

УДК 550.8.08

DOI: [10.46698/VNC.2020.69.97.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.69.97.006)

Оригинальная статья

## Влияние сезонного изменения уровня воды в Чиркейском водохранилище на кажущееся сопротивление пород Хадумского купола, расположенного в его окрестности

**А. В. Дещеревский**<sup>1</sup>, **Ш. Г. Идармачев**<sup>2</sup>, **И. Ш. Идармачев**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Россия, 123995, г. Москва, ул. Большая Грузинская, 10, корп. 2;

<sup>2</sup>Институт геологии Дагестанского федерального исследовательского центра Российской Академии наук, Россия, 367030, Республика Дагестан, Махачкала, ул. Ярагского, д. 75, e-mail: idarmacyev@yandex.ru

Статья поступила: 02.08.2020, после рецензирования: 22.09.2020, принята к публикации: 16.10.2020

**Резюме: Актуальность работы.** Природа возникновения техногенной сейсмичности в районах крупных водохранилищ остается пока мало изученной в силу отсутствия новых геофизических экспериментальных данных, за исключением сейсмологических. Вместе с тем крупномасштабный долговременный мониторинг в районах ГЭС позволяет исследовать механизм влияния водохранилища на окружающую среду. Один из таких экспериментов был проведен в районе Чиркейского водохранилища, расположенного на Северном Кавказе, в течение 9.5 лет с 1998 по 2007 гг. методом дипольного электрического зондирования. **Цель работы** – исследование техногенного влияния сезонных колебаний уровня водохранилища на окружающие его горные породы. **Метод исследований.** Для измерения кажущегося электрического сопротивления большого массива горных пород применялся метод глубинного дипольного электрического зондирования разносом диполей 5,6 км. Зондирование проводилось ежедневно. Для измерений использовалась специально разработанная аппаратура: цифровая приемная станция и генератор мощностью 25 кВт. **Результаты работы.** Изучено влияние сезонных изменений уровня воды в водохранилище на кажущееся электрическое сопротивление пород, расположенных в окрестности Чиркейской ГЭС, установлена связь с периодом максимальной скорости заполнения водохранилища. Предполагается, что сезонные вариации кажущегося сопротивления пород купола обусловлены деформацией вертикальных трещинных зон под воздействием изменяющейся нагрузки водохранилища. Процесс деформации вертикальных трещинных зон, расположенных между диполями измерительной установки, приводит к изменению их проводимости, вызывая, тем самым, в исследуемом массиве эффект «экранирования» поля питающего диполя от местоположения приемного диполя. Полученные данные показывают влияние изменения сезонной нагрузки Чиркейского водохранилища на окружающую среду, активизируя тем самым развитие опасных геологических процессов в районе водохранилища, подвижки по разломным зонам, обрушение неустойчивых скальных массивов, оползней, суффозий и др.

**Ключевые слова:** среднесезонная функция, кажущееся сопротивление горных пород, дипольная установка, питающий диполь, сезонные вариации, тензочувствительность.

**Для цитирования:** Дещеревский А.В., Идармачев Ш.Г., Идармачев И.Ш. Влияние изменения уровня воды в Чиркейском водохранилище на кажущееся сопротивление пород Хадумского купола, расположенного в его окрестности. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (4): 101 – 112. DOI: [10.46698/VNC.2020.69.97.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.69.97.006).

**Благодарности:** Работа выполнена по госзаданиям Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН №0144-2019-0011 и Института геологии ДФИЦ РАН № НИОКТР АААА-А17-117021310201-9.

DOI: [10.46698/VNC.2020.69.97.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.69.97.006)

Original paper

## Effect of seasonal changes in water level in Chirkey reservoir on the apparent resistivity of rocks of Khadumskiy dome, located in its surroundings

**A. V. Desherevsky**<sup>1</sup>, **Sh. G. Idarmachev**<sup>2</sup>, **I. Sh. Idarmachev**<sup>2</sup><sup>1</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10/1  
Bolshaya Gruzinskaya Str., Moscow 123242, Russian Federation;<sup>2</sup>Institute of Geology, Dagestan Federal Research Center, Russian Academy  
of Sciences, 75 Yaragskogo str., Makhachkala 367030, Russian Federation,  
e-mail: idarmachev@yandex.ru*Received: 02.08.2020, revised: 22.09.2020, accepted: 16.10.2020*

**Abstract: Relevance.** The nature of the occurrence of technogenic seismicity in the areas of large reservoirs remains poorly studied due to the lack of new geophysical experimental data, except for seismological ones. At the same time, large-scale long-term monitoring in HPP areas allows us to study the mechanism of the reservoir's impact on the environment. One of these experiments was conducted in the area of the Chirkey reservoir, located in the North Caucasus, for 9.5 years from 1998 to 2007 using the method of dipole electric sensing. **Aim.** The purpose of this work is to study the geodynamic process of rocks in the area of a large reservoir caused by seasonal fluctuations in its level. **Methods.** To measure the apparent electrical resistance of a large rock mass, the method of deep dipole electric sounding at a constant current with a measuring dipole distance of 5.6 km was used. Probing was conducted daily. The equipment, a digital receiving station and a 25 kW generator were specially designed for this purpose. **Result.** As a result of the analysis of the relationship between the data series of the apparent electrical resistance of a large rock mass located in the Northern vicinity of the Chirkey HPP and seasonal changes in the water level in the reservoir, a connection was established with the period of the maximum rate of filling of the reservoir. The mechanism of seasonal variations in apparent resistance is due to the deformation of rocks under the influence of changing reservoir load. The process of deformation of vertical crack zones located between the dipoles of the measuring unit leads to a change in their conductivity, thereby causing the effect of "shielding" the field of the feeding dipole from the location of the receiving dipole in the studied array. The obtained data show the impact of changes in the seasonal load of the Chirkey reservoir on the environment, activating the manifestation of dangerous geological processes in the reservoir area, the collapse of unstable rock massifs, landslides.

