



**Идармачев Ибрагим Шамильевич**

**ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГОРНЫХ ПОРОД  
В РАЙОНЕ ПЛОТИНЫ ЧИРКЕЙСКОЙ ГЭС, СВЯЗАННЫЕ  
С ГЕОДИНАМИЧЕСКИМИ И СЕЙСМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

Специальность: 25.00.10. – Геофизика,  
геофизические методы поисков полезных ископаемых

**Автореферат**  
Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в лаборатории геодинамики и сейсмологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии Дагестанского научного центра Российской академии наук (ИГ ДНЦ РАН), г. Махачкала

**Научный руководитель:**

**Абдулаев Ших-Саид Омаржанович**

доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории геодинамики и сейсмологии, Институт геологии Дагестанского научного центра РАН, профессор

**Официальные оппоненты:**

**Соловьев Сергей Петрович**

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории приповерхностной геофизики, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер РАН, г. Москва

**Казначеев Павел Александрович**

кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории физики землетрясений и неустойчивости горных пород, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

**Ведущая организация:**

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Геофизический институт Владикавказского научного  
центра РАН, г. Владикавказ**

**Защита диссертации** состоится «16» ноября 2017 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.001.01, при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института [www.ifz.ru](http://www.ifz.ru). Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при министерстве образования и науки Российской Федерации [vak.ed.gov.ru](http://vak.ed.gov.ru) и на сайте ИФЗ РАН.

**Отзывы на реферат**, заверенные печатью, в 2-ух экземплярах направлять по адресу: 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр. 1, ИФЗ РАН, ученому секретарю диссертационного совета Владимиру Анатольевичу Камзолкину.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

кандидат геолого-минералогических наук



В. А. Камзолкин

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность

Связь землетрясений с заполнением крупных водохранилищ в различных частях мира вызвала интерес не только в научном мире, но и серьезную озабоченность правительств СССР, Китая, Индии, США и др. [Rothe, 1970]. В СССР проблема возникновения землетрясений в районах, где были построены крупные ГЭС, была определена как приоритетная [Николаев, 1977]. Были начаты исследования с целью выяснить механизм землетрясений на всех крупных ГЭС Сибири, Кавказа и Средней Азии. На Нурекской ГЭС в Таджикистане исследования проводились совместно с США [Симпсон, Соболева, 1976]. При Межведомственном совете по сейсмологии и сейсмостойкому строительству была организована рабочая группа по изучению влияния деятельности человека на сейсмический режим.

В настоящее время внимание исследователей различных стран к проблеме сейсмичности в районах крупных водохранилищ не ослабевает. В этом позволяют убедиться последние публикации ученых Индии и России [Смирнов, Chadha и др., 2013; Адушкин, Турунтаев, 2005; Мирзоев, Николаев и др., 2013; Марчук, 2010; Николаев и др., 2008; Негматуллаев и др., 2013].

Актуальность исследования техногенных землетрясений 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 представляют собой грандиозный эксперимент искусственного воздействия на земную кору.

## Цель работы

Целью диссертационной работы являлось решение фундаментальной проблемы экологической безопасности окружающей среды в районах крупных водохранилищ, расположенных в сейсмоактивных областях.

Для достижения поставленной цели были решены следующие основные задачи:

- 1) создание физически обоснованной модели влияния сезонных колебаний уровня воды в водохранилище на окружающую среду на примере Чиркейского водохранилища;
- 2) исследование геодинамических процессов в горных массивах, прилегающих к плотине ГЭС;
- 3) обоснование нового метода наблюдений за электрическими параметрами горных пород в скважине для оценки развития опасных геологических процессов вблизи ГЭС.

## Защищаемые положения

1. Достоверная оценка влияния сезонных факторов на результаты режимных измерений кажущегося сопротивления пород в скважине, расположенной в зоне активного воздействия крупного водохранилища.

2. Закономерности техногенного влияния сезонного изменения уровня воды в водохранилище на электрические параметры горных пород, расположенных в зоне обходной фильтрации плотины ГЭС

3. Методология и аппаратный комплекс для долговременных режимных наблюдений за электрическими параметрами горных пород в скважине, повышающий точность оценки развития опасных геологических процессов в районах крупных ГЭС.

### **Научная новизна:**

1. На основе анализа длительных рядов метеорологических, гидрологических, термометрических, сейсмологических и электрометрических данных с помощью программы обработки WinABD развит метод наблюдений за геодинамическими процессами в районах крупных ГЭС.

Комплексная методика наблюдений включает в себя:

– выбор места и способа размещения системы электродов и датчиков для комплексного мониторинга геодинамических явлений в опорном блоке пород плотины Чиркейской ГЭС;

– создание измерительного комплекса, работающего в непрерывном режиме в течение многих лет, и обеспечивающего получение, накопление и обработку поступающих данных;

– разработку алгоритмов и методики обработки получаемых данных для изучения явлений и процессов в контролируемом блоке пород.

2. С помощью программы обработки длительных временных рядов WinABD установлен факт влияния сезонного изменения уровня водохранилища на электрические параметры пород в скважине в зоне обходной фильтрации плотины Чиркейской ГЭС.

3. Установлено, что метеофакторы, температура воды в скважине и минерализация воды в водохранилище, имеющие сезонный ход, не оказывают заметного влияния на кажущееся сопротивление пород в скважине.

4. Сейсмические события под водохранилищем и сильные землетрясения в районе Чиркейской ГЭС приводят к нарушению сезонного хода кажущегося сопротивления, которое проявляется в его уменьшении в результате изменения состояния системы трещин в массиве. Процесс уменьшения сопротивления связан с увеличением трещинного объема породы и заполнением его водой, удельное сопротивление которой на порядок ниже, чем у породы.

### **Практическая значимость работы**

Результаты диссертационной работы позволяют рекомендовать методику и аппаратуру для непрерывных измерений электрических характеристик горных пород в скважине для проведения длительных наблюдений за геодинамическими процессами, происходящими в районах плотин крупных ГЭС в целях оценки техногенного воздействия водохранилища.

Получены данные о том, что близкие сильные землетрясения оказывают негативное воздействие на массивы горных пород, расположенных в бортах плотины ГЭС, например, приводят к длительным деформациям в массиве. Процесс деформации пород сопровождается уменьшением кажущегося сопротивления. В одном случае после сильного близкого землетрясения амплитуда аномального уменьшения кажущегося сопротивления составила 29%. Такого порядка вариации кажущегося сопротивления породы являются характерными для деформаций, близких к разрушающим. Несмотря на то что такие аномальные эффекты были зарегистрированы в небольшом объеме пород в скважине, эти данные могут служить основанием для организации непрерывного контроля за состоянием больших массивов в бортах плотины ГЭС всеми возможными методами геофизического контроля, в том числе и электрометрическими.

Район расположения Сулакского каскада ГЭС, состоящего из Чиркейской, Миатлинской и Кизилюртовской, находятся в самой сейсмоопасной зоне Кавказа, в непосредственной близости от которой в течение последних 43 лет произошли четыре сильных землетрясения. Поэтому результаты, полученные в работе, могут быть применены на Миатлинской, Чирюртовской ГЭС для организации наблюдений за электрическими параметрами в едином комплексе геофизических, геодезических и гидрологических наблюдений.

