

УДК 550.34: 550.837

DOI: 10.23671/VNC.2015.4.55306

К ВОПРОСУ О ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ ОТ СЕЗОННОЙ НАГРУЗКИ ВЕСА ЧИРКЕЙСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

© 2015 Ш. Г. Идармачев, д.ф.-м.н., В. И. Черкашин, д.г.-м.н., М. А. Мусаев,
И. Ш. Идармачев

ФГБУН Институт геологии Дагестанского научного центра РАН, 367030,
Махачкала, ул. Ярагского, 75, e-mail: idarmachev@yandex.ru

В статье сделан анализ данных непрерывных электрометрических наблюдений в скважине, расположенной в районе правого борта плотины Чиркейской ГЭС за период времени 2010–2013 гг., которые коррелируют с сезонным изменением уровня воды в водохранилище. Один из механизмов связи между изменениями уровня воды в водохранилище и кажущимся сопротивлением пород может быть деформационный, т.е., сезонное изменение нагрузки, создаваемое весом водохранилища приводит к упругой деформации земной коры. Численные оценки показывают, что значение вертикальной относительной деформации земной коры в районе плотины ГЭС может достигать величин $1,2 \times 10^{-5}$

Ключевые слова: водохранилище, кажущееся сопротивление, сезонные вариации, деформация.

Введение

Результаты деятельности человека в особо крупных масштабах нарушают природное равновесие окружающей нас среды, при этом в отдельных случаях это приводит к обострению экологической ситуации. Например, заполнение крупных водохранилищ приводит к изменению ландшафта территории, климата, деформации земной коры, увеличению сейсмичности, а в отдельных случаях и к возникновению сильных землетрясений с магнитудами $M > 6$ в асейсмичных платформенных частях Земли. Механизм возникновения таких землетрясений пока остается неопределенным, но имеются несколько предположений, высказанных на этот счет [Rothe, 1970]: 1) вес водохранилища создает дополнительную нагрузку на земную кору, которая приводит к подвижкам блоков по разлому в тех местах, где упругие напряжения близки к пределу прочности материала; 2) влияние механизма, связанного с ростом порово-трещинного давления от напора воды в водохранилище, которая снижает величину эффективного давления пород и прочность на сдвиг. Другими словами, нарушается равновесное состояние блоков, способствует их подвижкам. Поэтому актуальной становится задача, связанная с определением механизма плотинных землетрясений и его предвестников с целью снижения риска возможных негативных последствий.

В 1969 году при заполнении крупнейшего в мире водохранилища Кариба на р. Замбези в Африке 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 обнаружено опускание dna водохранилища на 13 см. Скорость опускания dna во время заполнения в первые годы составила 10–12 мм/год.

На другом крупном водохранилище Мид на р. Колорадо США с объемом воды 35 км^3 в 1935 г. была проведена высокоточная нивелировка в период заполнения и через 5 лет после заполнения по нескольким линиям общей протяженностью более 1000 км, в том числе и пересекающим чашу заполнения. Результаты измерений показали, что в период когда водохранилище наполнилось на 80% максимальное прогибание земной коры под водохранилищем составило 12 см. Общая площадь прогиба земной поверхности составила не менее 30000 км^2 , т.е. оказалось на два порядка больше, чем площадь водного зеркала. Эти и другие литературные источники [Simpson, 1999; Гупта, Растоги, 1979] показывают, что наполнение крупного водохранилища может привести к нарушению равновесного состояния земной коры в районе водохранилища.

В процессе строительства плотины Красноярской ГЭС, длиной более 1 км и высотой до 120 м, заложенной в гранитах и сиенитах палеозойского возраста, плотина начала оседать. В центральной части величина осадки составила 30 мм относительно пунктов, удаленных на 0,3–0,5 км. В период строительства плотина, в результате неравномерной осадки, 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 факт показывает, что нагрузка водохранилища деформирует породы в том числе, которые расположены в районе плотины ГЭС.

