

УДК 550.33:550.348

ВАРИАЦИИ КАЖУЩЕГОСЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ВЕРХНЕГО МЕЛА В РАЙОНЕ ПЛОТИНЫ ЧИРКЕЙСКОЙ ГЭС ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКИ ВОДОХРАНИЛИЩА

И. Ш. Идармачев

Институт геологии ДНЦ РАН

В статье рассмотрены данные изменений уровня Чиркейского водохранилища и кажущегося удельного электрического сопротивления массива горных пород верхнего мела, расположенного вблизи плотины ГЭС. В результате проведенного анализа выявлена значимая корреляционная связь ($K = -0.8$) между сезонными изменениями уровня воды в водохранилище и кажущегося сопротивления. Полученные данные позволяют предположить, что одним из возможных механизмов такой связи может быть сезонное изменение веса водохранилища ($\Delta P = 1.3 \cdot 10^{10}$ Н), которое вызывает деформирование пород в районе водохранилища. Переменная нагрузка веса водохранилища является дестабилизирующим фактором равновесного состояния локальной области земной коры в данном районе.

The article describes data changes in the level of the Chirkey reservoir and apparent resistivity of the rock mass near the hydroelectric dam. The analysis shows significant correlation ($R = -0.8$) between seasonal changes in the reservoir water level and apparent resistivity of the rocks around. Increase of water level leads to decrease of apparent resistivity and vice versa. These data suggest that one of the possible mechanisms of such a link is the seasonal change in the reservoir weight, which causes deformation of the rocks in the area. Variable load under the reservoir weight is a destabilizing factor of the equilibrium state of the local crustal field in this area.

Ключевые слова: водохранилище; уровень воды; скважина; кажущееся сопротивление.

Keywords: water reservoir; water level; well; the apparent resistance.

Введение

Впервые на проблему повышения сейсмической активности в районах заполнения крупных водохранилищ обратили внимание в 1930-х гг. в США после заполнения водохранилища на р. Гувер. Сразу после заполнения водохранилища произошло большое количество слабых землетрясений, при этом наблюдалась связь между уровнем воды и количеством толчков. В настоящее время уже известно более 100 водохранилищ, на которых наблюдалось увеличение сейсмической активности после их заполнения [1]. В их числе и Чиркейское водохранилище.

Заполнение Чиркейского водохранилища началось в июле 1974 г. и завершилось в 1976 г. Сразу после достижения уровня воды в водохранилище 120 м друг за другом произошли сильные землетрясения с магнитудами $M = 5.0-5.2$, вслед за которыми последовало большое количество слабых толчков в районе водохранилища. Увеличение сейсмической активности превысило 50 и более раз относительно величины средней многолетней активности, которая наблюдалась до начала заполнения водохранилища [2].

В настоящее время внимание исследователей различных стран к проблеме сейсмичности в районах крупных водохранилищ не уменьшается, о чем свидетельствуют последние публикации ученых Индии и России [1, 3].

Актуальность исследования сейсмичности, различных геофизических полей в районах водохранилищ заключается еще и в том, что они должны способствовать лучшему пониманию механизма землетрясений в целом, так как процессы заполнения крупного водохранилища, сезонного колебания уровня воды в нем представляют собой грандиозный эксперимент искусственного воздействия на земную кору.

Целью работы является исследование корреляционных связей между сезонным изменением уровня Чиркейского водохранилища и электрическими параметрами массива горных пород, находящихся вблизи высотной плотины. Известно, что электрические параметры горных пород являются чувствительными индикаторами их деформации, а также характеризуют неустойчивое состояние деформации скальных массивов, предшествующих их разрушению. Поэтому исследование электрических параметров массива горных пород, примыкающих к плотине, имеет не только фундаментальное научное значение для изучения геодинамических процессов, происходящих в земной коре и связанных с воздействием на нее переменной нагрузки веса водохрани-

лища, но также и практическое значение для своевременного предупреждения опасных деформационных процессов, обусловленных подготовкой сильного землетрясения в районе ГЭС.



Рис. 1. Космоснимок Чиркейского водохранилища (пункт наблюдений показан стрелкой)

жена на расстоянии 300 м от правого борта плотины и имеет глубину 180 м. Скважина обсажена до глубины 5 м от земной поверхности. Породы скального массива состоят из слоистых известняков верхнего мела. Величина кажущегося сопротивления пород, находящихся ниже уровня воды, составляет примерно 100 Ом·м. Уровень воды в водохранилище имеет сезонный ход равный 30–35 м, при этом максимума он достигает в августе – сентябре, минимума – в апреле – мае. Уровень воды в скважине имеет синхронный ход с уровнем водохранилища, при этом отстает по амплитуде на 12–15 м.