### **Фактический материал**

В основу работы положены результаты геофизических наблюдений в двух скважинах, расположенных в районе плотины Чиркейской ГЭС, полученные Институтом геологии Дагестанского НЦ РАН и Дагестанским филиалом Единой геофизической службы РАН, за период 2010–2015 гг. Также для анализа использовались данные службы наблюдения дирекции Чиркейской ГЭС и Дагестанского метеорологического центра. В работе использовались данные измерений разности потенциалов на приемном диполе установки электрического зондирования, рассчитанные по методике автора, за период с 2012 по 2015 гг. Для повышения точности измерения разности потенциалов электроды были усовершенствованы с тем, чтобы снизить поляризационные эффекты, возникающие при контакте воды с металлом.

### **Апробация работы и публикации**

Результаты исследований докладывались на:

- 1) Международной научной конференции «Вопросы образования и науки в XXI веке». Часть 5. Министерство образования и науки РФ. г. Тамбов. 29 апреля 2013 г.;
- 2) VIII Международной сейсмологической школе «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных» г. Геленджик. 16–20 сентября 2013 г.;
- 3) Уральской молодежной научной школе по геофизике. Ин-т геофизики УрОРАН. г. Екатеринбург. 24–29 марта 2014 г.;

- 4) IV Международной научно-практической конференции «Опасные природные и техногенные геологические процессы на горных и предгорных территориях Северного Кавказа». г. Владикавказ. 22–24 сентября 2014 г.;
- 5) Международной научно-практической конференции «Почвы аридных территорий и проблемы охраны их биологического разнообразия». г. Махачкала. 27–29 мая 2014 г.;
- 6) X Международной сейсмологической школе «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных». г. Новханы, Азербайджан. 14–18 сентября 2015 г.;
- 7) XI Международной сейсмологической школе «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных». Чолпон-Ата, Кыргызстан. 11–17 сентября 2015 г.;
- 8) XVII Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования о науках о Земле». ИФЗ РАН. г. Москва. 26–30 сентября 2016 г.

Всего по теме диссертации у автора имеется 16 публикаций, из которых 7 статей в журналах, включенных в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертации.

### **Объем и структура работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Содержание, изложенное на 167 страницах, включает 100 рисунков, 7 таблиц и 3 приложения. Список использованной литературы содержит 160 библиографических источников.

### **Личный вклад автора**

1. Создана база данных: метеорологических показателей, уровней воды в водохранилище и скважинах, расположенных возле плотины Чиркейской ГЭС, температуры воды, кажущегося сопротивления пород и электрического поля в скважинах, каталога землетрясений, произошедших в радиусе до 100 км от плотины. Автором дополнены недостающие для анализа метеоданные для района расположения ГЭС путем построения различных математических моделей взаимосвязи с данными ближайшей метеостанции. Собрано более 9000 данных.

2. В общей сложности в процессе работ исследовано влияние осадков, температуры, давления атмосферы, температуры воды в скважине и уровня воды в водохранилище на кажущееся сопротивление и электрическое поле. Изучена связь с сейсмическими событиями района.

3. На всех этапах работ: от постановки задачи, сбора данных, выполнения измерений отдельных параметров недостающих данных до анализа и опубликования результатов – автор выступал как непосредственный исполнитель исследований.

## **Благодарности**

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю д-ру тех. наук, профессору Ш.-С. О. Абдулаеву и директору Института геологии Дагестанского НЦ РАН д-ру геол.-мин. наук В. И. Черкашину за постоянное внимание и поддержку проводимых исследований. Автор признателен ведущему инженеру М. А. Мусаеву за оказанную помощь в процессе выполнения диссертационной работы. Особую признательность выражаю ведущему научному сотруднику Института физики Земли канд. физ.-мат. наук А.В. Дещеревскому за неоценимую помощь, оказанную при обработке временных рядов и предоставленную программу WinABD.

# ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

## Введение

Обосновывается актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследований, основные защищаемые положения, практическая значимость, представлена структура работы и ее апробация.

**Глава 1** посвящена обзору литературы по тематике: «Изученность электрических свойств горных пород при их деформировании». Анализ данных литературы электрических параметров горных пород при их деформации позволяет сделать следующие выводы:

1) электрические параметры являются наиболее чувствительными в различных режимах деформации, как в условиях упругого сжатия, 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  $10^5$ – $10^6$  достигается, когда породы находятся в естественных условиях;

2) данные, полученные методом дипольного зондирования в районах водохранилищ, показывают неоднозначность результатов наблюдений за кажущимся электрическим сопротивлением больших массивов горных пород и сложность их интерпретации с режимом уровня воды в водохранилище. Следует также отметить сложность в организации длительных непрерывных наблюдений в связи с отсутствием специальной измерительной аппаратуры;

3) Использование скважинных методов наблюдений за электрическими параметрами горных пород имеет ряд преимуществ перед другими методами, например, позволяет минимизировать влияние метеопомех, прежде всего осадков, обеспечивать стабильные температурные условия в области расположения измерительной установки, что является необходимым условием при проведении длительных режимных наблюдений.

**Глава 2** представляет сведения о геологическом и тектоническом строении района Чиркейского водохранилища. По данным [Черкашин и др., 2012], в северной части от водохранилища на расстоянии 15–20 км расположен «узел», где пересекается целая серия разломов Северо-Восточного Кавказа, такие, как Срединный, Владикавказский, Прибрежный, Дербентский. В работе авторов [Идармачев, Арефьев, 2010] показано, что район Чиркейской ГЭС является зоной максимальной концентрации эпицентров землетрясений на территории Дагестана. В прошлом столетии за период времени 1970–1999 гг. в окрестностях Чиркейской ГЭС произошли сильные землетрясения с магнитудой  $M=5.0$ – $6.6$ . В период наполнения водохранилища произошла серия сильных землетрясений с  $M=5.0$ – $5.2$  на расстоянии 5–10 км от центра водохранилища, которые привели к обвальным процессам в каньоне р. Сулак и разрушению строений отдельных населенных пунктов, расположенных в эпицентральной зоне. Сейсмичность района Чиркейского водохрани-



лица по настоящее время остается высокой, несмотря на то что с начала заполнения прошло уже 40 лет.

**Глава 3** посвящена геоэлектрическим исследованиям. Для проведения исследований был выбран массив горных пород вблизи плотины Чиркейской ГЭС (рис. 1) с размерами 600 х 400 м, который примыкает к правому борту высотной плотины. На данном участке строителями ГЭС были пробурены две скважины с глубинами 120 м и 180 м для наблюдения за боковой фильтрацией воды из водохранилища в период его заполнения. Уровни воды в скважинах имеют синхронный ход с уровнем водохранилища с некоторым отставанием по амплитуде. Фильтрация воды происходит по трещинным зонам массива.

Исследуемый массив пород мощностью 450 м сложен из горизонтально залегающих пачек плотных известняков верхнего мела, мощность которых меняется в пределах 0.3–1.5 м. При деформации массива состояние трещин меняется: сжатие приводит к росту электрического сопротивления и уменьшению боковой фильтрации, а раскрытие трещин – к обратному процессу. Таким образом, электрические параметры исследуемого массива позволяют отслеживать деформации, происходящие в нем под действием различных факторов: тектонических напряжений, землетрясений, сезонных изменений уровня воды в водохранилище и др.