В районе Чиркейского водохранилища объемом воды $2,8 \text{ км}^3$, расположенного на Северном Кавказе, первые годы после его заполнения проводились повторные нивелировки. По данным, приведенным в работе [Дейнега, 1989] на отдельных реперах наблюдались опускания земной поверхности на 23–26 мм. При сезонных изменениях веса водохранилища были зафиксированы опускания и подъемы земной поверхности с амплитудами, соответственно, 5–6 мм и 3 мм. Эти данные свидетельствуют о том, что первоначальное заполнение привело к пластической деформации земной коры, а в последующих сезонных изменениях веса водохранилища ведет себя как упругое тело.

Детальное исследование сейсмичности района Чиркейского водохранилища авторами [Каракин и др., 1990; Арефьев и др., 2010; Идармачев и др., 2012] показало, что его заполнение вызвало увеличение сейсмической активности в первые годы в 50 раз. В последующие годы не наблюдалось прямой связи с сезонным изменением уровня воды. Максимумы сейсмической активности происходили с двухгодичной периодичностью, что свидетельствует о сложной взаимосвязи нагрузки водохранилища с тектоническим режимом района. Можно предположить, что одним из механизмов такой связи является тот факт, что при достижении максимальной деформации в разломе, превосходящий предел его прочности, приводит к подвижке и как следствие к повышению сейсмичности.

Об упругой деформации земной коры в районе Чиркейского водохранилища от сезонной нагрузки его веса свидетельствуют данные наблюдений за геомагнитным полем [Сулейманов и др., 2010]. Временной ход геомагнитного поля имеет стереотипный вид. С увеличением уровня воды наблюдается уменьшение магнитного поля. Такая зависимость отмечалась и на других водохранилищах мира [Каримов, Прохоров, 1984; Devis, Stacey, 1972]. Одним из возможных объяснений такой зависимости является деформация земной коры.



Рис. 1. Фото участка правого борта плотины Чиркейской ГЭС (цифрами 1 и 2 отмечены места расположения устьев скважин).

В настоящей статье сделаны оценки деформации земной коры при изменении веса воды водохранилища в период паводка рек и разгрузки водохранилища в зимний период.

Описание района исследований и метода наблюдений

Район расположения Чиркейской ГЭС соответствует географическим координатам $\varphi=43^{\circ}$ С. Ш.; $\lambda=47^{\circ}$ В. Д., сложен из мезозойских и кайнозойских отложений. Общая мощность осадочной толщи оценивается в 6500–7000 м. Ложе водохранилища длиной 10 км и шириной 3–4 км сложено верхнемеловыми известняками. Мощность их меняется в пределах 400–450 м.

На рис. 1 показан участок правого борта плотины ГЭС, где расположены исследовательские скважины, в которых проводятся непрерывные наблюдения наблюдений за кажущимся электрическим сопротивлением пород (скважина №1) и температурой воды в скважине (№2). Данные скважины были пробурены в период строительства ГЭС, для контроля над боковой фильтрацией воды в обход плотины в период заполнения водохранилища. Уровни воды в обеих скважинах имеют синхронный ход по фазе с уровнем воды в водохранилище, но при этом отстают в абсолютных отметках на 13–14 м (скв. №1) и 24–25 м (скв. №2).

Исследуемый массив пород сложен из горизонтально расположенных пачек плотных известняков верхнего мела. Прослойки между пачками известняков состоят из мергелей, аргиллитов и известковых глин. В отдельных местах прослеживаются крупные трещины, секущие массив, преимущественно субвертикального простирания. В самих плотных пачках известняков имеется сеть мелких трещин.