**Keywords:** average seasonal function, apparent resistance of rocks, dipole installation, feeding dipole, seasonal variations, strain sensitivity.

**For citation:** Desherevsky A.V., Idarmachev S.G., Idarmachev I.S. Influence of change of water level in Chirkey reservoir on the apparent resistivity of rocks Kadomskogo dome, located in its surroundings. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (4): 101 – 112. DOI: 10.46698/VNC.2020.69.97.006.

**Acknowledgments:** The work was carried out according to the state orders of the Institute of Physics of the Earth, RAS No. 0144-2019-0011 and the Institute of Geology, DFRC of RAS No. NIOKTR AAAA-A17-117021310201-9.

## Введение

Цель работы – исследование влияния уровня воды Чиркейского водохранилища на кажущееся сопротивление пород Хадумского купола. Электрические параметры горных пород являются наиболее чувствительными к деформации, как в упругом режиме сжатия-растяжения, так и в период подготовки разрушения. Высокая тензочувствительность по электрическому сопротивлению характерна для диапазона малых деформаций  $10^{-5}$ – $10^{-6}$ , при этом максимальные значения коэффициента тензочувствительности порядка  $10^5$ – $10^6$  достигаются, когда породы находятся в естественных условиях в земной коре [Honkura, 1976; Fitterman, Madden, 1977; Morrison et al., 1977, 1979; Searls et al., 1978; Milne, 1980; Qian, 1985; Morrison, Fernandez, 1986; Fuye et al., 1988; Panteleev, Gavrilov, 2015]. Поэтому электрические методы могут успешно применяться для исследования техногенных процессов в массивах горных пород в районе водохранилища. Так, например, анализ данных между сезонными вариациями уровня водохранилища и кажущимся сопротивлением небольшого блока пород, примыкающего к плотине Чиркейской ГЭС за 2010–2015 гг. показал, что коэффициент корреляции между ними равен  $-0,94$ , при этом временная задержка сопротивления от уровня воды составляет 12 суток. Это означает, что процесс фильтрации воды из водохранилища в окружающий массив требует определенного времени [Идармачев и др., 2019]. Эти данные показывают, что влияние на окружающую среду оказывает не только процесс заполнения крупного водохранилища на 100 и более метров, но и сезонные изменения уровня воды, достигающие 40 м. Влияние на геодинамический процесс оказывает также скорость изменения уровня воды в водохранилище. Резкое понижение уровня воды на различных водохранилищах мира приводило к образованию свищей в придонной области верхнего бьефа, образованию трещин в приконтактной зоне плотины [Savich, 1998]. Исследование этих процессов имеет не только научное значение в области изучения техногенного влияния человека на окружающую среду, но дает возможность практического применения экспериментальных результатов для повышения безопасности ГЭС.

Следует также отметить, что в районах с высокой тектонической активностью даже незначительное внешнее воздействие может привести к подвижкам блоков, если они находятся в условиях неустойчивого равновесия [Gavrilov et al., 2020]. Район Чиркейского водохранилища расположен именно в том месте, где блоки находятся в поле влияния крупных тектонических разломов трассирующихся вдоль западного побережья Каспия [Черкашин и др., 2012]. Данный район является высокосейсмичным, включая наведенную сейсмичность при заполнении водохранилища [Идармачев и др., 2019]. В период строительства ГЭС в 1970 г. здесь произошло одно из сильнейших землетрясений на Кавказе с магнитудой  $M=6,6$ . После заполнения в 1974 г. в его ближайших окрестностях произошло четыре землетрясения  $M=5,0$ – $5,7$ .

Для анализа связи между уровнем водохранилища (Нвдх) и кажущимся сопротивлением ( $R_k$ ) Хадумского купола использовались данные дипольного зондирования Дагестанского филиала Геофизической службы РАН за период 1999–2007 гг. [Даниялов и др., 2003]. Первоначальной целью наблюдений являлось изучение предвестников землетрясений. При этом один из перспективных подходов связывался с применением методов фликкер-шумовой спектроскопии [Descherevsky et al., 2003], поскольку анализ данных электрометрических наблюдений показывает,

что именно такой характер поведения сигналов является типичным для этих процессов [Descherevsky et al., 2000]. Однако закономерности техногенного влияния сезонного изменения уровня воды в водохранилище на электрические параметры горных пород, полученные позднее в районе плотины ГЭС, позволили предположить возможность сезонного геодинамического процесса для большого объема пород, как Хадумский купол.

### Метод исследований

Космоснимок района исследований показан на рисунке 1. Хадумский купол, расположен в северной окрестности Чиркейского водохранилища. Высотная отметка от уровня моря равна 900 м, а от уровня водохранилища – 680 м.

Река Сулак, на которой расположены 7 ГЭС на территории Дагестана, протекает в глубоком каньоне с обрывистыми бортами. Плотина самой крупной Чиркейской ГЭС имеет высоту 232 м, образуя водохранилище объемом 2,9 км<sup>3</sup> при максимальном уровне воды в водохранилище. Сезонное изменение уровня водохранилища составляет 40 м, при этом изменение объема воды равно 1,3 км<sup>3</sup>.

Дипольное зондирование осуществлялось на постоянном токе с использованием электрических диполей. Расположение генераторной и приемной станций пока-



Условные обозначения



Рис. 1. Космоснимок района Хадумского купола: 1 – места заземлений диполей; 2 – генератор; 3 – приемник. /

Fig. 1. Satellite Image of the Khadum dome area: 1 – dipole earthing points; 2 – generator; 3 – receiver.