**Рис. 1.** Фото участка правого борта плотины Чиркейской ГЭС (места расположения скважин № 1 и № 2 отмечены звездочками)

Для наблюдений за электрическими параметрами горных пород в скважине применяется симметричная четырехэлектродная установка электрического зонди-

рования, представляющая собой зонд с закрепленными на нем свинцовыми электродами. Расстояние между питающими электродами равно 9 м. Приемные электроды расположены посередине между питающими электродами. Измерительный зонд всегда находится ниже уровня воды в скважине. Питающие электроды расположены на глубине 90 м и 99 м, при этом верхний электрод всегда находится ниже минимального уровня воды в скважине на 30 м. Расстояние между питающими электродами выбиралось таким образом, чтобы ток, который течет по воде в скважине между электродами, был минимальным, а основной ток от электродов растекался по породе. Реальный ток, протекающий через породу, превышает в 40 раз величину тока по воде, заключенной в скважине. Влияние, оказываемое сопротивлением воды в скважине на кажущееся сопротивление породы, будет минимальным, если учесть, что температура воды в скважине на глубине 90 м практически не зависит от температуры на поверхности.

Для измерения кажущегося сопротивления ( $R_k$ ) используется установка «Георезистор», разработанная в Федеральном государственном бюджетном управлении науки Институт геологии Дагестанского научного центра РАН (ИГ ДНЦ РАН), которая состоит из платы сбора данных серии ЛА-И24, сопряженной с персональным компьютером, программы управления измерениями кажущегося сопротивления, генератора импульсов. Она обеспечивает непрерывный режим измерений, высокую чувствительность к вариациям кажущегося сопротивления пород. Длительность измерений одного сеанса равна 59 минутам. В конце каждого часа полученный массив данных обрабатывается соответствующей программой, а результаты измерений сохраняются на жестком диске. Относительная погрешность измерений за суточный период не превышает  $\delta=0.18\%$ .

Для анализа использовались ряды данных кажущегося сопротивления ( $R_k$ ) в скв. № 1 (см. рис. 1), электрического поля (ЕП) и температуры воды в скв. № 2 ( $T_{скв.}$ ), естественного электрического поля (ЕП) в скв. № 1, уровня воды в водохранилище ( $H_{вдхр.}$ ), температуры атмосферы ( $T_{атм.}$ ), давления атмосферы ( $P_{атм.}$ ) и осадков.

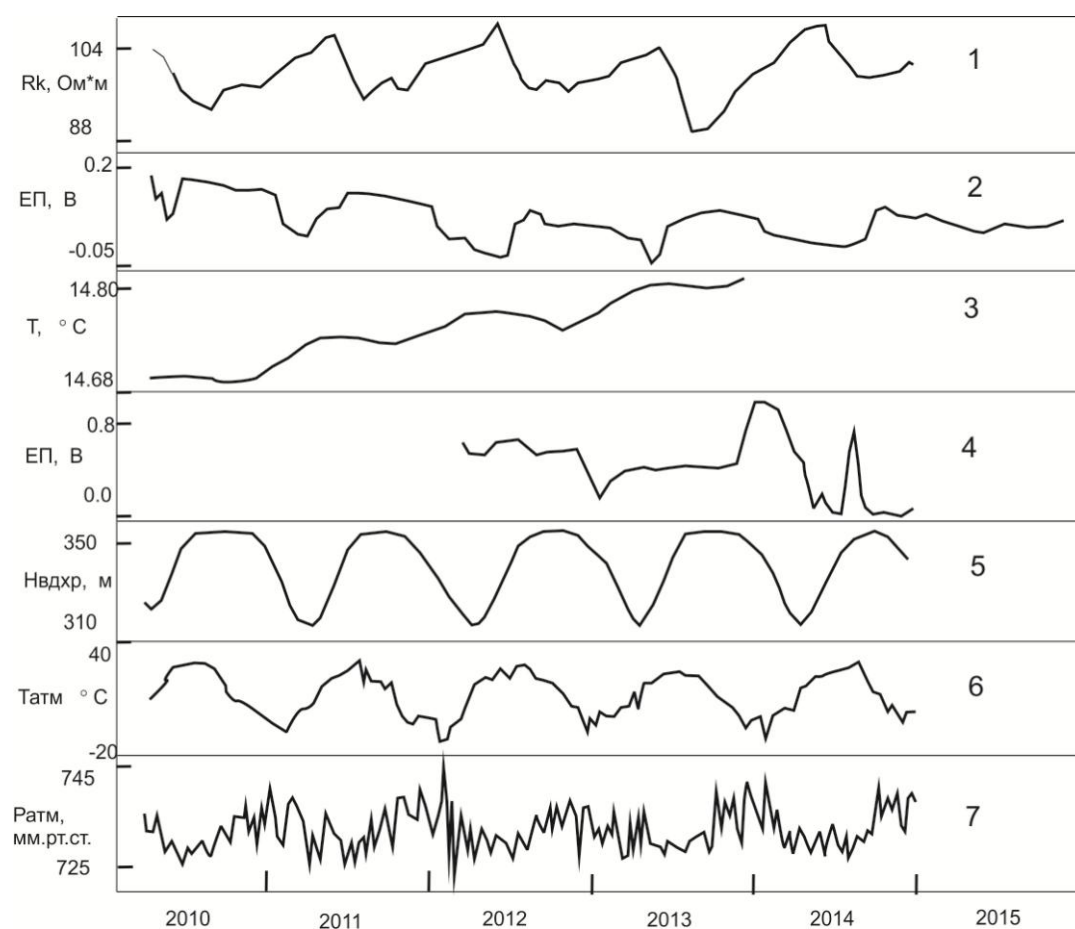
### **Методика анализа**

Для рядов, содержащих сильный сезонный ход, формальный статистический анализ малополезен, так как для регулярных вариаций с общим периодом очень высока вероятность совпадения этих составляющих в фазе или в противофазе. Поэтому для анализа использовался пакет программ WinABD (ИФЗ РАН), который позволяет рассматривать отдельно сезонные и несезонные (остаточные) компоненты вариаций. Остаточная компонента вариаций по свойствам довольно близка к стационарному случайному процессу. Для выяснения наличия связи между такими сигналами можно использовать обычные статистические методы, такие, как корреляционный анализ. Расчет сезонной компоненты температуры, давления и  $R_k$  проводился по методике [Дещеревский, Сидорин, 1999]. Эта методика предполагает расчет сезонной вариации методом наложения эпох с последующим сглаживанием. Цель сглаживания – подавление случайных высокочастотных флуктуаций средне-сезонной функции (ССФ). Поэтому оптимальная величина сглаживания подбира-

ется, исходя из степени вариабельности сезонного хода от года к году, амплитуды высокочастотных шумов, числа периодов сезонности, по которым рассчитана ССФ. Процедура обработки данных включает в себя:

- 1) сглаживание ряда в скользящем окне с заполнением пропусков;
- 2) расчет среднесезонной функции;
- 3) расчет остаточной компоненты, который реализуется в результате вычитания среднесезонной функции от исходного ряда, т.е. ряд, отфильтрованный от сезонной части;
- 4) расчет взаимнокорреляционной функции (ВКФ);
- 5) вычисление спектров.