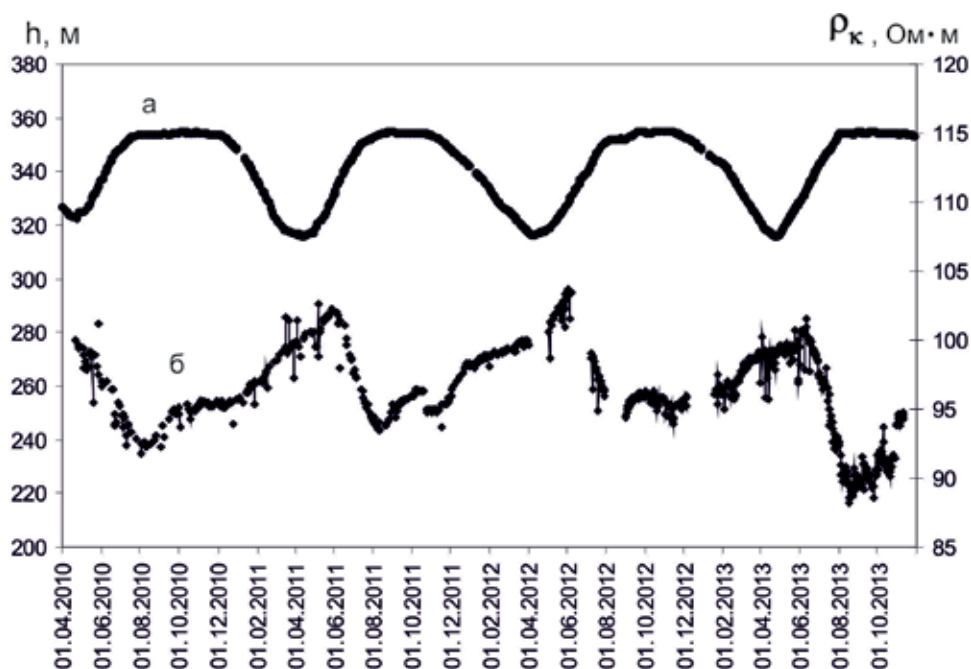


Рис. 2. Графики среднесуточных значений: а – уровня воды в водохранилище; б – кажущегося сопротивления пород в скважине.

В скважине №1, глубина которой равна 120 м, Институтом геологии Дагестанского научного центра РАН совместно с дирекцией Чиркейской ГЭС проводится измерение кажущегося электрического сопротивления пород с помощью четырехэлектродной установки электрического зондирования. Измерительная установка располагается на расстоянии 99 м от устья скважины, при этом всегда находится ниже минимального уровня воды в скважине на 30 м. Процесс измерений происходит непрерывно. Относительная погрешность измерений среднесуточных данных не превышает $d=\pm 0,2\%$.

На рис. 2 представлены графики среднесуточных значений уровня воды в водохранилище и кажущегося сопротивления пород в скважине за период 2010–2013 гг.

Сравнение графиков показывает, что в период повышения уровня воды в водохранилище величина кажущееся сопротивление пород уменьшается, а разгрузка водохранилища вызывает увеличение кажущегося сопротивления. Коэффициент корреляции между ними за период 2010–2013 гг. равен $k=-0,82$ [Идармачев, 2014].

Одним из механизмов связи между изменениями уровня воды в водохранилище и кажущимся сопротивлением пород может быть деформация пород ложа водохранилища. Сезонное изменение нагрузки, создаваемое весом водохранилища, приводит к упругой деформации земной коры, в том числе массива горных пород в районе плотины. Основанием для такого предположения послужило то, что электрическое сопротивление очень чувствительно реагирует на деформацию скальных пород.

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 породы, трещиноватостью и пористостью этой породы, ее структурой, температурой и давлением. Минерализация и температура воды для пород, которые

расположены 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 деформации. 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 породы все происходит наоборот.

При упругом изгибе породы трещины в ней открываются, в результате чего порово-трещинный объем 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 горных пород является своего рода чувствительным индикатором деформации, при этом наибольшая чувствительность характерна для малых деформаций. Максимальный коэффициент усиления, полученный в лабораторных условиях, составляет 10^5 [Morrow, Brace, 1981]. Уровень относительной погрешности измерений используемой нами установки $d = \pm 0,2\%$ позволяет оценить максимальную чувствительность породы к деформации, например, если порода обладает тензочувствительностью 10^5 , то установка должна реагировать на относительную деформацию породы, которая превышает уровень 10^{-7} .

На основании этих данных и было сделано предположение о том, что асинхронные изменения графиков уровня воды в Чиркейском водохранилище и кажущегося сопротивления в скважине могут быть связаны с процессом деформации земной коры в зависимости от изменения веса воды в водохранилище. Для его проверки были сделаны численные оценки вертикальной деформации пород от изменения сезонного веса Чиркейского водохранилища.