зано на рисунке 1. Зондирование производилось ежедневно по сигналу точного времени в 12 часов с некоторыми перерывами в отдельные дни. Питающий диполь (Г) длиной 700 м располагался в южной части основания купола, а приемный диполь (П) – закреплен на вершине купола. Длина приемного диполя равна 150 м, при этом его азимутальное направление было выбрано с учетом максимального уровня сигнала. Для исключения утечек тока на линиях диполей провода подвешены на столбах с изоляторами. Расстояние между центрами излучающего и приемного диполей 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. Одновременно на питающей и приемной станциях производится запись зондирующих импульсов при помощи цифрового вольтметра Щ300 (класс точности 0,02) с цифрпечатью. Процесс обработки зондирования заключается в вычислении средних значений амплитуд тока в питающей линии (I) и разности потенциалов на приемной линии ( $\Delta U$ ). Величина  $R_k$  определяется по известной формуле:

$$R_k = K (\Delta U / I), (1)$$

где  $K$  – геометрический коэффициент дипольной установки, зависящий от расстояния и азимутального угла между диполями.

Среднеквадратичное отклонение результатов измерений не превышает  $\pm 5-6\%$ . В графическом виде результаты измерений представлены как отклонения  $R_k$  от его первоначально измеренного значения, выраженные в процентах. Более подробно методика измерений описана в работе [Идармачев, Алиев, 2013].

Графики кажущегося сопротивления и уровня Чиркейского водохранилища представлены на рисунке 2.

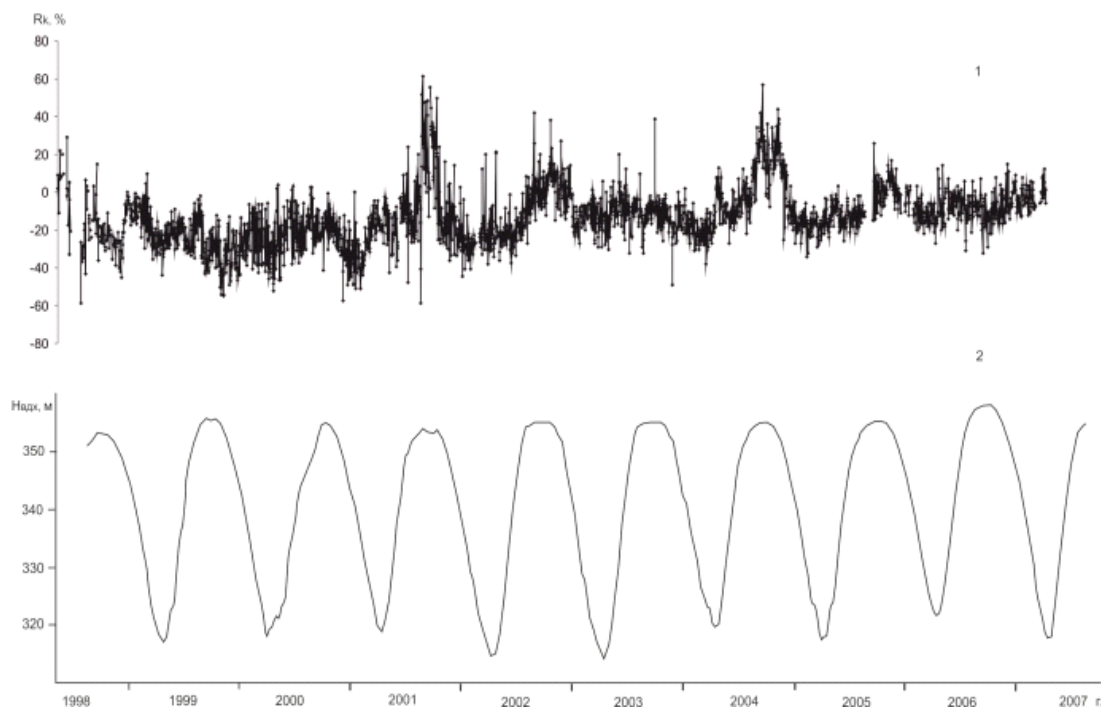


Рис. 2. Графики кажущегося сопротивления (1) и уровня водохранилища (2)

Fig. 2. Graphs of apparent resistance (1) and reservoir level (2)



Вначале для взаимного анализа данных была сделана интерполяция данных измерений уровня водохранилища к суточному шагу, одинаковому с шагом измерения  $R_k$ . Такая возможность имеется благодаря наличию 40-летнего (1976-2016 гг.) ряда измерений уровня, включающего многолетний период ежесуточных измерений уровня после 2010 г. Это позволяет оценить среднесезонную функцию [Дещеревский, Сидорин, 1999] измерений уровня, а затем использовать ее в качестве модели для интерполяции сигнала [Дещеревский и др., 2017].

### Анализ связи $R_k$ и уровня воды в водохранилище

Поскольку уровень воды имеет сильнейшую сезонную регуляцию (на нее приходится более 90% дисперсии ряда), анализ проводился по сезонным компонентам рядов.

Расчет сезонной компоненты  $R_k$  и Нвдхр проводился по методике [Дещеревский и др., 2016]. Эта методика предполагает расчет сезонной вариации методом наложения эпох с последующим сглаживанием. Цель сглаживания – подавление случайных высокочастотных флуктуаций среднесезонной функции (ССФ). Поэтому оптимальная величина сглаживания подбирается, исходя из степени variability сезонного хода от года к году, амплитуды высокочастотных шумов, числа периодов сезонности, по которым рассчитана ССФ.