Для измерений используется четырехэлектродная установка электрического зондирования. Измерительный зонд всегда находится ниже уровня воды. На питающие электроды, которые расположены на глубинах 90 м и 99 м, при помощи генератора подаются разнополярные импульсы постоянного стабилизированного тока $I = 0.02$ А скважностью 10 с, а с приемного диполя длиной 3 м, расположенного в середине между питающими электродами, снимается разность потенциалов (U), которая пропорциональна силе тока в питающем диполе и кажущемуся сопротивлению ρ_k .

Величина кажущегося сопротивления определяется формулой:

$$\rho_k = k \frac{U}{I}, \quad (1)$$

где ρ_k – величина, зависящая от строения геоэлектрического разреза, удельных сопротивлений слоев и их мощностей; k – геометрический коэффициент, зависящий от расстояний между электродами АВМN.

Для измерений используется установка «Георезистор» [5], которая располагается на территории Чиркейской ГЭС в специально оборудованной комнате. Установка состоит из платы сбора данных серии ЛА-И24, сопряженной с персональным компьютером, программы управления измерениями кажущегося сопротивления, генератора импульсов для питающего диполя и четырехэлектродного зонда, помещенного в скважине. Установка обеспечивает непрерывный режим измерений, высокую чувствительность к вариациям кажущегося сопротивления пород.

Программа управления станции «Георезистор» по внутренним часам компьютера включает режим измерений. Для этого на первый дифференциальный канал подается сигнал, снимаемый с калибровочного шунта, включенного в цепь питающей линии, а вход второго канала подключается к приемному диполю. Длительность измерений одного сеанса равна 59 мин. В конце часа полученный массив данных обрабатывается соответствующей программой и на жесткий диск записываются дата, время, значения тока (I) в цепи питающего диполя, напряжение на прием-

Расположение пункта наблюдения показано на рис. 1. Район расположения Чиркейской ГЭС 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. Сведения о тектонике района можно получить из тектонической карты Дагестана [4], согласно которой район исследований располагается вблизи зоны влияния разломов: Срединного, Владикавказского, Прибрежного, Дербентского.

Исходные данные и методика геоэлектрических исследований

Для анализа использовались данные электрического зондирования в скважине, полученные Институтом геологии ДНЦ РАН в районе Чиркейской ГЭС, а также данные мониторинга дирекции Чиркейской ГЭС и Дагестанской метеообсерватории.

Скважина, на которой проводятся наблюдения за кажущимся сопротивлением, располо-

ной диполе (U) и величина кажущегося сопротивления (ρ_k). Относительная погрешность измерений ρ_k в результате осреднения суточных данных не превышает $\pm 0.1\%$ [6].

Обсуждение результатов

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

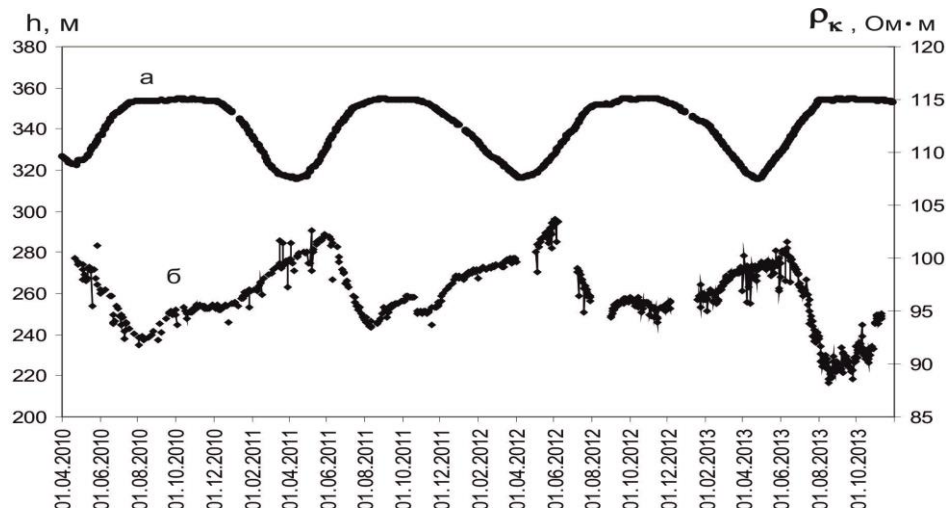


Рис. 2. Графики среднесуточных значений: а – уровня воды в водохранилище; б – кажущегося сопротивления пород в скважине

