



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. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при министерстве образования и науки Российской Федерации 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 variability 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.

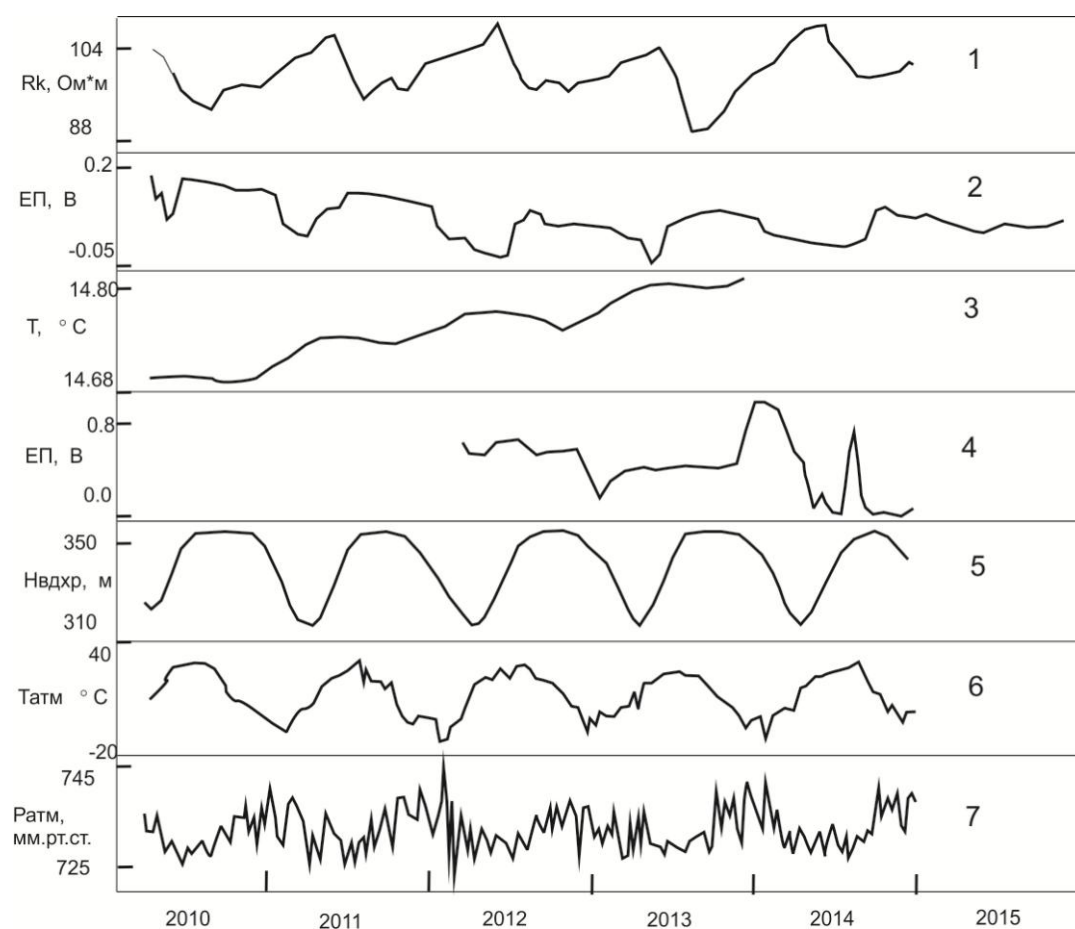


Рис. 2. Графики рядов данных: 1 – кажущегося сопротивления R_k (Ом·м) в скв. №. 1; 2 –электрического поля ЕП (В) в скв. № 2; 3 – температуры воды $T_{скв.}$ (°С) в скв. № 2; 4 – электрического поля ЕП (В) в скв. № 1; 5 – уровня воды в водохранилище $H_{вдхр.}$ (м); 6 – температуры атмосферы $T_{атм.}$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