Для ряда  $R_k$  среднесезонная функция рассчитывалась по стандартной схеме [Дещеревский, Сидорин, 1999]. В соответствии с указанными методическими оценками, окно сглаживания ССФ было выбрано равным 61 сут. На рисунке 3 показано сравнение ССФ  $R_k$  и ССФ Нвдх. Видно, что кривые сильно отличаются как по форме, так и по фазе.

Интересно, что ССФ  $R_k$  имеет сложную форму с двумя максимумами: основным в конце января – начале февраля и в августе, но с меньшей амплитудой. Аналогичная сложная форма сезонного хода кажущегося сопротивления в верхних слоях земной коры была ранее обнаружена при наблюдениях на Гармском полиго-

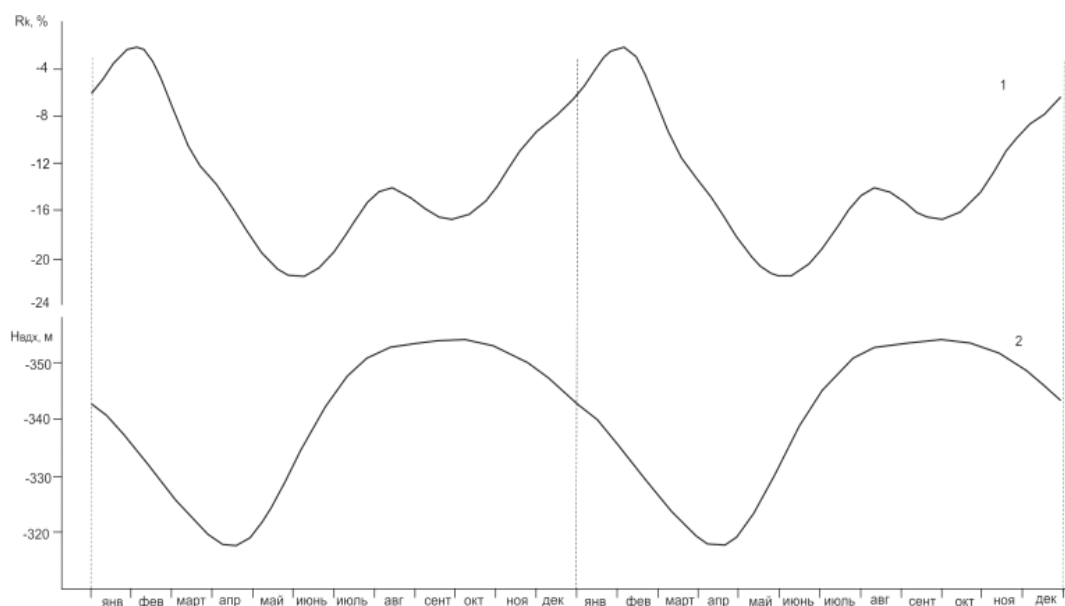


Рис. 3. Среднесезонные функции кажущегося сопротивления (1) и уровня водохранилища (2) /  
Fig. 3. Average seasonal function of apparent resistivity (1) and reservoir level (2)

не [Descherevsky, Sidorin, 2004; Дещеревский и др., 2018]. Формально оцененный сдвиг фаз составляет 80 сут. Максимум сопротивления достигается через 4 месяца после максимального уровня воды в водохранилище. Минимум сопротивления наблюдается в июне, через 2 месяца после минимума уровня воды в водохранилище. Вторичный (августовский) максимум сопротивления согласуется по фазе с завершением периода сезонного роста уровня воды в водохранилище. Однако его амплитуда намного меньше, чем у главного максимума сопротивления, а продолжительность во времени – намного короче, чем продолжительность летнего максимума уровня воды.

Таким образом, сезонные изменения сопротивления не могут быть объяснены в рамках модели, предполагающей увеличение или уменьшение обводненности пород в основании Хадумского купола, согласованной с изменениями уровня в водохранилище, и определяющей зависящее от этого процесса перераспределение зондирующего тока. В том числе, непригодной оказывается и гипотетическая модель, связывающая рост кажущегося сопротивления с увеличением проводимости нижнего горизонта, из-за чего токи «уходят вглубь» и напряжение на приемной линии падает.

Альтернативный вариант модели, основанной на прямом гидрологическом воздействии водохранилища на породы Хадумского купола, может включать, помимо обводненности, также параметр минерализации. Теоретически можно допустить, что породы в основании Хадумского купола находятся в зоне полного обводнения в течение всего года, однако минерализация подземных вод меняется в зависимости от скорости фильтрации. В рамках этой модели минерализация должна уменьшаться в период с июля по январь, когда уровень водохранилища и скорость фильтрации максимальны. С февраля по июнь скорость фильтрации меньше, и флюид успевает накопить в себе больше растворенных веществ в ходе фильтрации, из-за чего его проводимость возрастает. Однако такая модель тоже не очень хорошо согласуется с графиком сезонного хода сопротивления. Во-первых, резкий максимум сопротивления наблюдается в феврале, то есть задолго до того, как должен был бы наблюдаться максимальный уровень минерализации подземных вод. Во-вторых, в рамках этой модели совершенно необъясним августовский максимум сопротивления.

Таким образом, сезонные изменения сопротивления не могут быть объяснены в рамках модели, предполагающей увеличение или уменьшение минерализации воды, фильтрующейся через основание Хадумского купола из водохранилища.

