

УДК 550.34

DOI: 10.23671/VNC.2016.3.20829

## 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

© 2016 А.В. Дещеревский<sup>1</sup>, к.ф.-м.н., И.Ш. Идармачев<sup>2</sup>, Ш.Г. Идармачев<sup>2</sup>,  
д.ф.-м.н.

<sup>1</sup>Институт физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта, Россия, 123995, г. Москва, ул. Б. Грузинская, 10, e-mail: adeshere@online.stack.net;

<sup>2</sup>Институт геологии Дагестанского научного центра РАН, 367030, г. Махачкала, ул. Ярагского, 75, e-mail: idarmachev@yandex.ru

В статье сделан анализ временных рядов уровня воды в Чиркейском водохранилище, температуры и давления атмосферы с целью определения влияния их на электрическое сопротивление пород в скважине, расположенной в районе правого борта высотной плотины ГЭС. На основе проведенного анализа установлено: 1) отсутствие влияний сезонных изменений температуры и давления атмосферы на электрическое сопротивление пород в скважине; 2) наличие высокой связи с коэффициентом корреляции 0,9 по модулю между сезонным изменением уровня воды в водохранилище и электрическим сопротивлением пород. В качестве механизма такого влияния рассматривается одновременное воздействие двух различных сезонных факторов, деформации пород и боковой фильтрации.

**Ключевые слова:** уровень воды в водохранилище, кажущееся электрическое сопротивление, скважина, взаимнокорреляционная функция.

### Введение

Для исследования геологических процессов в районе Чиркейской ГЭС ФГБУН Институтом геологии Дагестанского научного центра РАН, совместно с дирекцией ГЭС проводятся режимные наблюдения за электрическими параметрами пород в необсаженной скважине, расположенной в районе правого борта плотины. Электрические параметры обладают высокой чувствительностью к деформации породы. Авторы работы [Morrow, Brace, 1981] показали, что электрическое сопротивление горных пород в определенных условиях обладает свойством степенной зависимости от деформации. Это свойство горных пород определяется через коэффициент его тензочувствительности:

$$K = \frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta\varepsilon/\varepsilon} \quad (1)$$

где  $\Delta\rho/\rho$  – относительное изменение удельного электрического сопротивления;  $\Delta\varepsilon/\varepsilon$  – относительное изменение объемной деформации.

Величина  $K$  для различных пород лежит в пределах  $10^3$ – $10^5$  [Авагимов, 1991; Morrow, Brace, 1981], при этом зависит от степени насыщения породы водой. Она растет с уменьшением содержания воды, достигает максимума и затем уменьша-

ется. Было также показано, что высокое значение  $K$  достигает в диапазоне малых деформаций. При деформациях  $10^{-4}$  и менее  $K$  в 10–100 раз выше, чем при деформациях, вызывающих разрушение породы,  $10^{-3}$ . Таким образом, с помощью электрического зондирования можно перейти к регистрации малых неразрушающих деформаций влагосодержащих пород.

Если использовать для измерения вариаций электрического сопротивления породы высокоточную аппаратуру, например, погрешностью, не превышающей 0,1 %, то можно регистрировать относительные деформации породы на уровне  $10^{-6}$ ,  $10^{-8}$ . Поэтому для исследования деформационных процессов в районе плотины Чиркейской ГЭС проводится непрерывное электрическое зондирование пород в скважине.

Формальный анализ рядов, полученных данных кажущегося сопротивления пород в скважине ( $R_k$ ) и уровня воды в водохранилище за период наблюдений 2010–2013 гг. показал наличие высокой корреляции (0,8) между ними [Идармачев, 2014]. На основании данного анализа был сделан вывод о том, что увеличение веса воды в водохранилище деформирует массив пород в ложе водохранилища и его береговой части. Предполагается, что деформация прогибания ложа должна вызвать растяжение вертикальных трещин в массиве, расположенном в береговой части водохранилища. С деформацией породы изменяется и ее электрическое сопротивление. Раскрытие трещин с увеличением нагрузки уменьшает электрическое сопротивление породы, а закрытие их, в период разгрузки, увеличивает электрическое сопротивление. Таким образом, по представлению автора [Идармачев, 2014] сезонные колебания уровня воды в водохранилище могут оказывать негативное влияние на состояние окружающей среды, например, спровоцировать опасные геологические процессы.