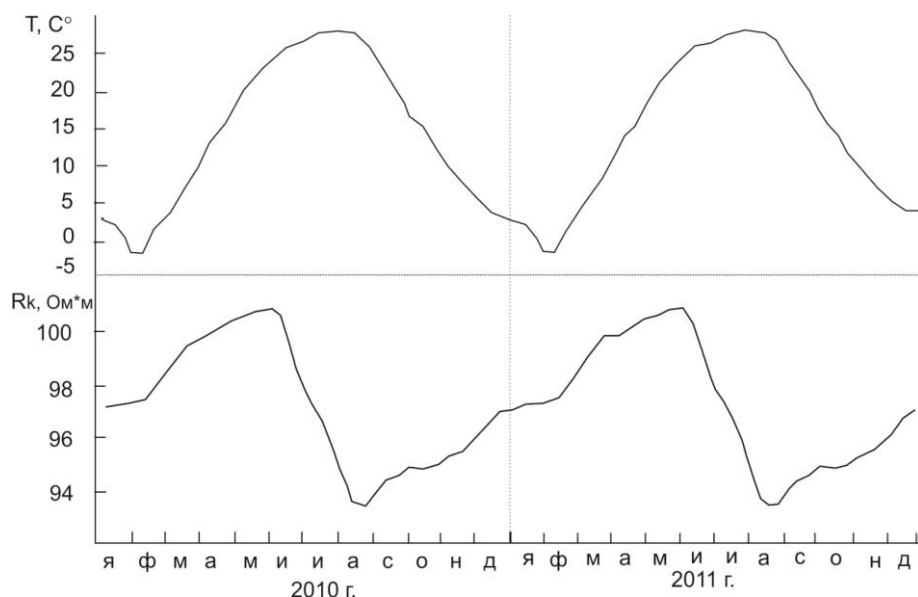


Рис. 3. Графики среднесезонных компонент рядов $T_{атм.}$ и R_k (приведено два годовых периода)

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

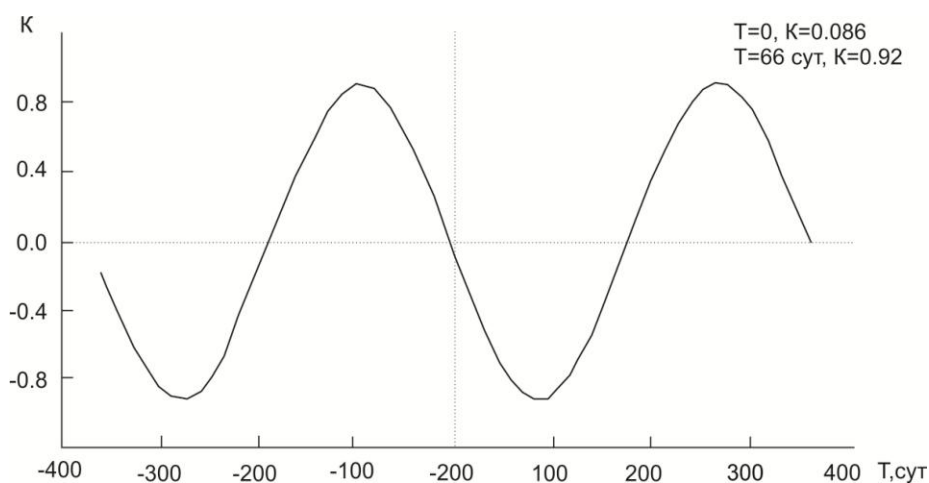


Рис. 4. График взаимнокорреляционной функции среднесезонных компонент рядов $T_{атм.}$ и R_k

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.