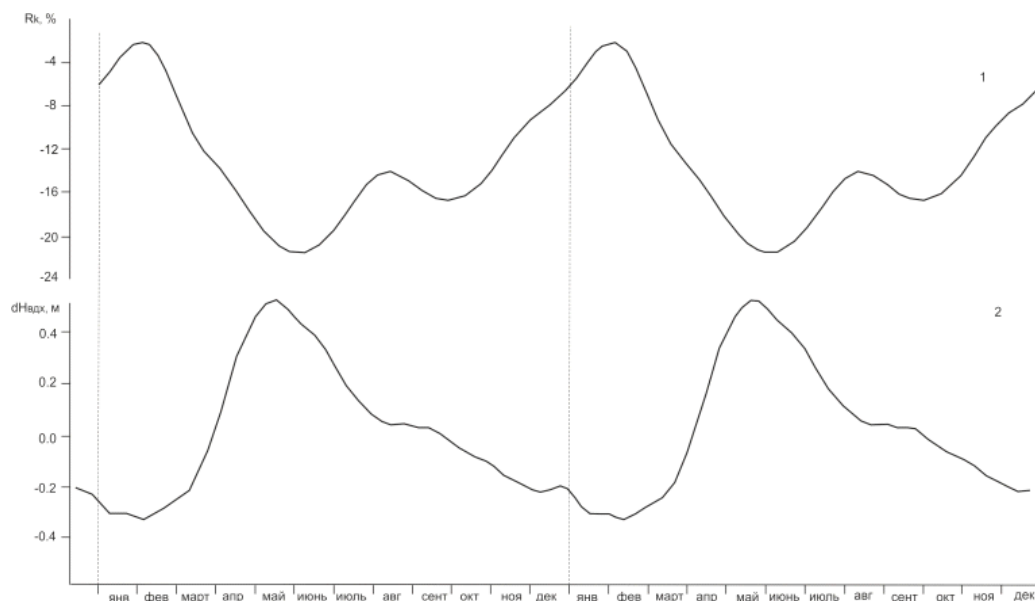
Поэтому для объяснения причин наблюдаемых сезонных изменений кажущегося сопротивления необходимо рассматривать иные модели.

#### Анализ сезонных компонент $R_k$ и приращений уровня воды в водохранилище

Весьма интересным и непонятным выглядит тот факт, что сопротивление очень хорошо согласуется (в противофазе) с изменениями уровня воды в водохранилище (рис. 4).

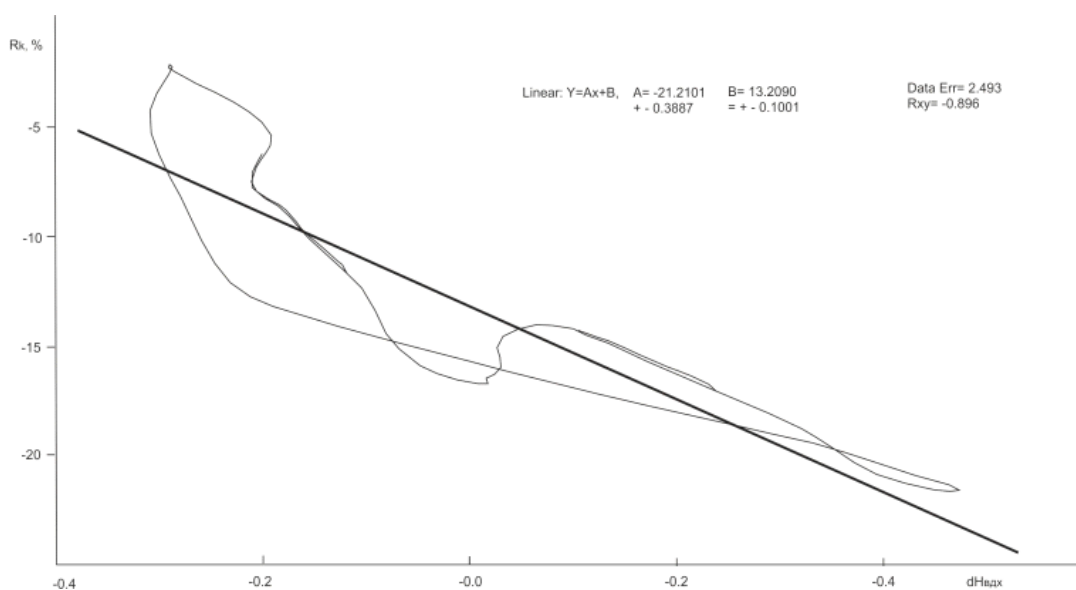
Регрессионная диаграмма двух этих параметров показана на рисунке 5.

Коэффициент корреляции достигает 0,90. Столь хорошее согласие между этими двумя параметрами трудно объяснить с позиций гидрологического эффекта, так как изменение уровня водохранилища определяется целой совокупностью факторов, каждый из которых должен влиять на сопротивление по-своему. Так, рост уровня



*Рис. 4. Среднесезонные функции кажущегося сопротивления (1) и приращений уровня водохранилища (2) /*

*Fig. 4. Average seasonal function of apparent resistivity (1) and increments the level of the reservoir (2)*



*Рис. 5. Регрессионная диаграмма кажущегося сопротивления и приращений уровня водохранилища /*

*Fig. 5. Regression diagram of apparent resistance and reservoir level increments*

связан в первую очередь с сильным притоком воды в водохранилище. Однако этот приток определяется преимущественно процессами в высокогорье (таяние снега и пр.), которые сами по себе никак не могут влиять на сопротивление в бесснежном среднегорном районе Хадумского купола. Уменьшение уровня связано с усиленной выработкой энергии на ГЭС, что обычно сопровождается увеличенным расходом воды в нижнем створе. Однако прямой связи между расходом воды (выработкой электроэнергии) и уровнем водохранилища, опять-таки, нет, поскольку уровень зависит не только от расхода воды, но и от ее притока. Так, летом выработка электро-



энергии близка к максимуму, но уровень не понижается, а сохраняет стабильность из-за высокого притока воды.