Расчет деформации земной коры от сезонной нагрузки водохранилища

Объем максимального сезонного увеличения воды в Чиркейском водохранилище рассмотрим в виде прямоугольного параллелепипеда объемом $V = a \cdot b \cdot h$ (рис. 3), где a – длина зеркала водохранилища – 10 км; b – средняя ширина – 2,5 км; h – величина максимального сезонного увеличения уровня воды водохранилища – 0,035 км.

Далее, для приближенного расчета деформации представим выбранный объем в виде 20-ти равных элементарных прямоугольных параллелепипедов размерами $0,5 \cdot 2,5 \cdot 0,035$ км, вес каждого из которых принимаем за точечную силу, равную $F_i = 4,3 \times 10^8$ Н.

Для расчета вертикальной деформации Δd в точке P , как результат действия силы F_i , воспользуемся известной формулой [Timoshenko, Goodier, 1951]:

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

где Dd – элементарная деформация в рассматриваемой точке P , E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, z – вертикальное расстояние от дна до точки P , R – расстояние от точки приложения силы F_i до точки P .

Чтобы получить результирующую деформацию d в точке P необходимо просуммировать элементарные деформации Dd от всех точечных сил F_i . Вычисления

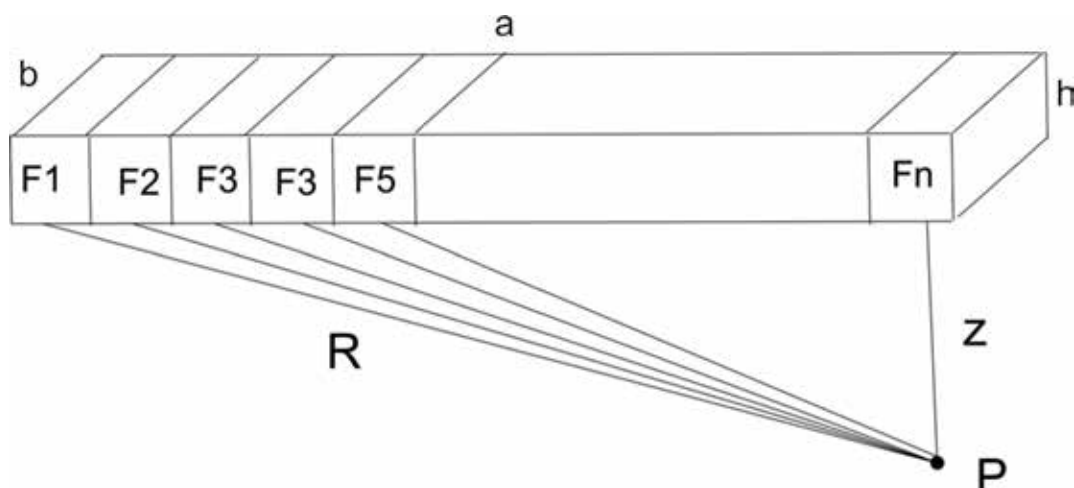


Рис. 3. Схема модели расчета упругой деформации в точке P при максимальной сезонной нагрузке веса воды в Чиркейском водохранилище.

Таблица 1

Значения вертикальной деформации земной коры под центром водохранилища при максимальном уровне воды, в миллиметрах

№	z , м E , Па	100	500	1000	1500	2000	2500	3000
1	1×10^9	2,2	1,9	1,5	1,3	1,2	1,0	0,95
2	2×10^9	1,1	0,95	0,75	0,65	0,60	0,50	0,48
3	3×10^9	0,73	0,63	0,50	0,43	0,40	0,33	0,32
4	4×10^9	0,55	0,48	0,38	0,33	0,3	0,25	0,24
5	5×10^9	0,44	0,38	0,30	0,26	0,24	0,20	0,19
6	6×10^9	0,37	0,32	0,25	0,22	0,20	0,17	0,16
7	7×10^9	0,31	0,27	0,21	0,19	0,17	0,14	0,14
8	8×10^9	0,28	0,24	0,19	0,16	0,15	0,13	0,12