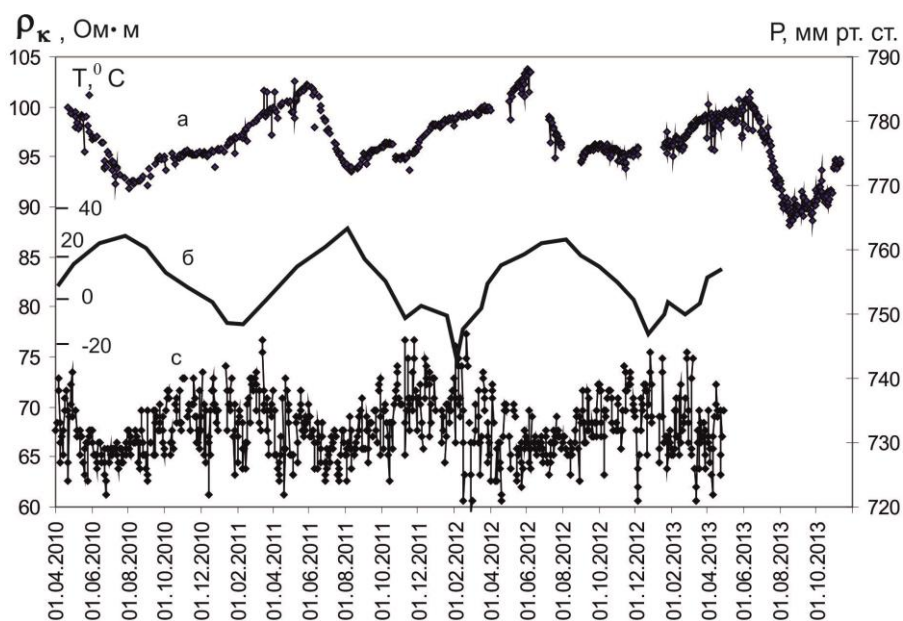


Рис. 3. Графики кажущегося сопротивления (а), температуры атмосферы (б) и давления атмосферы (с)

Предварительно из данных кажущегося сопротивления были удалены данные скачкообразных изменений, зарегистрированных в 2012 г., длительностью более чем 5–6 суток. На рис. 2 можно видеть изменение графика кажущегося сопротивления, который имеет повторяющийся из года в год сезонный ход. В период паводкового повышения уровня воды в водохранилище с мая по август месяц примерно на 35 м наблюдается уменьшение величины кажущегося сопротивления, при этом процесс ее 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 минимума в августе месяце оно начинает увеличиваться при неизменном уровне водохранилища. Максимальные амплитуды увеличения кажущее-

гося сопротивления за периоды 2010–2011 гг., 2011–2012 гг. и 2012–2013 гг. равны 11.2, 9.9 и 6.1%. Максимальные амплитуды уменьшения кажущегося сопротивления, соответствующие периодам с июня по август 2010 г., 2011 г., 2012 г. и 2013 г., равны 8.4, 9.1, 9.7 и 11.5%.

Коэффициенты корреляции между кажущимся сопротивлением и температурой атмосферы, давлением атмосферы

Годы	К – для температуры атмосферы	К – для атмосферного давления
2010	–0.24	0.13
2011	0.02	0.06
2012	0.05	–0.33
2013	0.53	–0.08

Коэффициент корреляции между суточными данными рядов уровня воды в водохранилище и кажущимся сопротивлением за период 2010–2013 гг. равен $K = -0.80$, а для каждого года в отдельности: 2010 г. – $K = -0.83$; 2011 г. – $K = -0.82$; 2012 г. – $K = -0.84$; 2013 г. – $K = -0.83$, т.е. наблюдается значимая отрицательная связь.

Известно, что электрические параметры могут быть подвержены влиянию метеофакторов, например, изменениям атмосферного давления, температуры и количества атмосферных осадков.