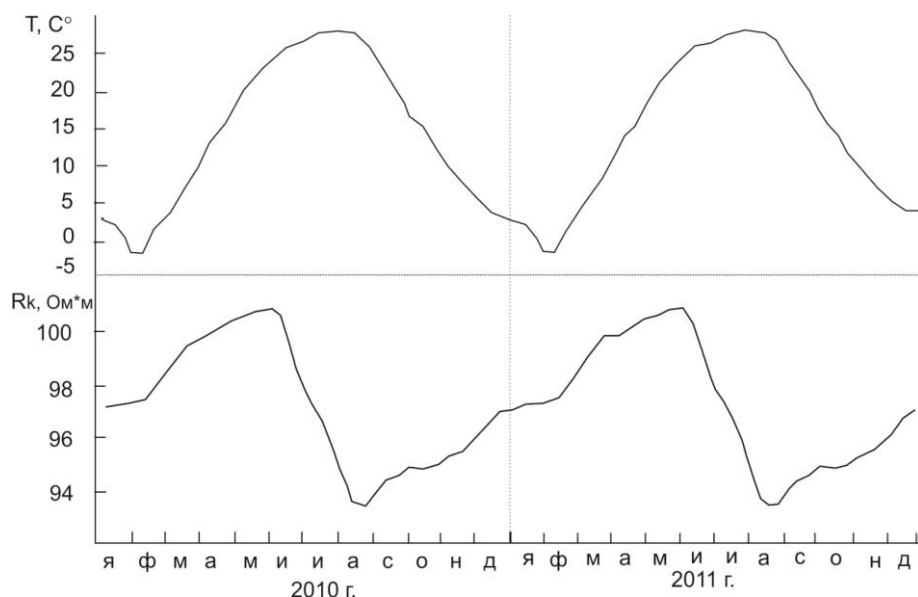
Графики рядов данных, которые использовались для анализа, приведены на рис. 2, за исключение данных по осадкам.



**Рис. 2.** Графики рядов данных: 1 – кажущегося сопротивления  $R_k$  (Ом·м) в скв. №. 1; 2 –электрического поля ЕП (В) в скв. № 2; 3 – температуры воды  $T_{скв.}$  (°С) в скв. № 2; 4 – электрического поля ЕП (В) в скв. № 1; 5 – уровня воды в водохранилище  $H_{вдхр.}$  (м); 6 – температуры атмосферы  $T_{атм.}$  (°С); 7– давления атмосферы  $P_{атм.}$  (мм. рт. ст.)

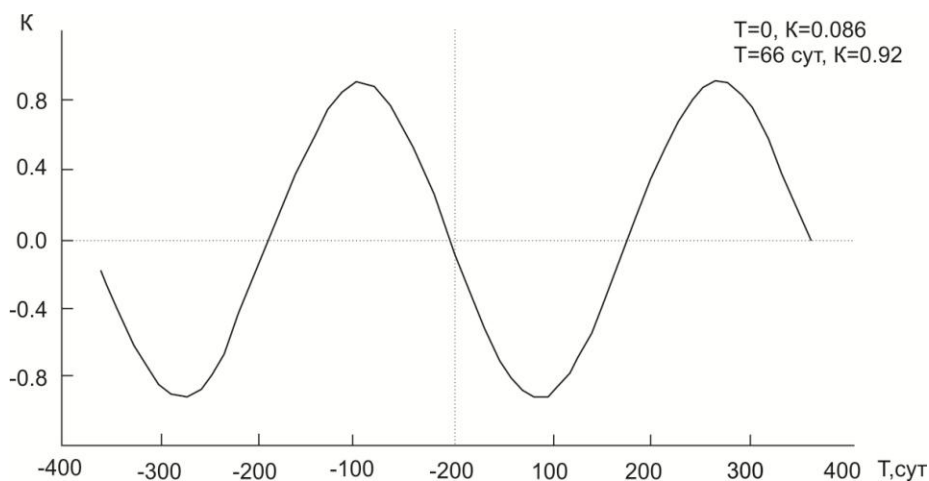
## Анализ влияния метеофакторов и температуры воды в скважине на кажущееся сопротивление

Для данных кажущегося сопротивления ( $R_k$ ) и температуры атмосферы ( $T_{атм.}$ ) были вычислены среднесезонные функции (ССФ) (рис. 3). Из сравнения графиков видно, что форма сезонных функций  $T_{атм.}$  и  $R_k$  имеет некоторое сходство. Максимум в обоих случаях более широкий, а минимум более резкий. Однако различий между кривыми больше, чем сходства. В случае  $T_{атм.}$  сезонный ход почти симметричный, тогда как для  $R_k$  характерна резкая асимметрия: падение  $R_k$  происходит очень резко, а рост гораздо более плавно.



**Рис. 3.** Графики среднесезонных компонент рядов  $T_{атм.}$  и  $R_k$  (приведено два годовых периода)

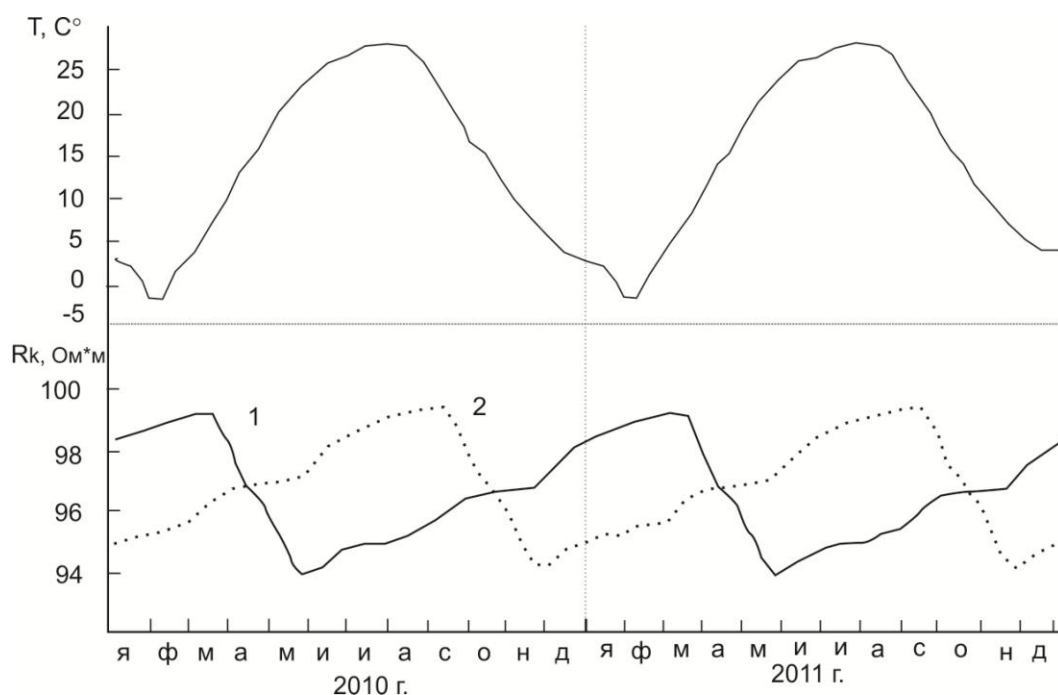
Можно ли совместить две эти кривые с учетом некоторой задержки? Для этого рассмотрим ВКФ двух этих рядов (рис. 4). Видно, что ВКФ имеет резкие



**Рис. 4.** График взаимнокорреляционной функции среднесезонных компонент рядов  $T_{атм.}$  и  $R_k$

максимумы. Причинная связь может быть только в случае запаздывания  $R_k$  по сравнению с  $T_{атм.}$ , т. е. интерес представляют максимумы на лагах 86 суток (коэффициент корреляции  $-0.92$ ) и 270 суток (коэффициент корреляции  $+0.91$ ).