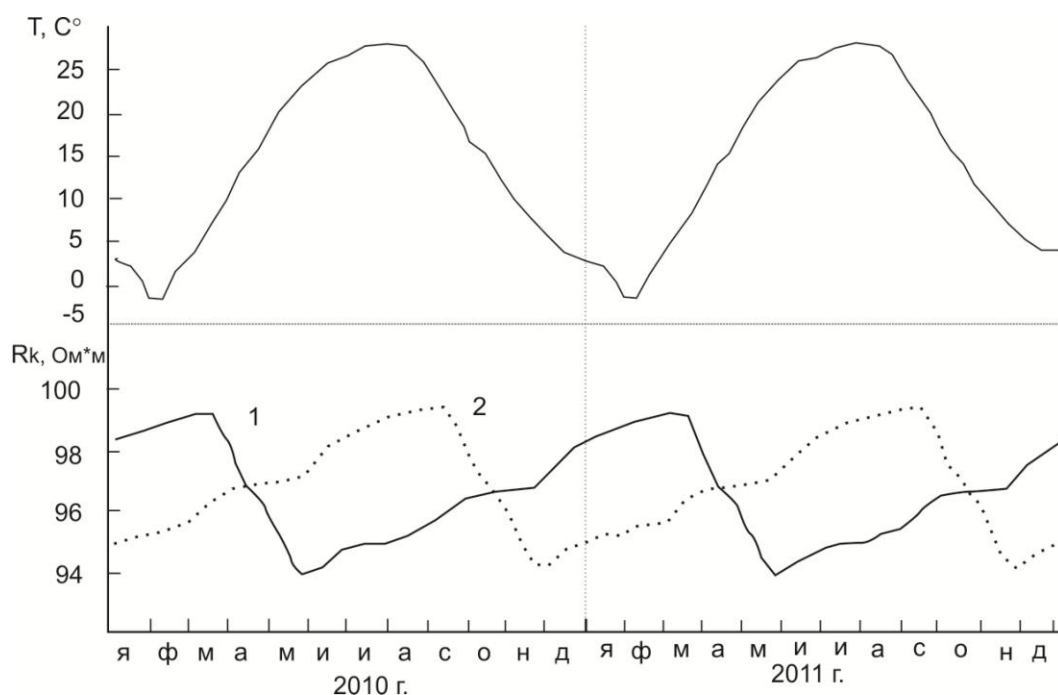


Рис. 5. Графики среднесезонных компонент рядов $T_{атм.}$ и R_k при сдвигах 86 суток (1) и 270 суток (2)

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.

