кажущееся сопротивление меняется сложным образом. После достижения кажущимся сопротивлением минимума в августе оно начинает увеличиваться при неизменном уровне водохранилища. Природа данного явления пока неясна.

Максимальные уменьшения кажущегося сопротивления, соответствующие периодам паводковых наполнений водохранилища с июня по август в 2010, 2011, 2012, 2013 гг., равны соответственно 8,4; 9,1; 9,7; 11,5%. Максимальные его увеличения за периоды 2010–2011, 2011–2012, 2012–2013 гг. равны соответственно 11,2; 9,9; 6,1%. Коэффициент корреляции между суточными данными для уровня воды в водохранилище и для кажущегося сопротивления за период 2010–2013 гг. равен минус 0,80, а для каждого года в отдельности:

Год	Коэффициент корреляции
2010	-0,83
2011	-0,82
2012	-0,84
2013	-0,83

То есть наблюдается большая отрицательная корреляционная связь. Для объяснения такой связи было сделано предположение о том, что изменения кажущегося сопротивления вызваны деформациями пород под воздействием сезонных изменений веса воды в водохранилище. Для проверки данного предположения были выполнены численные оценки вертикальных деформаций пород при сезонных изменениях количества воды.

На рисунке 3 представлена схема модели для расчета упругой деформации в точке Р при максимальной сезонной нагрузке от веса воды в Чиркейском водохранилище. Объем максимального сезонного увеличения количества воды рассмотрим в виде прямоугольного параллелепипеда объемом $V = a \cdot b \cdot \Delta h$, где a — средняя длина зеркала водохранилища ($a = 10$ км); b — его средняя ширина ($b = 2,5$ км); Δh — максимальное се-

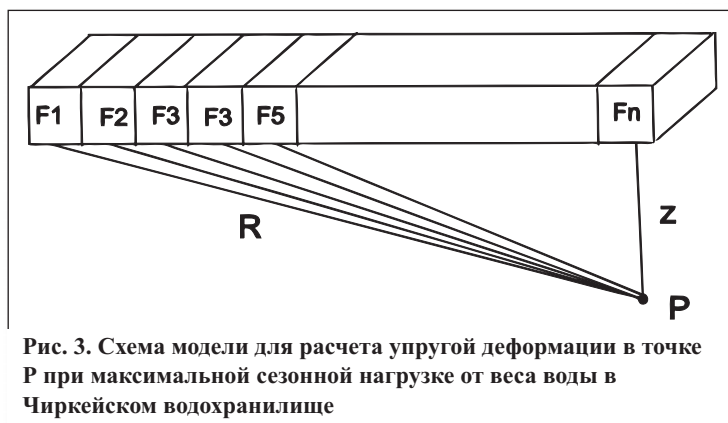


Рис. 3. Схема модели для расчета упругой деформации в точке Р при максимальной сезонной нагрузке от веса воды в Чиркейском водохранилище

зонное увеличение уровня воды в водохранилище ($\Delta h = 0,035$ км). Для приближенного расчета деформации представим выбранный объем в виде 20 равных элементарных прямоугольных параллелепипедов размером $0,5 \cdot 2,5 \cdot 0,035$ км каждый. Вес каждого из них примем за точечную силу F_i , равную $4,3 \cdot 10^8$ Н.

Для расчета элементарной вертикальной деформации Δd в точке Р как результата действия силы F_i воспользуемся известной формулой [16]:

$$\Delta d = \frac{F_i}{2\pi E} \left[\frac{(1+\nu)z^2}{R^3} + \frac{2(1-\nu^2)}{R} \right], \quad (2)$$

где Δd — элементарная деформация в рассматриваемой точке Р; E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона; z — вертикальное расстояние от дна водохранилища до точки Р; R — расстояние от точки приложения силы F_i до точки Р.

Чтобы получить результирующую деформацию d в точке Р, необходимо просуммировать элементарные деформации Δd от действия всех точечных сил F_i . Вычисления проводились с помощью программы Microsoft Excel для карбонатных пород, из которых состоит ложе Чиркейского водохранилища. При этом значения модуля Юнга принимались в диапазоне $(1,0 \div 8,0) \cdot 10^9$ Па, а коэффициент Пуассона принимался равным 0,27 [10]. Вычисления деформаций выполнялись для различных глубин от уровня дна ($z = 100 \div 3000$ м) в центре водохранилища и в районе плотины ГЭС, где располагается исследовательская скважина. Результаты вычисления деформаций приведены в табл. 1 и 2.