Однако при формальном анализе рядов, имеющих общий сезонный ход, высока вероятность совпадения по фазе колебаний, поэтому такой подход может привести к неверным результатам исследований. Здесь также необходимо исключить влияние атмосферных факторов: температуры и давления, так как они могут оказать существенное влияние на геофизические параметры. Об этом указывают режимные наблюдения на Гармском геофизическом полигоне [Дещеревский и др., 1994].

В настоящей работе для анализа рядов используется программа Win ABD, разработанная одним из авторов настоящей статьи, которая позволяет вычислять среднесезонные, взаимокорреляционные функции, производить вычитание сезонной составляющей и другие виды обработки данных.

### **Методика измерения кажущегося сопротивления в скважине**

Для наблюдений за геофизическими параметрами горных пород в районе правого борта плотины Чиркейской ГЭС используется необсаженная скважина, пробуренная в период строительства ГЭС для контроля боковой фильтрации из водохранилища. Глубина ее составляет 180 м.

Скальный массив в районе скважины состоит из карбонатных пород горизонтальной слоистости. Мощность слоев меняется в пределах 0,5–1,0 м. В самих слоях имеются трещины разного размера, в том числе и тектонического происхождения.

Уровень воды в водохранилище имеет сезонный ход с амплитудой 30–40 м, при этом максимум приходится на август–сентябрь, а минимум на апрель–май. Уровень воды в скважине меняется синхронно с уровнем воды в водохранилище, при этом разница в абсолютных отметках составляет 13–15 м.

Для измерений кажущегося электрического сопротивления пород используется симметричная четырехэлектродная установка. Измерительный зонд всегда находится ниже минимального уровня воды в скважине на 30 м, что обеспечивает стабильность режимных измерений и снижает влияние атмосферных факторов сезонного характера. На питающие электроды, которые расположены на глубинах 90 м и 99 м, от генератора подаются прямоугольные разнополярные импульсы постоянного стабилизированного тока  $I = 0,02$  А с периодом 20 с., а с приемных электродов, расположенных в середине между питающими электродами снимается разность потенциалов ( $U$ ), которая пропорциональна силе тока в питающем диполе и кажущемуся сопротивлению  $R_k$ . Величина кажущегося сопротивления определяется формулой:

$$R_k = M \frac{U}{I} \quad (2)$$

где  $R_k$  – величина, зависящая от строения геоэлектрического разреза, удельных сопротивлений слоев и их мощностей;  $M$  – геометрический коэффициент, зависящий от расстояний между электродами измерительной установки. Для однородной среды кажущееся сопротивление равно удельному сопротивлению породы.

Расстояние между питающими электродами выбирается таким образом, чтобы ток по воде был минимальным. Для скважины диаметром 0,1 м, удельным сопротивлением воды 20 Ом×м и расстоянием между электродами 9 м ток по воде будет составлять 2,5%. Остальной ток течет по породе. Следовательно, наблюдаемые изменения кажущегося сопротивления отражают преимущественно процессы, зависящие от изменения состояния горных пород в области расположения зонда.

Для измерений кажущегося сопротивления пород используется специально разработанная установка «Георезистор» [Идармачев и др., 2001] для непрерывного электрического зондирования. Установка состоит из платы сбора данных, сопряженной с персональным компьютером, программы управления измерением кажущегося сопротивления и генератора импульсов стабильного тока для питающего диполя. Относительная погрешность измерений  $R_k$  в результате осреднения суточных данных не превышает  $\pm 0,1\%$ . Величина кажущегося сопротивления пород измеренная вначале наблюдений 21.04.2010 г. равна 99,9 Ом×м.

### Используемые данные для анализа

Для анализа использовались ряды наблюдений с апреля 2010 г. по декабрь 2014 г. кажущегося сопротивления ( $R_k$ ) в скважине, расположенной в районе правого борта плотины Чиркейской ГЭС, уровня воды в верхнем бьефе плотины (Нвдхр), атмосферного давления и температуры в районе ГЭС. Графики рядов наблюдений показаны на рис. 1.

### Методика обработки данных

Для графиков, приведенных на рис. 1 характерен сильный сезонный ход. Для любых рядов, содержащих регулярную вариацию с общим периодом очень высокая вероятность совпадения этих составляющих в фазе или в противофазе. Нулевая корреляция между такими рядами будет наблюдаться только в исключительных случаях.