### Обсуждение возможных механизмов связи, альтернативных гидрологическим

Помимо гидрогеологических механизмов могут быть рассмотрены деформационные, связанные с нагрузкой водохранилища. В районе Чиркейской ГЭС с 1976 г. 11 предприятием ГУГК велись наблюдения по изучению вертикальных движений, связанных с эксплуатационным режимом водохранилища. В работе [Дейнега, 1989] приводятся данные повторных нивелировок на трех точках. Для 1976 г. сезонные изменения нивелировок составили 20-26 мм; 1977-4-6 мм; 1978-3 мм. Из них видно, что процесс деформации происходил сложным образом. Максимальная деформация происходила в начальный период заполнения водохранилища с 1974 по 1976 гг. (изменение уровня около 200 м), а в последующие годы сезонные колебания составили 38-40 м и соответственно сезонные деформации были в разы меньше.

Деформационный механизм влияния сезонной нагрузки водохранилища на кажущееся сопротивление может быть представлен геоэлектрической моделью, когда между питающим и приемным диполями расположена субвертикальная трещинная зона, сопротивление которой контрастно отличается от сопротивления окружающих пород. Тогда от сжатия – растяжения вертикальных трещинных зон будет меняться площадь электрического контакта блоков, расположенных между измерительными диполями. При отсутствии воды в трещинах воздушные прослойки могут служить своего рода изоляторами, вызывающими значительные изменения кажущегося сопротивления с амплитудой среднесезонных вариаций до 18%.

Результаты моделирования такого процесса в электролитической ванне с непроводящим экраном, расположенным между диполями в крест оси зондирования для различных типов дипольных установок, показали, что чувствительность к «экрану» осевой установки в три раза больше, чем экваториальной [Идармачев, Алиев, 2013]. Нами для зондирования как раз применялась осевая установка, которая обладает максимальной чувствительностью к «экрану» (см. рис. 1).

Таким образом, результаты лабораторного моделирования подтверждают возможность деформационного механизма влияния сезонных колебаний уровня Чиркейского водохранилища на породы Хадумского купола. Однако возможны и другие альтернативные механизмы, например, гидрогеологические.

### Выводы

1. Графики среднесезонных функций кажущегося сопротивления горных пород Хадумского купола и уровня воды в Чиркейском водохранилище имеют сложную форму и не позволяют объяснить связь в рамках фильтрационной модели, предполагающей увеличение или уменьшение обводненности пород в основании купола.

2. Для графиков кажущегося сопротивления горных пород и скорости изменения уровня воды в водохранилище коэффициент корреляции составляет 0,90, при этом связь не является случайной. Такую связь трудно объяснить фильтрационным эффектом, поэтому помимо гидрогеологических механизмов был предложен деформационный, связанный с нагрузкой водохранилища. В период быстрого роста уровня водохранилища в весенне-летнее время паводка рек дополнительная нагрузка приводит к деформации окружающих пород. Деформация вертикальных трещин,

расположенных между диполями, вызывает возникновение эффекта экранирования поля питающего диполя в результате проникновения в трещины атмосферного воздуха, который является изолятором. Механизм экранирования поля питающего диполя от приемного диполя подтверждается моделированием такого процесса в лабораторных условиях.

### Литература

1. Даниялов М. Г., Левкович Р. А., Амиров К. Р. и др. Сейсмический мониторинг территории Дагестана (1998–2002). – Махачкала: Лика, 2003. – 177 с.
2. Дейнега Г. И. Влияние переменных нагрузок на динамику деформационных процессов и вертикальных смещений земной коры в связи с эксплуатацией Чиркейского водохранилища. // Сб. статей Ин-та геол. Дагестанского филиала АН СССР. Вопросы сейсмичности Восточного Предкавказья. – Махачкала. – 1989. – Вып. 40. – С. 51-58.
3. Дещеревский А. В., Сидорин А. Я. Некоторые вопросы методики оценки среднесезонных функций для геофизических данных. – М.: ОИФЗ РАН, 1999. – 40 с.
4. Дещеревский А. В., Журавлев В. И., Никольский А. Н., Сидорин А. Я. Проблемы анализа временных рядов с пропусками и методы их решения в программе WinABD. // Геофизические процессы и биосфера. – 2016. – Т. 15. №3. – С. 5-34. DOI: 10.1134/S0001433817070027.
5. Дещеревский А. В., Журавлев В. И., Никольский А. Н., Сидорин А. Я. Анализ ритмов в экспериментальных сигналах. // Геофизические процессы и биосфера. – 2017. – Т. 16. №2. – С. 55-73. DOI: 10.21455/GPB2017.2-2.
6. Дещеревский А. В., Модин И. Н., Сидорин А. Я. Сезонные вариации удельного электрического сопротивления в верхних слоях земной коры. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2018. – Т. 43. – №3. – С. 68-83. DOI: 10.21455/VIS2018.3-6.
7. Идармачев И. Ш., Дещеревский А. В., Идармачев Ш. Г. Оценка связи между изменением уровня воды в Чиркейском водохранилище и электрическим сопротивлением пород правобережья плотины ГЭС. // Гидротехническое строительство. – 2019. – №3. – С. 25-31.
8. Идармачев Ш. Г., Мусаев М. А., Идармачев И. Ш. Сейсмичность района Чиркейского водохранилища. // Геориск. – 2019. – Т. XIII. №3. – С. 18-29. <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2019-13-3-18-29>.
9. Идармачев Ш. Г., Алиев М. М. Вариации кажущегося электрического сопротивления горных пород в период Кизилюртовского землетрясения 1999 г. в Дагестане. // Геофизические исследования. – 2013. – Т. 14. №2. – С. 15-24.
10. Черкашин В. И., Сабанаев К. А., Гаврилов Ю. О. Тектоническая карта Дагестана. – Махачкала: Изд. «Aleph», 2012. – 129 с.
11. Desherevskii A. V., Modin A. V., Sidorin A. Y. Seasonal Variations in Specific Resistivity in the Upper Layers of the Earth Crust. // Seism. Instr. – 2019. – Vol. 55. – No. 3. – pp. 300-312.
12. Desherevskii A. V., Modin A. V., Sidorin A. Y. Published in Engineering seismology issues. – 2018. – Vol. 43. – No. 3. – pp. 68-83. DOI: 10.3103/S0747923919030058
13. Descherevsky A. V., Lukk A. A., Sidorin A. Ya. Evidences of self-organization in geophysical fields' temporal variations. // Phys. Chem. Earth (A). – 2000. – Vol. 25. – No. 12. – pp. 775-779. DOI: 10.1016/S1464-1895 (01) 00004-7.
14. Descherevsky A. V., Lukk A. A., Sidorin A. Ya., Vstovsky G. V. and Timashev S. F. Flicker-noise spectroscopy in earthquake prediction research. // Natural Hazards and Earth System Sciences, EGU. – 2003. – Vol. 3. – No. 3. – pp. 159-164.
15. Descherevsky A. V., Sidorin A. Ya. Seasonal variations in natural processes and atmospheric precipitation. Annals of Geophysics. – 2004. – Vol. 47. No. 1. – pp. 73-81.
16. Fuye Q., Yulin Z., Tongchun X. An analysis of the seasonal variation of disturbance in georesistivity. // Actaseismologica Sinica. – 1988. – Vol. 1. No. 3. – pp. 69-83.
17. Gavrilov V. A., Panteleev I. A., Descherevskii A. V., Lander A. V., Morozova Yu. V.,