Таблица 2

Значения вертикальной деформации земной коры в районе плотины ГЭС при максимальном уровне воды в водохранилище, в миллиметрах

№	z , м E , Па	100	500	1000	1500	2000	2500	3000
1	1×10^9	1,20	1,10	0,90	0,80	0,76	0,70	0,65
2	2×10^9	0,60	0,53	0,45	0,40	0,38	0,35	0,33
3	3×10^9	0,40	0,37	0,30	0,27	0,25	0,23	0,22
4	4×10^9	0,30	0,28	0,23	0,20	0,19	0,18	0,16
5	5×10^9	0,24	0,22	0,18	0,16	0,15	0,14	0,13
6	6×10^9	0,20	0,18	0,15	0,13	0,13	0,12	0,11
7	7×10^9	0,17	0,16	0,13	0,11	0,11	0,10	0,09
8	8×10^9	0,15	0,14	0,11	0,10	0,10	0,09	0,08

деформации проводились, используя программу MS Excel, для карбонатных пород, из которых состоит ложе Чиркейского водохранилища. Для этого использовались значения модуля Юнга в диапазоне $E = (1.0 \div 8.0) \times 10^9$ Па и коэффициента Пуассона $\nu = 0,27$ [Котляхов, 1977]. Вычисления деформации проводились для центра водохранилища и района плотины ГЭС, где располагается исследовательская скважина, для различных глубин, $z = 100 \div 3000$ м. Результаты вычисления деформаций приведены в таблице 1 и 2.

Обсуждение результатов

Из табл. 1 и 2 видно, что максимальные расчетные деформации под центром водохранилища составляют несколько миллиметров, а для массива пород, расположенных в районе плотины, величины деформации ниже, примерно, в два раза меньше.

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

$$D\rho/\rho = T \times d/z, \quad (2)$$

где $D\rho/\rho$ – относительное изменение удельного электрического сопротивления; d/z – относительная деформация.

Максимальная вертикальная относительная деформация пород в районе плотины ГЭС от дополнительного веса водохранилища для массива толщиной $z=100$ м и $d=1,2$ мм равна $1,2 \times 10^{-5}$.

Известные из литературных источников [Mogrow, Brace, 1981; Авагимов, 1991] коэффициенты тензочувствительности пород в естественных условиях своего залегания находятся в пределах: $T=10^3, 10^5$. Подставляя эти значения и $d/z=1,2 \times 10^{-5}$ в (3), получаем – $D\rho/\rho=0,012, 1,2$, или же (1,2%, 120%).

При сравнении этих вычисленных значений $D\rho/\rho$ с данными сезонных вариаций кажущегося сопротивления пород в скважине за различные года (рис. 2): 6,1%, 11,5%, можно видеть, что наши экспериментальные данные находятся в пределах границ численных оценок.

Для определения коэффициента тензочувствительности водонасыщенного образца породы, взятого из района исследований, был проведен лабораторный эксперимент в результате которого было получено $T \sim 6 \times 10^3$. Подставляя его в (2) получаем $D\rho/\rho=0,072$ (7,2%), т.е. результаты лабораторных оценок изменения удельного электрического сопротивления пород от деформации находятся в хорошем соответствии с результатами натурных данных изменения кажущегося сопротивления горных пород в скважине от дополнительной нагрузки веса водохранилища.

Таким образом, численные оценки, сделанные выше, позволяют допускать, что сезонные изменения кажущегося сопротивления пород в скважине связаны с деформацией земной коры от переменной нагрузки Чиркейского водохранилища.

Выводы

1. Анализ численной оценки максимальной деформации ложе Чиркейского водохранилища на глубинах 100 м и 3000 м (центр водохранилища) в период максимальной сезонной нагрузки (паводок) составляет 2,2 мм и 0,95 мм, соответственно, а в районе плотины, где расположена наблюдательная скважина, – 1,2 мм и 0,65 мм.