Для выяснения наличия связи между такими сигналами можно использовать обычные статистические методы – такие, как корреляционный анализ (с учетом возможной задержки во времени). То есть, статистические методы могут применяться независимо от наличия или отсутствия физической модели, объясняющей

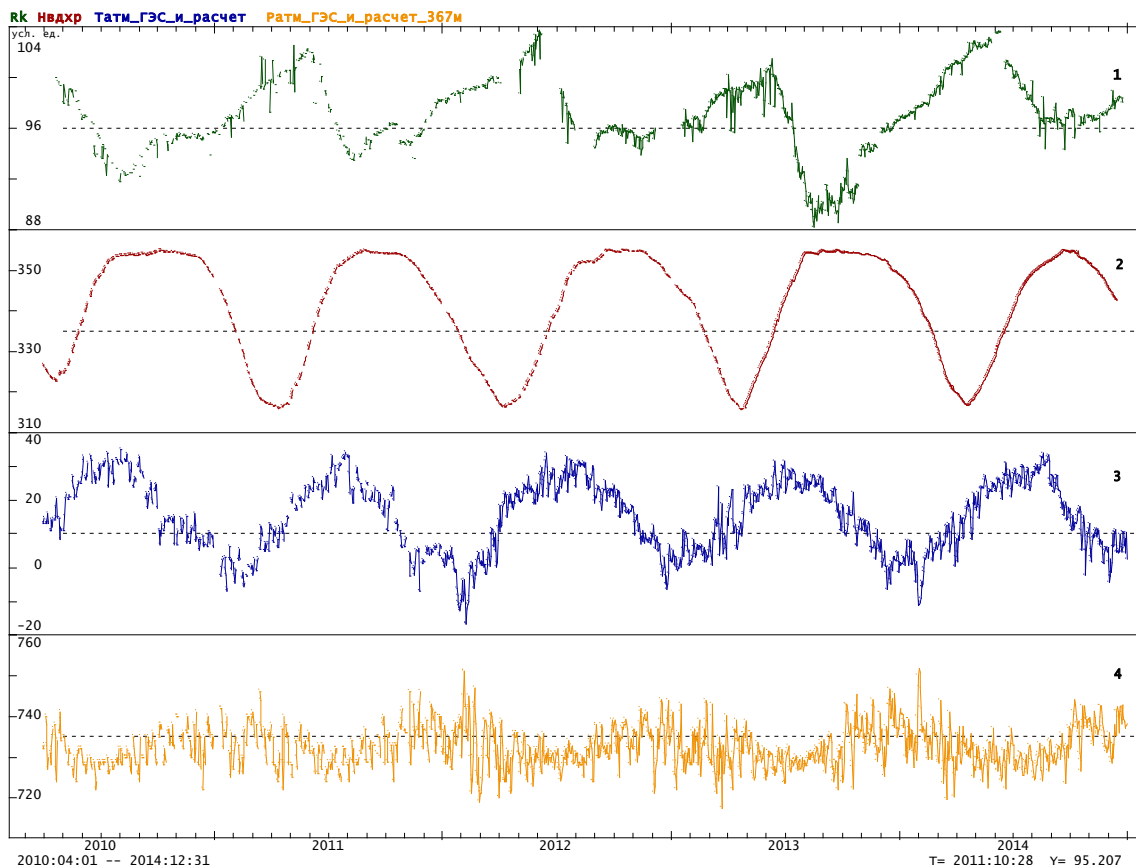


Рис. 1. Графики: 1 – кажущегося сопротивления пород в скважине  $R_k$  ( $\text{Ом}\cdot\text{м}$ );  
 2 – уровня воды в водохранилище Нвдхр (м); 3 – температуры атмосферы  $T_{\text{атм}}$  ( $^{\circ}\text{C}$ );  
 4 – давления атмосферы  $P_{\text{атм}}$  (мм рт. ст.)

влияние атмосферных эффектов на  $R_k$  (либо отсутствие такого влияния). Затем результаты расчетов можно пытаться интерпретировать в рамках тех или иных физических моделей.

Для сезонной компоненты формальный анализ малополезен, так как в общем случае гипотеза об отсутствии связи для таких сигналов обычно не может быть отклонена с приемлемым уровнем значимости. Поэтому при анализе сезонных вариаций надо исходить преимущественно из физических, а не статистических соображений.