Рассмотрим графики рядов  $T_{атм.}$  и  $R_k$  с соответствующими сдвигами (рис. 5). Видно, что даже после сдвига во времени соответствия между кривыми все равно нет. При сдвиге 86 суток (средняя кривая) резкий спад  $R_k$  не имеет никаких аналогов на кривой  $T_{атм.}$ . Рост  $T_{атм.}$  начинается раньше, а заканчивается позже, чем спад  $R_k$ . Невозможно предложить разумную модель, которая бы объясняла вариации  $R_k$  как следствие вариаций  $T_{атм.}$ . Поэтому, даже несмотря на достаточно высокую корреляцию между кривыми (более 0.9 по модулю в обоих случаях), можно почти наверняка утверждать, что сезонная вариация  $R_k$  не связана с влиянием температуры атмосферы.



**Рис. 5.** Графики среднесезонных компонент рядов  $T_{атм.}$  и  $R_k$  при сдвигах 86 суток (1) и 270 суток (2)

По этой методике рассматривалась связь между рядами данных  $R_k$  и  $P_{атм.}$ ,  $T_{скв.}$ . Для них также не было обнаружено влияние сезонных изменений атмосферного давления и температуры воды в скважине на  $R_k$ .

Для анализа влияния осадков на  $R_k$  использовался метод наложения эпох. Ширина окна для расчета была выбрана 15 суток из предположения, что влияние осадков не будет продолжаться более чем несколько дней. Усредненный по 18 эпизодам график отклика  $R_k$  на осадки показал, что осадки не оказывают значимого влияния на  $R_k$ , т. е. выявленные аномалии как до, так и после осадков имеют разный знак, при этом амплитуда аномалии до осадков превышает амплитуду аномалии после осадков. Поэтому сделан вывод о том, что выявленные аномалии  $R_k$  носят случайный характер.



Таким образом, для рядов с сезонным ходом и отфильтрованной от сезонной компоненты температуры и давления атмосферы, температуры воды в скважине не обнаружено их влияние на кажущееся сопротивление пород в скважине. Имеющиеся данные об осадках за период 2010–2014 гг. не дают основания предполагать их значимое влияние на кажущееся сопротивление.

### Оценка связи между уровнем водохранилища и кажущимся сопротивлением

Для анализа использовались ряды данных  $H_{\text{вдхр.}}$  и  $R_k$  (рис. 6). Коэффициент корреляции между ними равен  $-0.80$ , а отдельно по годам распределяется в следующем порядке: 2010 г. –  $K = -0.3$ ; 2011 г. –  $K = -0.82$ ; 2012 г. –  $K = -0.84$ ; 2013 г. –  $K = -0.81$ ; 2014 г. –  $K = -0.81$ . Для сезонных вариаций наблюдается близкое совпадение фаз, а корреляция довольно высокая. Однако совпадение фаз графиков все же не точное. В период интенсивного роста уровня воды в водохранилище падение  $R_k$  происходит очень резко, а во время разгрузки наблюдается более плавный рост.

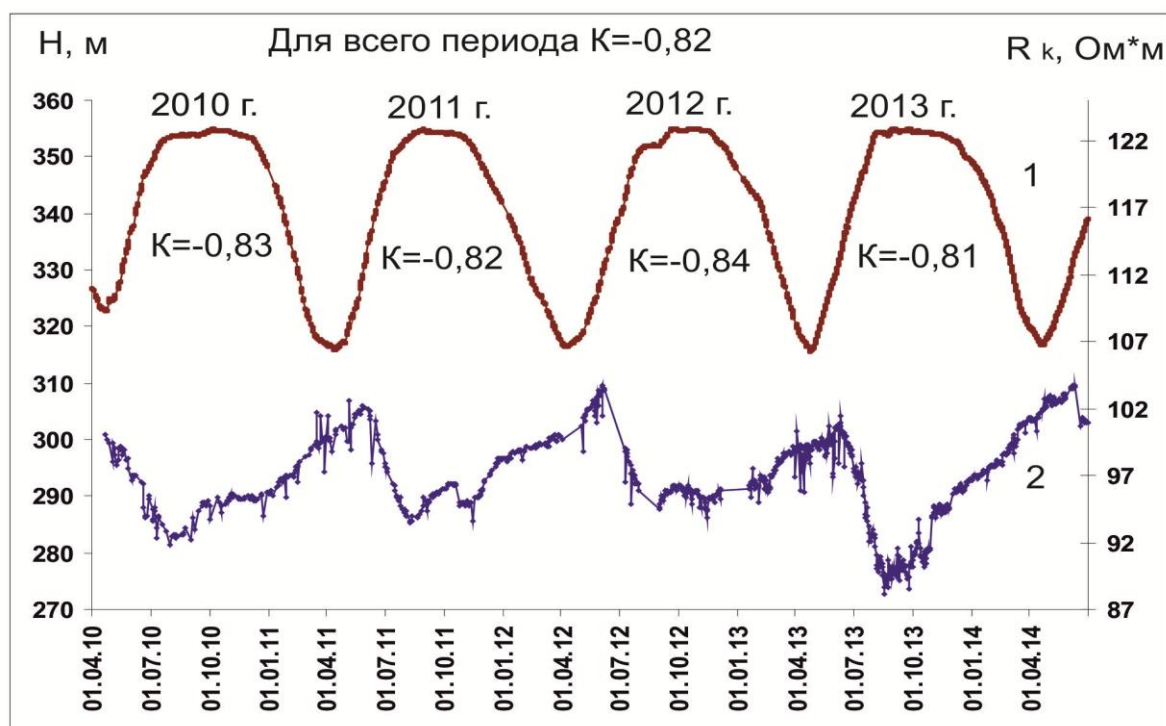


Рис. 6. Графики рядов данных  $H_{\text{вдхр.}}$  (1) и  $R_k$  (2)

Для среднесезонных графиков  $H_{\text{вдхр.}}$  и  $R_k$  была вычислена взаимнокорреляционная функция ВКФ. Максимальная корреляция ВКФ ( $-0.94$ ) достигается при сдвиге 12 суток, когда  $R_k$  отстает от уровня воды. Это означает, что прямого влияния уровень воды в водохранилище на  $R_k$  не оказывает, однако возможно косвенное влияние через промежуточный третий фактор, действующий с определенной задержкой. В качестве такого третьего фактора могут выступать деформационные или фильтрационные процессы. Возможно даже, что оба эти процесса связаны между собой, например, повышение уровня воды приводит к увеличению давления в по-

рах и трещинах породы, которая в свою очередь вызывает перераспределение упругих напряжений в среде.

Если водохранилище имеет гидродинамическую связь с нижележащими породами, то давление воды в порах и трещинах будет равно гидростатическому давлению  $P_{\text{гидро.}} = \rho gh$ , где  $\rho$  – плотность воды,  $g$  – ускорение свободного падения,  $h$  – глубина нижележащих пород. Величина эффективного давления ( $P_{\text{эфф.}}$ ) на скелет породы равна разности геостатического и гидростатического давлений ( $P_{\text{эфф.}} = P_{\text{гор.}} - P_{\text{гидро.}}$ ). Поэтому увеличение гидростатического давления приводит к снижению эффективного давления и как следствие к деформации пласта, т. е. его расширению. Такой механизм воздействия подтверждается данными прямых деформационных измерений в районе плотины Саяно-Шушенской ГЭС [Савич, Газиев, 2005]. Повышение сезонного уровня воды приводит к упругой деформации расширения пород в основании плотины, вследствие повышения порово-трещинного давления в подстилающих породах, а уменьшение уровня – к сжатию пород.