2. Сделанные оценки деформации позволяют предположить, что сезонные изменения кажущегося сопротивления пород в скважине, которые имеют высокий коэффициент корреляции ($k=-0,82$) с изменением уровня воды водохранилища, обусловлены переменной нагрузкой Чиркейского водохранилища, возникающей в периоды весеннего паводка рек и его зимней разгрузки через турбины ГЭС.

Литература

1. Авагимов А. А. Динамика электромагнитных процессов в Копетдагском сейсмоактивном регионе. Автореферат диссертации доктора физ.-мат. наук. М., 1991, С. 52.
2. Арефьев С. С., Идармачев Ш. Г., Идармачев А. Ш. Сейсмичность территории Дагестана за период 1960–2005 гг. Мониторинг природных катастроф. Сб. статей Института геологии Дагестанского НЦ РАН, Махачкала, 2010, вып. 56. 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. Вопросы сейсмичности Восточного Предкавказья. Сборник статей Института геологии Дагестанского филиала АН СССР. Махачкала, 1989, вып. 40, С. 51–58.
5. Идармачев Ш. Г., Черкашин В. И., Алиев И. А. и др. Возбужденная сейсмичность в районе Чиркейского водохранилища и ее проявления в геофизических полях. Институт геологии Дагестанского НЦ РАН, Махачкала, «Алеф», 2012. 103 с.
6. 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.
7. Каракин А. В., Идармачев Ш. Г., Асманов О. А. Фильтрационная модель сезонных изменений сейсмического режима района Чиркейского водохранилища // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1990, № 6, С. 20–27.
8. Каримов Ф. Х., Прохоров А. А. О проявлении тектономагнитного эффекта в зоне Нурекского водохранилища. Прогноз землетрясений. Душанбе-Москва: Дониш, 1984, №5, С. 139–148.
9. Котляхов Ф. И. Физические свойства нефтяных и газовых коллекторов. М.: Недра 1977, 287 с.
10. Сулейманов А. И., Саидов О. А., Магомедов Б. А. Мониторинг геомагнитных полей в связи с техногенной сейсмичностью района водохранилища Чиркейской ГЭС. Мониторинг природных катастроф. Сборник статей Института геологии Дагестанского НЦ РАН, Махачкала, 2010, вып. 56. с. 217–225.
11. Devis P. M., Stacey F. D. Geomagnetic anomalies caused by a man-made // Nature. 1972, Vol. 240, No. 348, pp. 512–520.
12. Morrow C., Brace W.F. Electrical resistivity changes in tuffs due to stress // J. Geophys. Res. 1981, Vol. 86, N B4, pp. 2929–2934.
13. Rothe J. P. Seismic Artificials // Tectonophysics. 1970, Vol. 9, No. 2, pp. 215–238.
14. Simpson D.W. Introduction to Seismology // Cambridge University Press, Cambridge, 1999, pp. 123–150.
15. Timoshenko S., Goodier J.N. Theory of Elasticity. McGraw-Hill, London and New York. N. Y., 2nd ed., 1951, pp. 37–40.

DOI: 10.23671/VNC.2015.4.55306

TO THE QUESTION OF CRUSTAL DEFORMATION FROM SEASONAL LOAD WEIGHT CHIRKEI RESERVOIR

**© 2015 S. G. Idarmachev, Sc. Doctor (Phys.-Math.), V. I. Cherkashin, Sc. Doctor
(Geol.-Min.), M. A. Musaev, I. S. Idarmachev**

Institute of Geology, DSC RAS, 367030, 75, M. Yaragski st., Makhachkala, Russia,
e-mail: idarmachev@yandex.ru

The article presents an analysis of data continuous electrometric observations in the borehole located in the right side of the dam of the Chirkei hydroelectric power station for the period 2010–2013, which correlate with seasonal changes in water level in the reservoir. One of the mechanisms of the link between changes in water level in the reservoir and the apparent resistance of rocks can be deformation, i.e., the seasonal change of the load created by the weight of the reservoir leads to elastic deformation of the earth's crust. Numerical estimates show that the value of relative vertical crustal deformation in the area of the hydroelectric dam may reach values of $1,2 \times 10^{-5}$.

Key words: water reservoir, the apparent resistivity, seasonal variations, deformation.