Расчет сезонной компоненты  $R_k$ ,  $T_{\text{атм}}$  и  $P_{\text{атм}}$  проводился по методике [Дещеревский, Сидорин, 1999]. 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 варибельности сезонного хода от года к году, амплитуды высокочастотных шумов, числа периодов сезонности, по которым рассчитана ССФ. С учетом всех перечисленных факторов, для ряда  $T_{\text{атм}}$  было выбрано сглаживающее окно шириной 30 суток, а для  $P_{\text{атм}}$  – 60 суток.

Для ряда  $R_k$  при построении сезонной модели надо учесть два момента.

Во-первых, в начальный период наблюдений (до середины 2012 г.) наблюдения выполнялись реже, чем во вторую половину срока. Поэтому при формальном суммировании данных за первую и вторую часть срока сравнительный «вес»

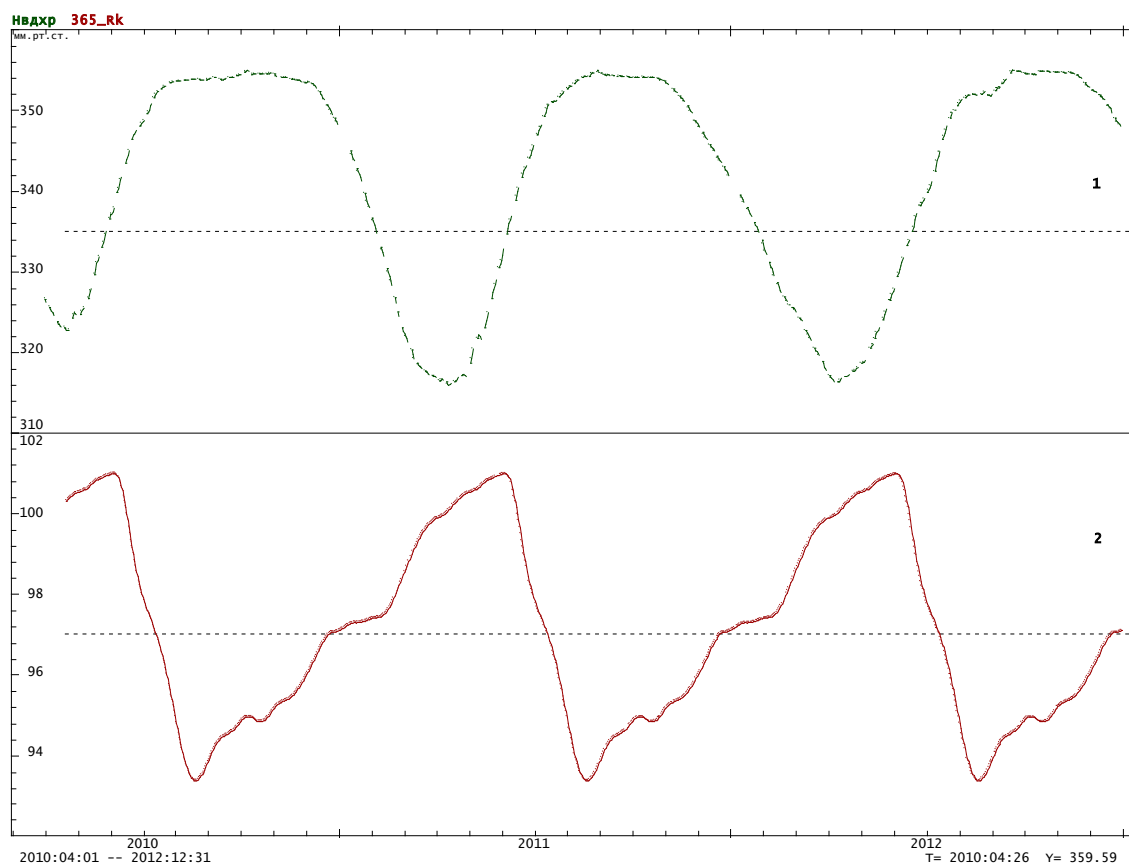


Рис. 2. Графики уровня водохранилища (1) и среднесезонной функции  $365_{R_k}$  (2)

первых наблюдений будет занижен. Очевидно, что это не совсем правильно, т. к. сезонный ход  $R_k$  имеет плавную форму, и наблюдения с периодичностью раз в три дня аппроксимируют сезонный ход практически так же хорошо, как и ежесуточные. Чтобы выровнять вклад первой и второй части срока в сезонную функцию, целесообразно интерполировать пропуски в наблюдениях, по крайней мере, короткие.