Buss Yu. Yu., Vlasov Yu. A. Stress – Strain State Monitoring of the Geological Medium Based on The Multi-instrumental Measurements in Boreholes: Experience of Research at the Petropavlovsk-Kamchatskii Geodynamic Testing Site (Kamchatka, Russia). // *Pure and Applied Geophysics*. – 2020. – Vol. 177 (1). – pp. 397-419. DOI: 10.1007/s00024-019-02311-3.

18. Honkura Y. Perturbation of the electric current by a resistivity anomaly and its application to earthquake prediction. // *J. Geomag. and Geoelectr.* – 1976. – Vol. 28. No. 1. – pp. 47-57.

19. Fitterman D. V., Madden T. R. Resistivity observations during creep events at Melendy Ranch, California. // *J. Geophys. Res.* – 1977. – Vol. 82. No. 33. – pp. 5401-5408.

20. Morrison H. F., Corwin R. F., Chung M. High-accuracy determination of temporal variations in crustal resistivity in earth's crust. // *Amer. Geophys. Union Monograph*. – 1977. – Vol. 20. – pp. 67-83.

21. Morrison H. F., Fernandez R., Corwin R. F. Earth resistivity, self-potential variations and earthquakes: a negative result for M-4.0. // *J. Geophys. Res. Lett.* – 1979. – Vol. 6. No. 3. – pp. 139-142.

22. Milne J. Earthquakes in connection with electric and magnetic phenomena. // *Trans. Seismol. Soc. Japan*. – 1980. – Vol. XV. – pp. 135-162.

23. Morrison H. F., Fernandez R. Temporal variations in the electrical resistivity of the Earth's crust. // *J. Geophys. Res.* – 1986. – Vol. 91. No. B-11. – pp. 618-628.

24. Pantelev I. A., Gavrilov V. A. Implications of electrokinetic processes for the intensity of geoaoustic emission in the time vicinity of a tectonic earthquake: A theoretical study. *Russian Journal of Earth Science*. – <https://doi.org/10.2205/2015ES000557>.

25. Qian J. Regional study of the anomalous change in apparent resistivity before the Tangshan earthquake (M=7.8, 1976) in China. // *Pure and Appl. Geophys.* – 1985. – Vol. 122. – pp. 901-910.

26. Savich A. I., Bronshtein V. I., Ilyin M. M., Laschenov S. Y., Stepanov V. V. Monitoring of regional and local geodynamic processes in areas of high dams in C. I. S. // *Proceedings of the Workshop: Geodynamical hazards associated with large dams, Conseil del'Europe, Nov. 10-12, 1997. – Luxembourg. – 1998. – pp. 163-182.*

## References

1. Daniyalov M. G., Levkovich R. A., Amirov K. R. and others. Seismic monitoring of the territory of Dagestan (1998-2002). Makhachkala. Lika, 2003. 177 p. (In Russ.)

2. Deynega G. I., Influence of variable loads on the dynamics of deformation processes and vertical displacements of the earth's crust in connection with the operation of the Chirkei reservoir. Collection of articles In-TA GEOL. Dagestan branch of the USSR Academy of Sciences. Questions of seismicity of the Eastern Caucasus. Makhachkala, 1989. Vol. 40. pp. 51-58. (In Russ.)

3. Descherevsky A. V., Sidorin A. Ya. Some problems of the method of estimating the average seasonal functions for geophysical data. Moscow. OIFZ RAS, 1999. 40 p. (In Russ.)

4. Descherevsky A. V., Zhuravlev V. I., Nikolsky A. N., Sidorin A. Ya. Problems in Analyzing Time Series with Gaps and Their Solution with the WinABD Software Package. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2017. Vol. 53. No. 7. pp. 659-678. DOI: 10.1134/S0001433817070027. (In Russ.)