Обсуждение результатов

Из таблиц 1 и 2 видно, что максимальные расчетные деформации под центральной частью водохранилища составляют несколько миллиметров, а для массива пород, расположенных в районе плотины, они ниже примерно в два и более раза.

Рассмотрим, в каких пределах может изменяться удельное электрическое сопротивление породы в зависимости от деформации. Связь между ними определяется коэффициентом тензочувствительности породы T :

$$\Delta \rho / \rho = T \cdot d / z, \quad (3)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление; $\Delta \rho$ — его абсолютное изменение; $\Delta \rho / \rho$ — его относительное

Таблица 1

Вертикальные деформации земной коры (мм) под центральной частью водохранилища при максимальном уровне воды							
E, Па	Глубина от дна водохранилища z, м						
	100	500	1000	1500	2000	2500	3000
1·10 ⁹	2,20	1,90	1,50	1,30	1,20	1,00	0,95
2·10 ⁹	1,10	0,95	0,75	0,65	0,60	0,50	0,48
3·10 ⁹	0,73	0,63	0,50	0,43	0,40	0,33	0,32
4·10 ⁹	0,55	0,48	0,38	0,33	0,30	0,25	0,24
5·10 ⁹	0,44	0,38	0,30	0,26	0,24	0,20	0,19
6·10 ⁹	0,37	0,32	0,25	0,22	0,20	0,17	0,16
7·10 ⁹	0,31	0,27	0,21	0,19	0,17	0,14	0,14
8·10 ⁹	0,28	0,24	0,19	0,16	0,15	0,13	0,12

изменение; d — вертикальная деформация; z — глубина от уровня дна; d/z — относительная вертикальная деформация.

Максимальная относительная вертикальная деформация пород в районе плотины ГЭС от дополнительного веса водохранилища для массива грунта толщиной 100 м при деформации 1,2 мм (т.е. $1,2 \cdot 10^{-3}$ м) равна $1,2 \cdot 10^{-5}$.

Известные из литературных источников [1, 13] коэффициенты тензочувствительности пород в естественных условиях залегания находятся в пределах $10^3 \div 10^5$. Подставляя эти значения и величину относительной деформации $1,2 \cdot 10^{-5}$ в формулу (3), получаем относительное изменение удельного электрического сопротивления, равное $0,012 \div 1,2$, или $1,2 \div 120\%$. При сравнении этих вычисленных значений $\Delta\rho/\rho$ с сезонными вариациями кажущегося сопротивления пород в скважине за разные годы ($6,1 \div 11,5\%$, см. рис. 1) можно увидеть, что данные наблюдений находятся в пределах границ численных оценок.

По результатам лабораторного исследования был получен коэффициент тензочувствительности водонасыщенного образца грунта, взятого в рассматриваемом районе. Его величина составила $6 \cdot 10^3$. Подставляя это значение в формулу (3), получим: $\Delta\rho/\rho = 0,072$, или $7,2\%$. То есть результаты лабораторной оценки изме-

нения удельного электрического сопротивления грунта в зависимости от его деформации находятся в хорошем соответствии с наблюдавшимися изменениями кажущегося сопротивления горных пород в скважине от дополнительной нагрузки в результате увеличения веса водохранилища.

Таким образом, рассмотренные выше численные оценки позволяют допустить, что сезонные изменения кажущегося сопротивления грунтов в скважине связаны с деформациями земной коры в результате переменных нагрузок от Чиркейского водохранилища.

Выводы

1. По результатам численных оценок максимальные деформации пород под центральной частью Чиркейского водохранилища в интервале глубин от уровня дна 100-3000 м в период максимальной сезонной нагрузки от веса воды равны 2,2–0,95 мм соответственно, а в районе плотины, где расположена наблюдательная скважина, они составляют 1,2–0,65 мм соответственно.

2. Сделанные оценки деформаций позволяют предположить, что сезонные изменения кажущегося сопротивления грунтов в скважине обусловлены переменными нагрузками от Чиркейского водохранилища.