Во-вторых, в ряде  $R_k$  периодически прослеживаются высокочастотные флуктуации как, например, в мае-июне 2013 г. Чтобы уменьшить возможное искажение формы ССФ, их лучше отфильтровать перед расчетом ССФ. Поскольку продолжительность таких экскурсов не превышает 1–3 суток, для фильтрации можно использовать медианное сглаживание в окне шириной 7 суток.

Таким образом, для оценки сезонной вариации  $R_k$  были выполнены следующие действия:

- 1) Сглаживание скользящей медианой в окне 7 суток с заполнением пропусков в ряде тренда;
- 2) Оценка ССФ по методу среднесезонной функции со сглаживанием 30 суток.

### Обсуждение результатов

Рассмотрим сначала ряды Нвдхр и среднесезонной функции  $365_{R_k}$ . Их графики приведены на рис. 2.

По графикам особого сходства между Нвдхр и  $365_{R_k}$  не видно. В период весеннего, летнего наполнения водохранилища кажущееся сопротивление уменьша-

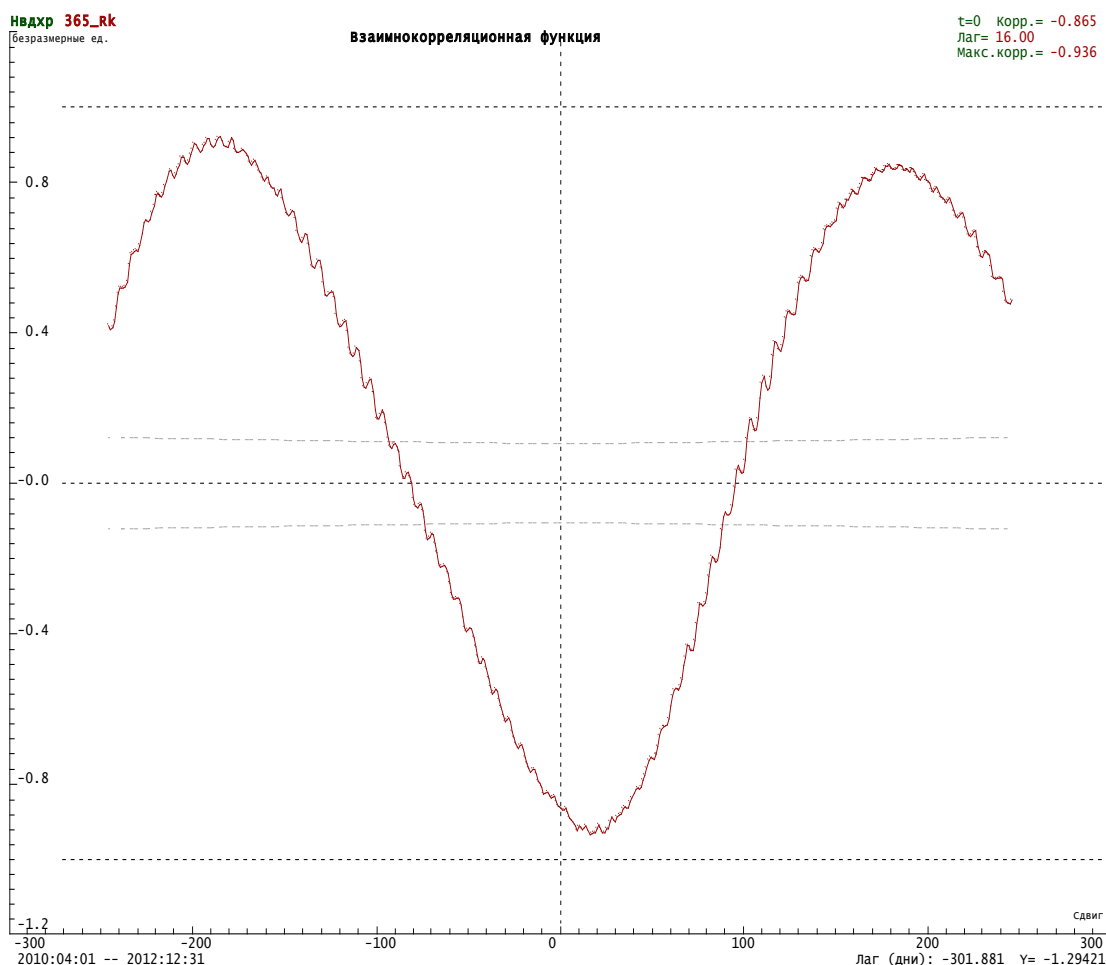


Рис. 3. График взаимокорреляционной функции между Нвдхр и 365\_R<sub>k</sub>

ется с некоторым запаздыванием. В период стабилизации уровня воды с июля по ноябрь совпадения нет,  $R_k$  увеличивается. Зимнему периоду снижения уровня воды соответствует увеличение  $R_k$ . Для периода, когда уровень воды не меняется, наблюдается довольно сложная зависимость  $R_k$  от Нвдхр, которую трудно объяснить с физической точки зрения.