### **Оценка связи напряженности естественного электрического поля в скважине с уровнем водохранилища и кажущимся сопротивлением.**

Для рядов данных электрического поля (ЕП) в скв. № 1 (см. рис. 2, график №4) глубиной 120 м сезонных вариаций не обнаружено.

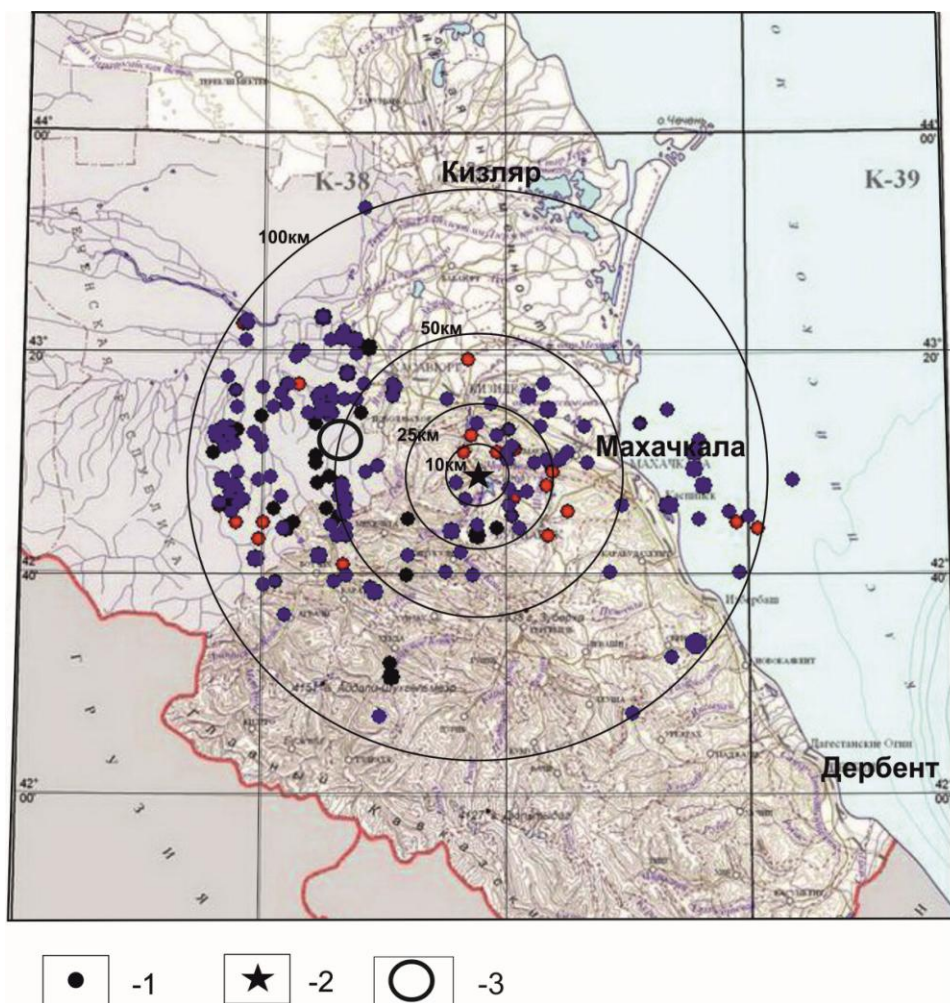
Для данных, полученных в скв. № 2 (см. рис. 2, график № 2) глубиной до 180 м между графиками ЕП (№ 2) и  $H_{\text{вдхр.}}$  (№ 5) визуально наблюдается хорошее совпадение, пики максимумов и минимумов примерно совпадают. В период наполнения водохранилища напряжение на электродах растет, а при уменьшении уровня воды в водохранилище в осенне-зимний период, наоборот, уменьшается. Наиболее отчетливо данная зависимость наблюдается для 2011 и 2012 гг.

Сезонное изменение амплитуды напряженности электрического поля составляет в среднем 10 мВ/м, что является вполне реальным для горных районов. Для таких аномалий необходимо допустить наличие высоких скоростей фильтрации воды в пористых средах. В таком случае изменение ЕП должно происходить с некоторым опозданием от  $H_{\text{вдхр.}}$ . Расчет их взаимнокорреляционной функции показывает наличие сдвига фаз между ними, т. е. максимальная корреляция наблюдается, когда ЕП отстает от  $H_{\text{вдхр.}}$  на 12 суток. Из этого следует, что электрофильтрационное поле связано с уровнем водохранилища. Следует отметить, что такого же порядка сдвиг фаз наблюдается и для графиков  $H_{\text{вдхр.}}$  и  $R_k$  в скв. № 1. Физический смысл запаздывания ЕП от  $H_{\text{вдхр.}}$  состоит в том, что процесс фильтрации воды из водохранилища до места расположения электродов требует определенного времени. В данном случае, примерно 12 суток. Такое совпадение результатов позволяет предположить, что фильтрация воды влияет на  $R_k$  в скважине №1 через промежуточный фактор. Таким фактором является изменение гидростатического давления, который связан с уровнем воды в водохранилище.

Повышение гидростатического давления уменьшает электрическое сопротивление и повышает уровень электрофильтрационного поля, а понижение давления воды приводит к обратному процессу – к увеличению электрического сопротивления и уменьшению поля.

**Глава 4** показывает связь между электрическими параметрами пород в скв. № 1 и сейсмичностью района.

Для анализа использовался каталог землетрясений ГС РАН за период 2010–2014 гг. Из него были отобраны представительные землетрясения  $M > 3.0$ , которые произошли на площади с радиусом до 100 км от плотины ГЭС (рис. 7).



**Рис. 7.** Карта эпицентров землетрясений  $M > 3.0$  в радиусе до 100 км от Чиркейской ГЭС за период 2010–2014 гг.: 1 – эпицентр землетрясения; 2 – расположение плотины ГЭС; 3 – эпицентр Курчалойского землетрясения 2008 г.