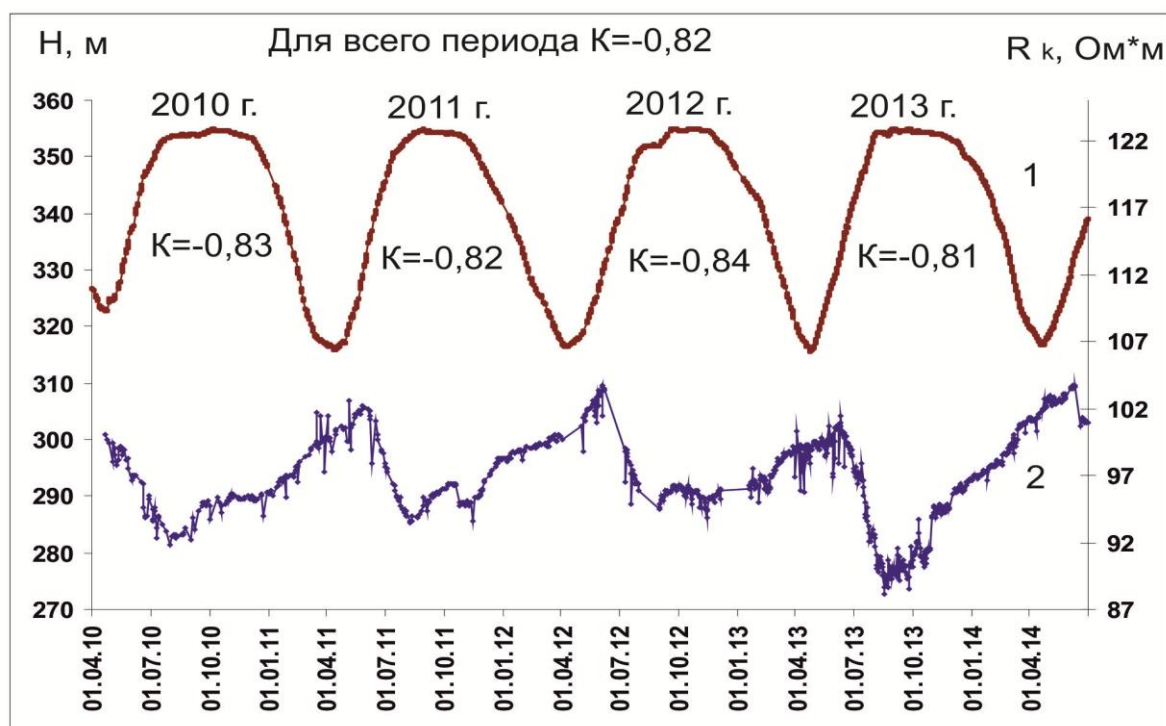


Рис. 6. Графики рядов данных $H_{\text{вдхр.}}$ (1) и R_k (2)

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 ρ – 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).