Таблица 2

Вертикальные деформации земной коры (мм) в районе плотины ГЭС при максимальном уровне воды в водохранилище							
E, Па	Глубина от дна водохранилища z, м						
	100	500	1000	1500	2000	2500	3000
1·10 ⁹	1,20	1,10	0,90	0,80	0,76	0,70	0,65
2·10 ⁹	0,60	0,53	0,45	0,40	0,38	0,35	0,33
3·10 ⁹	0,40	0,37	0,30	0,27	0,25	0,23	0,22
4·10 ⁹	0,30	0,28	0,23	0,20	0,19	0,18	0,16
5·10 ⁹	0,24	0,22	0,18	0,16	0,15	0,14	0,13
6·10 ⁹	0,20	0,18	0,15	0,13	0,13	0,12	0,11
7·10 ⁹	0,17	0,16	0,13	0,11	0,11	0,10	0,09
8·10 ⁹	0,15	0,14	0,11	0,10	0,10	0,09	0,08



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авагимов А.А.* Динамика электромагнитных процессов в Копетдагском сейсмоактивном регионе: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 1991. 52 с.
2. *Арефьев С.С., Идармачев Ш.Г., Идармачев А.Ш.* Сейсмичность территории Дагестана за период 1960–2005 гг. // Труды Института геологии Дагестанского НЦ РАН. Вып. 56: Мониторинг природных катастроф. Махачкала, 2010. С. 170–175.
3. *Гупта Х., Растоги Б.* Плотины и землетрясения. М.: Мир, 1979. 250 с.
4. *Дейнега Г.И.* Влияние переменных нагрузок на динамику деформационных процессов и вертикальных смещений земной коры в связи с эксплуатацией Чиркейского водохранилища // Труды Института геологии Дагестанского филиала АН СССР. Вып. 40: Вопросы сейсмичности Восточного Предкавказья. Махачкала, 1989. С. 51–58.
5. *Идармачев И.Ш.* Вариации кажущегося сопротивления массива горных пород верхнего мела в районе плотины Чиркейской ГЭС под воздействием переменной нагрузки // Вестник Дагестанского НЦ РАН. 2014. № 52. С. 11–16.
6. *Идармачев Ш.Г., Алиев М.М., Абдулаев Ш-С.О., Хаджи Б.А.* Станция для электрического зондирования «Георезистор» // Материалы Международной конференции «Современная геодинамика, глубинное строение и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов». Воронеж, 2001. С. 86–87.
7. *Идармачев Ш.Г., Черкашин В.И., Алиев И.А. и др.* Возбужденная сейсмичность в районе Чиркейского водохранилища и ее проявления в геофизических полях. Махачкала: Алеф, 2012. 103 с.
8. *Каракин А.В., Идармачев Ш.Г., Асманов О.А.* Фильтрационная модель сезонных изменений сейсмического режима района Чиркейского водохранилища // Известия АН СССР. Физика Земли. 1990. № 6. С. 20–27.
9. *Каримов Ф.Х., Прохоров А.А.* О проявлении тектономагнитного эффекта в зоне Нурекского водохранилища // Прогноз землетрясений. Душанбе: Дониш, 1984. № 5. С. 139–148.
10. *Котляхов Ф.И.* Физические свойства нефтяных и газовых коллекторов. М.: Недра, 1977. 287 с.
11. *Сулейманов А.И., Саидов О.А., Магомедов Б.А.* Мониторинг геомагнитных полей в связи с техногенной сейсмичностью района водохранилища Чиркейской ГЭС // Труды Института геологии Дагестанского НЦ РАН. Вып. 56: Мониторинг природных катастроф. Махачкала, 2010. С. 217–225.
12. *Devis P.M., Stacey F.D.* Geomagnetic anomalies caused by a man-made Lake // Nature. 1972. V. 240. № 348. P. 512–520.
13. *Morrow C., Brace W.F.* Electrical resistivity changes in tuffs due to stress // Journal of Geophysical Research. 1981. V. 86. № B4. P. 2929–2934.
14. *Rothe J.P.* Seismic artificials // Tectonophysics. 1970. V. 9. № 2. P. 215–238.
15. *Simpson D.W.* Introduction to seismology. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. P. 123–150.
16. *Timoshenko S., Goodier J.N.* Theory of elasticity. London — New York: McGraw-Hill, 1951. P. 37–40.

ГЕОТЕХНИКА

Международный журнал для изыскателей,
проектировщиков и строителей

Цель журнала — знакомство российских специалистов с передовым отечественным и зарубежным опытом в области геотехники

Периодичность в 2015 году:
6 номеров

Стоимость годовой подписки:
3900 рублей
info@geomark.ru