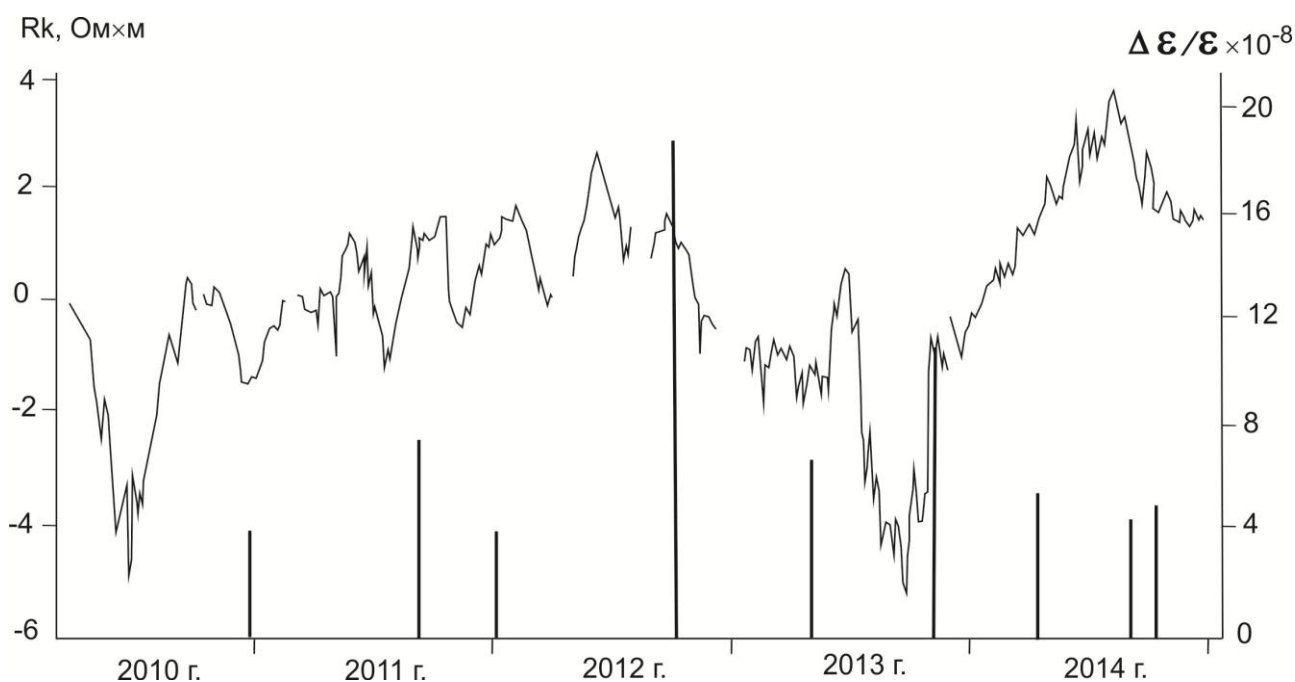
Для оценки влияния того или иного землетрясения на электрические параметры пород в скважине были рассчитаны величины относительных деформаций ( $\Delta\varepsilon/\varepsilon$ ) в точке наблюдения перед землетрясением по известным формулам [Добровольский, 1984], которые учитывают магнитуду и эпицентральное расстояние. Вычисление эпицентральных расстояний при известных координатах эпицентров землетрясения производилось по данным каталога с помощью специальной программы.



Для анализа были отобраны те землетрясения, для которых деформационный признак соответствовал значению  $\Delta\varepsilon/\varepsilon \geq 4.0 \cdot 10^{-8}$ .

Для анализа связи землетрясений с аномальными вариациями  $R_k$  использовался ряд, отфильтрованный от сезонной компоненты. На рис. 8 показан график  $R_k$ , совмещенный во времени с данными землетрясений. Как видно, аномальное понижение  $R_k$  с максимальной амплитудой произошло после землетрясения  $M=3.8$ , произошедшего 07.09.2012 под водохранилищем на глубине 10 км. Расчетная амплитуда деформации для данного землетрясения составляет  $\varepsilon=1.85 \cdot 10^{-7}$ . Общая длительность уменьшения  $R_k$  составляет 12 месяцев. Амплитуда аномального уменьшения  $R_k$  равна 6%.

Подобная аномалия  $R_k$  в данной скважине была отмечена ранее другими авторами работы [Идармачев, Черкашин и др., 2011] для периода наблюдений 2007–2010 гг. после сильного землетрясения с  $M=5.7$ , которое произошло 11.10.2008 на границе Чеченской Республики и Дагестана. Расположение эпицентра землетрясения показано на рис. 8. После главного толчка Курчалойского землетрясения, который произошел на расстоянии



**Рис. 8.** График  $R_k$  отфильтрованный от сезонной компоненты и расчетные амплитуды деформаций, связанные с землетрясениями в радиусе до 100 км, превышающие величину  $4.0 \cdot 10^{-8}$

55 км от плотины ГЭС, наблюдалось аномальное уменьшение  $R_k$  на 29%. Длительность аномалии составила 9.6 месяцев. После достижения в 2009 г. своего минимума  $R_k$  увеличилось практически скачком. Данная аномалия произошла внутри активной фазы развития афтершокового периода землетрясения 11 октября 2008 г.

Для обоих рассмотренных случаев землетрясений после толчка происходит длительное уменьшение  $R_k$ , которое завершается резким восстановлением. Процесс уменьшения  $R_k$  показывает, что в массиве в результате деформации растет порово-трещинный объем, заполняемый водой, удельное электрическое сопротивление которой на порядок ниже удельного сопротивления породы. Это приводит к уменьшению  $R_k$ . Резкое увеличение  $R_k$  свидетельствует о сдвиговом характере деформации в массиве. Процесс снятия упругих напряжений в массиве способствует закрытию трещин и уменьшению порово-трещинного пространства, что приводит к повышению  $R_k$ .

Таким образом, анализ графиков  $R_k$  позволяет сделать вывод о том, что отдельные землетрясения приводят к изменению режима деформирования пород в районе правого борта плотины. Причинами такого процесса могут являться:

- изменение напряженного состояния из-за подвижки в очаге или спровоцированный землетрясением асейсмический крип блоков по разлому;
- деформации в массиве, вызванные колебаниями землетрясения.

Подобной формы медленные деформации, которые завершаются скачком, зарегистрированы на геофизическом полигоне в Калифорнии на разломе Сан-Андреас скважинными деформографами. Скачки деформации связаны с подвижками по разлому, при котором происходит снятие упругих напряжений в массиве.

Скачкообразные изменения  $R_k$  обнаружены так же и в нашей скважине на графиках среднечасовых изменений. Длительность отдельных медленных изменений перед скачком составляет 50–140 часов, а время скачкообразного изменения не превышает 20–25 часов. Амплитуды скачков  $R_k$  лежат в пределах 0.2–0.6%. Малоамплитудные скачки сопротивления связаны с изменением извилистости токопроводящих каналов в породе, которые очень чувствительны к деформации.

Для данных рядов электрофильтрационного поля связь с землетрясениями не установлена.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Реализована на практике методика геофизического мониторинга опасных геологических процессов в бортах плотины Чиркейской ГЭС, которая включает в себя выбор места, измерительной установки, способа размещения системы электродов и датчиков в скважине, измерительных систем и программы обработки временных рядов.

На основе анализа длительных рядов метеорологических, гидрологических, термометрических, сейсмологических и электрометрических данных с помощью программы обработки WinABD получены следующие результаты:

1. По результатам анализа рядов с сезонными вариациями и рядов, отфильтрованных от сезонной компоненты, не обнаружено влияние температуры и давления атмосферы на кажущееся сопротивление пород в скважине, которое является чувствительным индикатором деформационных и фильтрационных процессов в горных породах.

2. Имеющиеся данные об осадках в районе исследований за период 2010–2014 гг. не дают основания предполагать заметное влияние осадков на кажущееся сопротивление.

3. Анализ сезонных компонент рядов кажущегося сопротивления и температуры воды в скважине, а также их компонент, очищенных от сезонных вариаций, показывает, что температура воды не оказывает заметного влияния на кажущееся сопротивление породы.

4. Для сезонных вариаций уровня водохранилища и кажущегося сопротивления имеется довольно близкое совпадение фаз, а корреляция составляет  $-0.94$ . Однако совпадение фаз не точное. Временная задержка кажущегося сопротивления от уровня воды в водохранилище составляет 12 суток. Это означает, что прямого влияния уровень воды в водохранилище на кажущееся сопротивление не оказывает, а влияет опосредованно, через промежуточный фактор, действующий с определенной задержкой. Такими факторами могут являться деформационные или фильтрационные процессы в массиве пород. Возможно, что оба эти процесса связаны между собой, например, повышение уровня воды приводит к увеличению давления в порах и трещинах породы, которое изменяет состояние трещин, тогда расширение трещин уменьшает электрическое сопротивление и увеличивает коэффициент фильтрации породы.