Анализ данных кажущегося сопротивления в данной скважине, полученных за период 2008–2010 гг., показал отсутствие связи с осадками [7]. Для атмосферного давления была обнаружена слабая связь, поэтому нам представляется необходимым рассмотреть наличие ее для исследуемых нами периодов наблюдений. На рис. 3 показаны графики кажущегося сопротивления, температуры атмосферы (T) и атмосферного давления (P). Визуально наблюдается определенное совпадение этих графиков, однако, как показал корреляционный анализ, между ними не отмечается значимой связи; например, для температуры и давления за весь период наблюдений коэффициенты соответственно равны $K = -0.07$ и $K = -0.115$. Отдельно по годам коэффициенты корреляции приведены в таблице.

Из таблицы видно, что для температуры 2010 г. наблюдается слабая отрицательная связь, а 2013 г. – удовлетворительная положительная связь, для 2011 и 2012 гг. связь практически отсутствует. Для атмосферного давления только для 2012 г. отмечается слабая отрицательная связь с атмосферным давлением, а в остальных случаях не отмечено.

Таким образом, корреляционный анализ данных рядов кажущегося сопротивления, уровня воды, температуры атмосферы и атмосферного давления показал наличие значимой связи между кажущимся сопротивлением и уровнем воды в Чиркейском водохранилище и отсутствие ее с метеоданными.

На рис. 4 приведен график кажущегося сопротивления с учетом всех данных, в том числе и скачкообразных изменений, которые были удалены для анализа его связи с изменением уровня водохранилища. Скачкообразные изменения электрических параметров горных пород в скважине большой амплитуды, которые не могут быть связаны с изменением уровня водохранилища, послужили поводом для сравнения их с сейсмическими событиями Кавказа и прилегающих к нему территорий Турции и Ирана, так как на них часто происходят сильные землетрясения, которые могут вызывать активизацию геодинамических процессов в районе Чиркейского водохранилища. В частности, авторами [8] показано, что сейсмические колебания от удаленных сильных землетрясений мира вызывают повышение сейсмичности района Камчат-

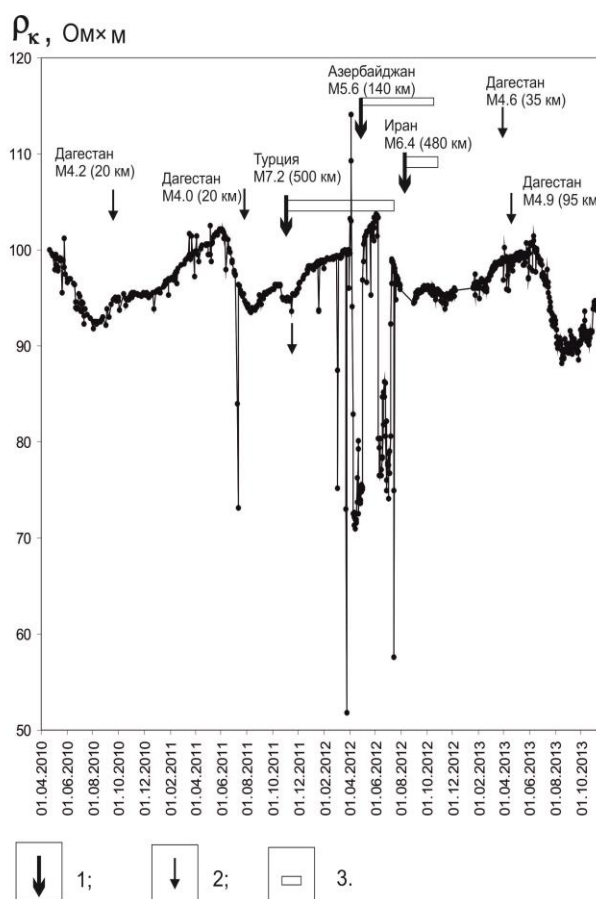


Рис. 4. График кажущегося сопротивления: 1 – сильные землетрясения с $M \geq 5.6$; 2 – землетрясения с $M \geq 4.5$, произошедшие недалеко от Чиркейского водохранилища; 3 – продолжительности афтершоковых периодов для сильных землетрясений

ки, т.е. земная кора переходит из устойчивого состояния в неустойчивое. Длительное воздействие колебаний от сильных землетрясений может вызвать раскрытие трещин в массиве горных пород и изменить его физические характеристики [9]. Поэтому для анализа связи скачкообразных изменений ρ_k с сейсмичностью на рис. 4 показаны времена сильных удаленных ($M \geq 6.0$) и относительно близких ($6 > M \geq 4.0$) землетрясений.