Для дальнейшего анализа для рядов, была рассчитана взаимокорреляционная функция (ВКФ) между Нвдхр и 365\_R<sub>k</sub> (рис. 3).

Максимальная корреляция  $-0,93$  наблюдается при отставании  $R_k$  на 16 суток, а при нулевом сдвиге  $-0,86$ . Такой коэффициент при нулевом сдвиге позволяет предложить модель деформации земной коры под действием изменяющихся упругих напряжений в массиве горных пород под водохранилищем от сезонной нагрузки веса воды.

Другая альтернативная модель связи предполагает влияние процессов боковой фильтрации. Наличие такого процесса подтверждает изменение уровня воды в скважине, который имеет синхронный ход с уровнем воды в водохранилище с отставанием по амплитуде на 13–15 м.

Возможно также влияние нескольких факторов, в частности метеофакторов, давления и температуры атмосферы в районе ГЭС. Рассмотрим влияние сезонных компонентов  $T_{атм}$  и  $P_{атм}$  на  $R_k$  более подробно.

### Оценка влияния $T_{атм}$ и $P_{атм}$ на $R_k$

На рис. 4 приведены графики среднесезонных функций рядов  $T_{атм}$ ,  $P_{атм}$  и  $R_k$ .

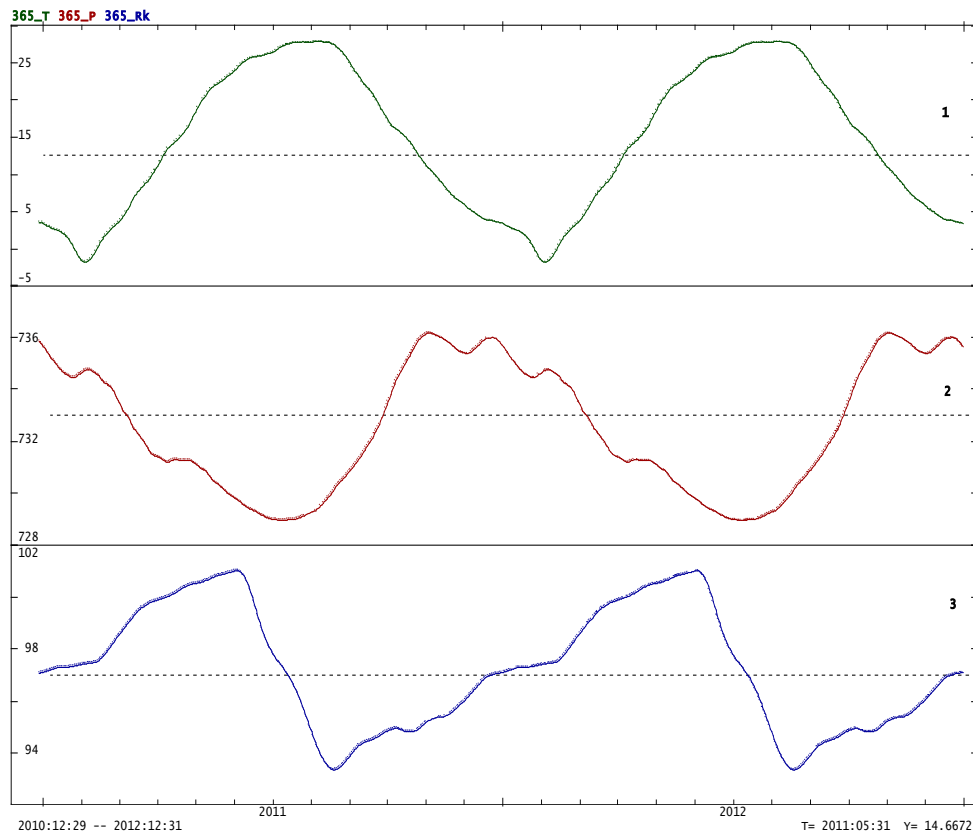


Рис. 4. Графики среднесезонных рядов 365  $T_{атм}$  (1), 365  $P_{атм}$  (2) и 365  $R_k$  (3) за два годовых периода