5. Максимальная корреляция между уровнем водохранилища и электрическим полем в скв. № 2 наблюдается при фазовом сдвиге графиков на 12 суток, т. е. изменение электрофильтрационного поля отстает от уровня водохранилища, тем самым подтверждая физически обоснованную связь между ними, состоящую в том, что фильтрация воды из водохранилища создает в исследуемом массиве пород электрофильтрационное поле, пропорциональное изменению уровня воды в водохранилище.

6. Максимальная отрицательная корреляция между кажущимся сопротивлением породы в скважине и электрофильтрационным полем наблюдается при нулевом

сдвиге фаз. Это означает, что изменение гидростатического давления воды приводит к асинхронному изменению электрофильтрационного поля и кажущегося сопротивления.

Рост давления воды увеличивает электрофильтрационное поле, расширяет объем породы, уменьшает извилистость поровых каналов, что приводит к уменьшению его электрического сопротивления. Падение давления воды приводит к обратному процессу, к уменьшению поля и росту электрического сопротивления.

7. Сделана оценка связи сейсмичности района Чиркейского водохранилища с вариациями электрических параметров в скважине. Для землетрясений с магнитудами  $M \geq 3.5$ , произошедших в радиусе до 100 км от скважины, аномалий электрических параметров пород, которые могли быть рассмотрены в качестве их предвестников, не обнаружены.

Выявлены аномалии уменьшения кажущегося сопротивления продолжительностью до одного года после отдельных землетрясений, которые, по расчетным данным, вызвали максимальные деформации пород в районе плотины ГЭС. Причинами данных аномалий могут являться: деформации в массиве, вызванные колебаниями землетрясения; изменение напряженного состояния земной коры вокруг очага землетрясения в результате разрядки упругих напряжений.

Связь аномалий естественных электрических полей в скв. № 1 и № 2 с землетрясениями не обнаружена.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в журналах, включенных в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертации

1. **Идармачев И.Ш.** Вариации кажущегося сопротивления массива горных пород верхнего мела в районе плотины Чиркейской ГЭС под воздействием переменной нагрузки водохранилища // Вестник Дагестанского научного центра РАН. 2014. № 52. С. 11–15.

2. Идармачев Ш.Г., Алиев И.А., Мусаев М.А., **Идармачев И.Ш.** Вариации горных пород в скважине, расположенной в разломной зоне в период сильных землетрясений // Геофизика. 2014. №2. С. 26–31.

3. Черкашин В.И., Алиев И.А., Алибеков А.А., **Идармачев И.Ш.** Влияние сильных землетрясений на гидродинамический режим разломной зоны // Известия Дагестанского государственного педагогического университета (естественные и точные науки). Махачкала. 2013. №1. С. 96–102.

4. Идармачев Ш.Г., Черкашин В.И., Алиев И.А., **Идармачев И.Ш.** 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.

5. Идармачев Ш.Г., Черкашин В.И., Алиев И.А., Алиев М.М., **Идармачев И.Ш.** Скачкообразные изменения электрических параметров в районе Чиркейской ГЭС в период землетрясения на Кавказе в мае 2012 г. // Геориск. 2013. №3. С. 48–51.

6. Идармачев Ш.Г., Черкашин В.И., Мусаев М.А., **Идармачев И.Ш.** Оценка деформации земной коры в районе Чиркейской ГЭС от сезонной нагрузки водохранилища по геофизическим данным // Геофизика. 2015. №2. С.31–37.

7. Дещеревский А.В., **Идармачев И.Ш.**, Идармачев Ш.Г. Анализ влияния сезонных изменений уровня воды в Чиркейском водохранилище и атмосферных параметров на кажущееся сопротивление горных пород в скважине, расположенной в районе правого борта плотины ГЭС // Геология и геофизика Юга России. 2016. №3. С. 48–53.

### Публикации в сборниках и материалах конференций

1. Идармачев Ш.Г., Алиев И.А., **Идармачев И.Ш.** Триггерное воздействие сейсмических колебаний сильных землетрясений на разломную зону земной коры. Сб. научн. Трудов. По материалам Международной научной конференции 29 апреля 2013 г. Вопросы образования и науки в XXI веке. Часть 5. Министерство образования и науки РФ. Тамбов. 2013. С. 72–73.

2. Абдуллаев Ш.-С.О., **Идармачев И.Ш.** Вариации электрических параметров горных пород под воздействием сейсмотектонических процессов на Кавказе. Сб. науч. Трудов. По материалам Международной научной конференции 29 апреля

2013 г. Вопросы образования и науки в XXI веке. Часть 1. Министерство образования и науки РФ. Тамбов. 2013. С. 13–15.

3. Идармачев Ш.Г., Черкашин В.И., Газалиев И.М., **Идармачев И.Ш.** Вариации кажущегося сопротивления горных пород в скважине в районе Восточного Кавказа в период сильных землетрясений. Мат. 8-й Международной сейсмологической школы. (г. Геленджик, 16-20 сентября 2013 г.). Обнинск. 2013. С. 172–175.

4. Идармачев Ш.Г., Магомедов А.Г., **Идармачев И.Ш.** Геодинамические процессы Каспийского региона. - Почвы аридных территорий и проблемы охраны их биологического разнообразия. Тр. Института геологии Дагестанского НЦ РАН. 2014. Вып. 63. С. 314–319.

5. **Идармачев И.Ш.** Вариации электрического сопротивления горных пород, связанные с изменением уровня воды в Чиркейском водохранилище.- Почвы аридных территорий и проблемы охраны их биологического разнообразия. Тр. Института геологии Дагестанского НЦ РАН. 2014. Вып. 63. С. 292–296.

6. Идармачев Ш.Г., Алиев М.М. Магомедов А.Г., **Идармачев И.Ш.** Сейсмогеодинамические процессы Каспийского региона // Геология и геофизика Юга России. 2014. №3. С. 52–58.

7. Идармачев Ш.Г., Черкашин В.И., Мусаев М.А., **Идармачев И.Ш.** Исследование связи вариаций кажущегося сопротивления пород возле плотины Чиркейской ГЭС с сейсмичностью района. Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы X Международной сейсмологической школы, г. Новханы, Азербайджан, 14-18 сентября 2015. Обнинск. 2015. С. 137–140.

8. Алиев М.М., Даниялов М.Г., Магомедов Х.Ж., **Идармачев И.Ш.** Сезонные вариации напряженности естественного электрического поля в районе плотины Чиркейской ГЭС, связанные с изменением уровня воды в водохранилище. Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных Материалы XI Международной сейсмологической школы, г. Чолпон-Ата, Кыргызстан, 11–17 сентября. Обнинск. 2016.

9. Алиев М.М., Магомедов Х.Ж., **Идармачев И.Ш.** и др. Сезонные вариации напряженности естественного электрического поля в районе плотины Чиркейской ГЭС. Геология, геодинамика и геоэкология Кавказа. Тр. Института геологии Дагестанского НЦ РАН. Махачкала: Алеф. 2016. С. 400–404.

Подписано в печать

Заказ №            Тираж 100 экз.

Объем: 0.83 усл. печ. л.

Отпечатано в типографии «АЛЕФ», 367000,

РД, г. Махачкала, ул. С. Стальского, Д. 50

Тел: +79034775564, +79882000164