5. Descherevsky A. V., Zhuravlev V. I., Nikolsky A. N., Sidorin A. Ya. Analysis of Rhythms in Experimental Signals. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2017. Vol. 53. No. 8. pp. 847-858. DOI: 10.1134/S0001433817080035. (In Russ.)

6. Descherevskii A. V., Modin A. V., Sidorin A. Y. Seasonal Variations in Specific Resistivity in the Upper Layers of the Earth Crust. *Seism. Instr*, 2018. Vol. 43. No. 3. pp. 68-83. (In Russ.)

7. Idarmachev I. Sh., Descherevsky A. V., Idarmachev Sh. G. Assessment of the Relationship Between Water Level Changes in the Chirkei Reservoir and Electrical Resistivity of Rocks in the Right Bank Region of the Hydropower Plant Dam. *Power Technology and Engineering*. September 2019. Vol. 53. Issue 3. pp. 278-283. DOI: 10.1007/s10749-019-01071-3 (In Russ.)

9. Idarmachev I. S., Musayev M. A., Idarmachev S. G., The seismicity of the area of Chirkey reservoir. *Georisk*, 2019. Volume XIII. No 3. pp. 18-29. <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2019-13-3-18-29> (In Russ.)
9. Idarmachev S. G., Aliev M. M., Variations of the apparent electrical resistance of rocks during the Kizilyurt earthquake of 1999 in Dagestan. *Geophysical survey*, 2013. Vol. 14. No. 2. pp. 15-24. (In Russ.)
10. Cherkashin V. I., Sabaneev K. A., Gavrilov Yu. O. Tectonic map of Dagestan. Makhachkala, 2012. 129 p. (In Russ.)
11. Desherevskii A. V., Modin A. V., Sidorin A. Y. Seasonal Variations in Specific Resistivity in the Upper Layers of the Earth Crust. *Seism. Instr.*, 2019. Vol. 55. No. 3. pp. 300-312.
12. Desherevskii A. V., Modin A. V., Sidorin A. Y. Published in Engineering seismology issues, 2018. Vol. 43. No. 3. pp. 68-83. DOI: 10.3103/S0747923919030058.
13. Descherevsky A. V., Lukk A. A., Sidorin A. Ya. Evidences of self-organization in geophysical fields temporal variations. *Phys. Chem. Earth (A)*, 2000. Vol. 25. No. 12. pp. 775-779. DOI: 10.1016/S1464-1895(01)00004-7.
14. Descherevsky A. V., Lukk A. A., Sidorin A. Ya., Vstovsky G. V., Timashev S. F. Flicker-noise spectroscopy in earthquake prediction research. *Natural Hazards and Earth System Sciences, EGU*, 2003. Vol. 3. No. 3. pp. 159-164.
15. Descherevsky A. V., Sidorin A. Ya. Seasonal variations in natural processes and atmospheric precipitation. *Annals of Geophysics*. 2004. Vol. 47. No. 1. pp. 73-81.
16. Fuye Q., Yulin Z., Tongchun X. An analysis of the seasonal variation of disturbance in georesistivity. *Actaseismologica Sinica*. 1988. Vol. 1. No. 3. pp. 69-83.
17. Gavrilov V. A., Panteleev I. A., Descherevskii A. V., Lander A. V., Morozova Yu. V., Buss Yu. Yu., Vlasov Yu. A. Stress – Strain State Monitoring of the Geological Medium Based on The Multi-instrumental Measurements in Boreholes: Experience of Research at the Petropavlovsk-Kamchatskii Geodynamic Testing Site (Kamchatka, Russia). *Pure and Applied Geophysics*, 2020. Vol. 177 (1). pp. 397-419. DOI: 10.1007/s00024-019-02311-3.
18. Honkura Y. Perturbation of the electric current by a resistivity anomaly and its application to earthquake prediction. *J. Geomag. and Geoelectr.* 1976. Vol. 28. No. 1. pp. 47-57.
19. Fitterman D. V., Madden T. R. Resistivity observations during creep events at Melendy Ranch, California. *J. Geophys. Res.* 1977. Vol. 82. No. 33. pp. 5401-5408.
20. Morrison H. F., Corwin R. F., Chung M. High-accuracy determination of temporal variations in crustal resistivity in earth's crust. *Amer. Geophys. Union Monograph*. 1977. Vol. 20. pp. 67-83.
21. Morrison H. F., Fernandez R., Corwin R. F. Earth resistivity, self-potential variations and earthquakes: a negative result for M-4.0. *J. Geophys. Res. Lett.* 1979. Vol. 6. No. 3. pp. 139-142.
22. Milne J. Earthquakes in connection with electric and magnetic phenomena. *Trans. Seismol. Soc. Japan*. 1980. Vol. XV. pp. 135-162.
23. Morrison H. F., Fernandez R. Temporal variations in the electrical resistivity of the Earth's crust. *J. Geophys. Res.* 1986. Vol. 91. No. B-11. pp. 618-628.
24. Panteleev I. A., Gavrilov V. A. Implications of electrokinetic processes for the intensity of geoacoustic emission in the time vicinity of a tectonic earthquake: A theoretical study. *Russian Journal of Earth Science*. <https://doi.org/10.2205/2015ES000557>.
25. Qian J. Regional study of the anomalous change in apparent resistivity before the tangshan earthquake (M=7.8, 1976) in China. *Pure and Appl. Geophys.* 1985. Vol. 122. pp. 901-910.
26. Savich A. I., Bronshtein V. I., Ilyin M. M., Laschenov S. Y., Stepanov V. V. Monitoring of regional and local geodynamic processes in areas of high dams in C. I. S. Proceedings of the Workshop: Geodynamical hazards associated with large dams, *Conseildel'Europe*, Nov. 10-12, 1997. Luxembourg. pp. 163-182.