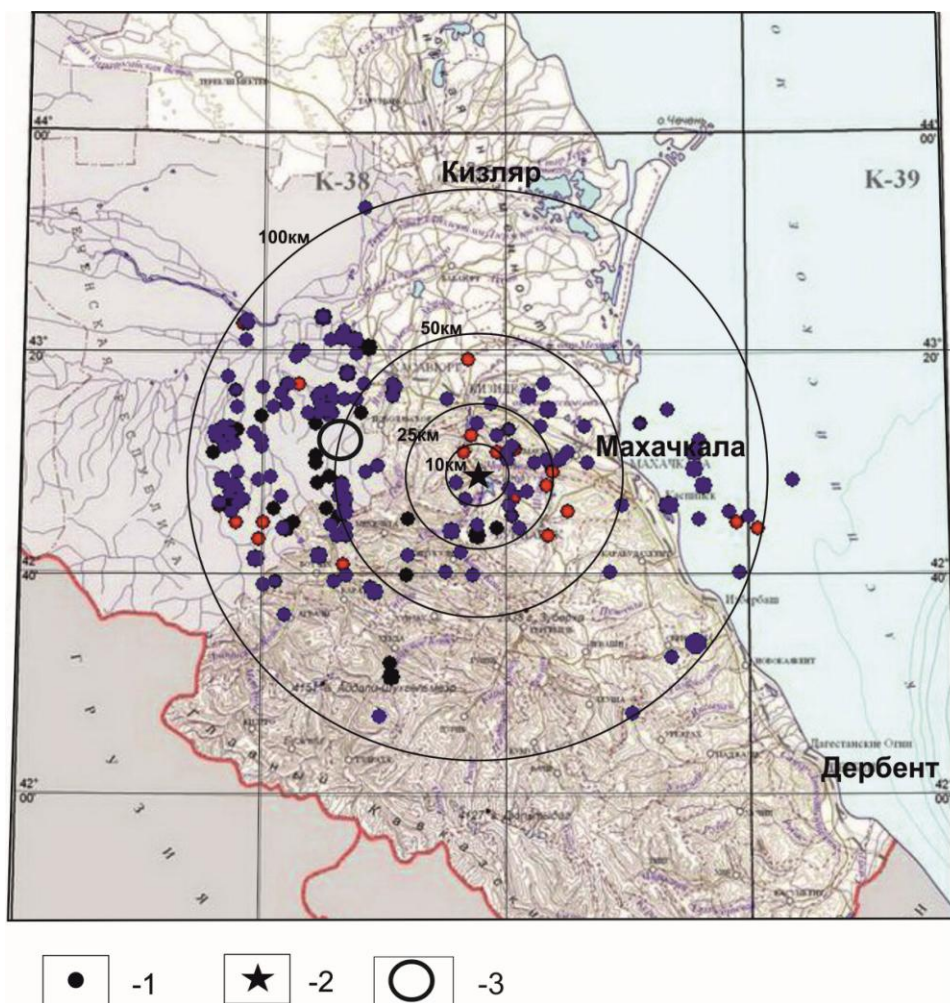


Рис. 7. Карта эпицентров землетрясений $M > 3.0$ в радиусе до 100 км от Чиркейской ГЭС за период 2010–2014 гг.: 1 – эпицентр землетрясения; 2 – расположение плотины ГЭС; 3 – эпицентр Курчалойского землетрясения 2008 г.

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

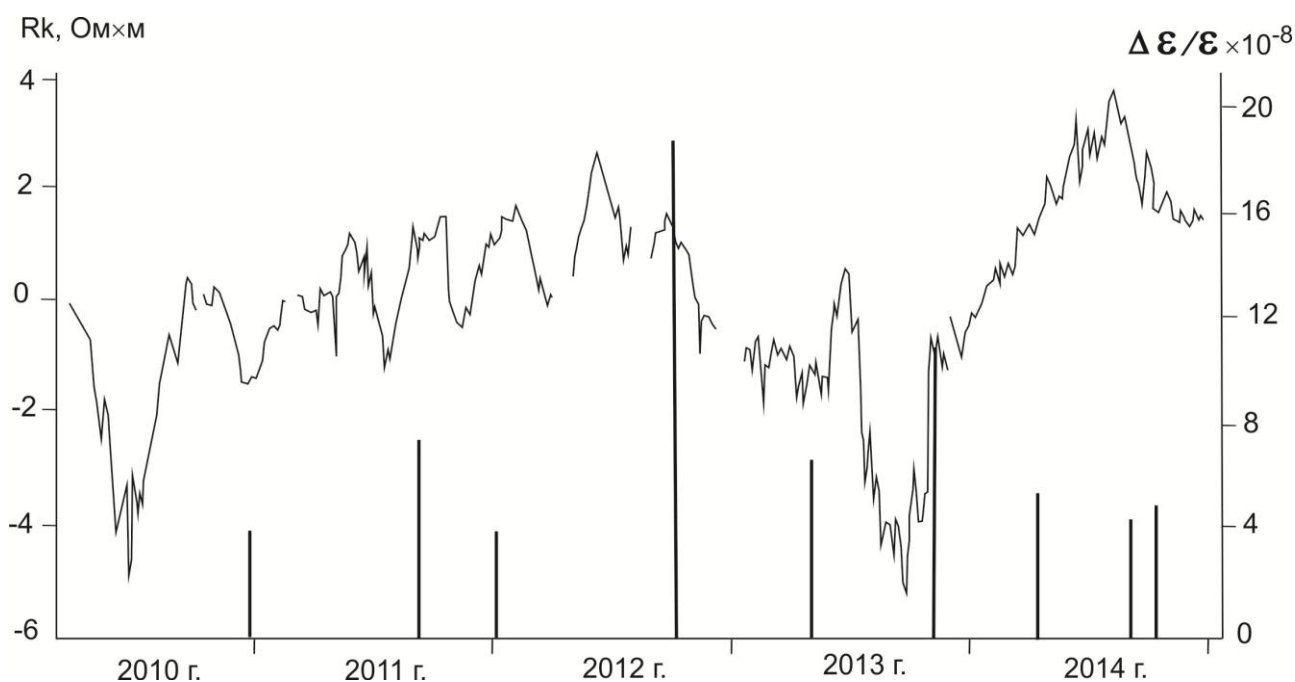


Рис. 8. График R_k отфильтрованный от сезонной компоненты и расчетные амплитуды деформаций, связанные с землетрясениями в радиусе до 100 км, превышающие величину $4.0 \cdot 10^{-8}$

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