Обращает на себя внимание тот факт, что скачкообразные изменения ρ_k отмечены внутри афтершоковых периодов сильных землетрясений, произошедших в Турции и Азербайджане. Эти данные показывают, что колебания от удаленных сильных землетрясений и их афтершоков инициировали нелинейные деформационные процессы в исследуемом массиве горных пород.

По мнению автора работы [10], ступенчатые изменения электрических параметров могут быть обусловлены скачкообразным изменением состояния трещин, хотя природа самих скачкообразных процессов полностью не ясна. Отдельные авторы полагают, что это связано с переходом геофизической среды в неустойчивое состояние [10, 11].

Проведенный анализ данных показывает, что высокоточные непрерывные измерения кажущегося сопротивления пород позволяют регистрировать деформации земной коры, обусловленные сезонным изменением веса Чиркейского водохранилища. Переменная нагрузка веса водохранилища является дестабилизирующим фактором равновесного состояния локальной области земной коры в данном районе.

Выводы

1. В массиве горных пород в районе плотины Чиркейской ГЭС зарегистрированы скачкообразные изменения кажущегося сопротивления большой амплитуды в афтершоковый период сильных землетрясений в Турции и на Кавказе, характеризующие процесс деформирования горных пород, которые находятся в условиях неустойчивого равновесия.

2. Выявлена значимая корреляционная связь между изменением уровня воды в водохранилище и кажущимся сопротивлением массива горных пород в скважине ($K = -0.8$). Сезонные наполнения водохранилища 2010–2013 гг. приводят к уменьшениям кажущегося сопротивления на 6.1–11.2%, а в периоды уменьшений уровня воды оно увеличивается на 8.4–11.5%.

3. Увеличение нагрузки водохранилища вызывает раскрытие микротрещин в массиве, что приводит к уменьшению его кажущегося сопротивления, а при снятии нагрузки происходит обратный процесс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы). М.: ИНЭК. 2005. 252 с.
2. Идармачев Ш.Г., Черкашин В.И., Алиев И.А. и др. Возбужденная сейсмичность в районе Чиркейского водохранилища и ее проявление в геофизических полях. Махачкала: Изд-во «Алеф», 2012. 103 с.
3. Прогностические аномалии наведенной сейсмичности в области водохранилища Койна-Варна, Западная Индия / В.Г. Смирнов, R.K. Chadha, A.B. Пономарев, D. Srinagesh // Физика Земли. 2013. № 2. С. 94–109.
4. Черкашин В.И., Сабанаев К.А., Гаврилов Ю.О. Тектоническая карта Дагестана.- Махачкала: Изд-во «Алеф», 2012. 129 с.
5. Станция для электрического зондирования «Георезистор» / Ш.Г. Идармачев, М.М. Алиев, Ш.-С.О. Абдулаев, Б.А. Хаджи // Современная геодинамика, глубинное строение и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов: материалы Междунар. конф. Воронеж, 2001. С. 86–87.
6. Идармачев Ш.Г., Черкашин В.И., Алиев И.А. и др. Вариации электрических параметров горных пород в районе высотной плотины Чиркейской ГЭС как индикатор неустойчивого состояния среды // Надежность и безопасность энергетики. 2013. № 4 (23). С. 31–34.
7. Идармачев Ш.Г., Черкашин В.И., Алиев И.А. и др. Исследование вариаций кажущегося сопротивления горных пород в районе высоконапорной плотины Чиркейской ГЭС методом электрозондирования в скважине // Геология и геофизика Юга России. 2011. № 2. С. 41–49.
8. Соболев Г.А., Закрижевская Н.А. К вопросу о влиянии удаленных землетрясений на сейсмичность // Физика Земли. 2013. № 4. С. 29–42.
9. Кочарян Г.Г., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М. и др. Гидрогеологический отклик подземных коллекторов на сейсмические колебания // Физика Земли. 2011. № 12. С. 50–62.
10. Сидорин А.Я. Квазипериодические флуктуации геофизических полей при переходе среды в неустойчивое состояние // Изучение природы вариаций геофизических полей. М.: ИФЗ РАН, 1994. С. 70–89.
11. Журавлев В.И., Зейгарник В.А., Сидорин А.Я. Электромагнитные зондирования земной коры Гармского полигона одиночными импульсами. М.: ОИФЗ и ИВТ РАН, 1997. 203 с.

Поступила в редакцию 14.01.2014 г.

Принята к печати 18.03.2014 г.