### Оценка влияния $T_{атм}$ на $R_k$

Рассмотрим вначале графики функций 365  $T_{атм}$  и 365  $R_k$ . Из их сравнения видно, что форма сезонных функций 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, скорость нарастания  $T_{атм}$  примерно такая же, как скорость спада. Для  $R_k$  характерна резкая асимметрия: падение  $R_k$  происходит очень резко, а рост гораздо более плавно.

Можно ли совместить две эти кривые с учетом некоторой задержки? Для этого рассмотрим ВКФ двух этих рядов (рис. 5). Видно, что ВКФ имеет резкие максимумы.

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

Рассмотрим графики  $T_{атм}$  и  $R_k$  с соответствующими сдвигами (рис. 6). 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  $T_{атм}$ . Точно так же нет никаких разумных механизмов, чтобы

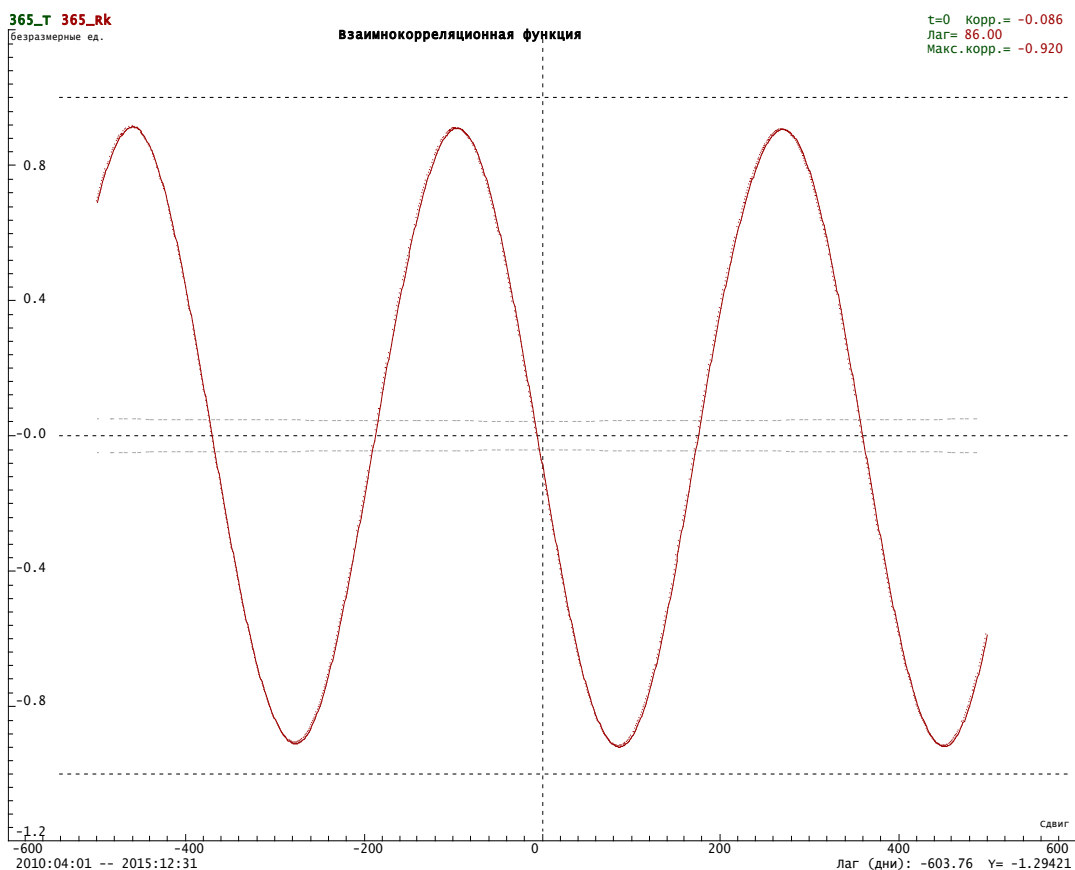


Рис. 5. График взаимнокорреляционной функции между  $365\_T_{атм}$  и  $365\_R_k$

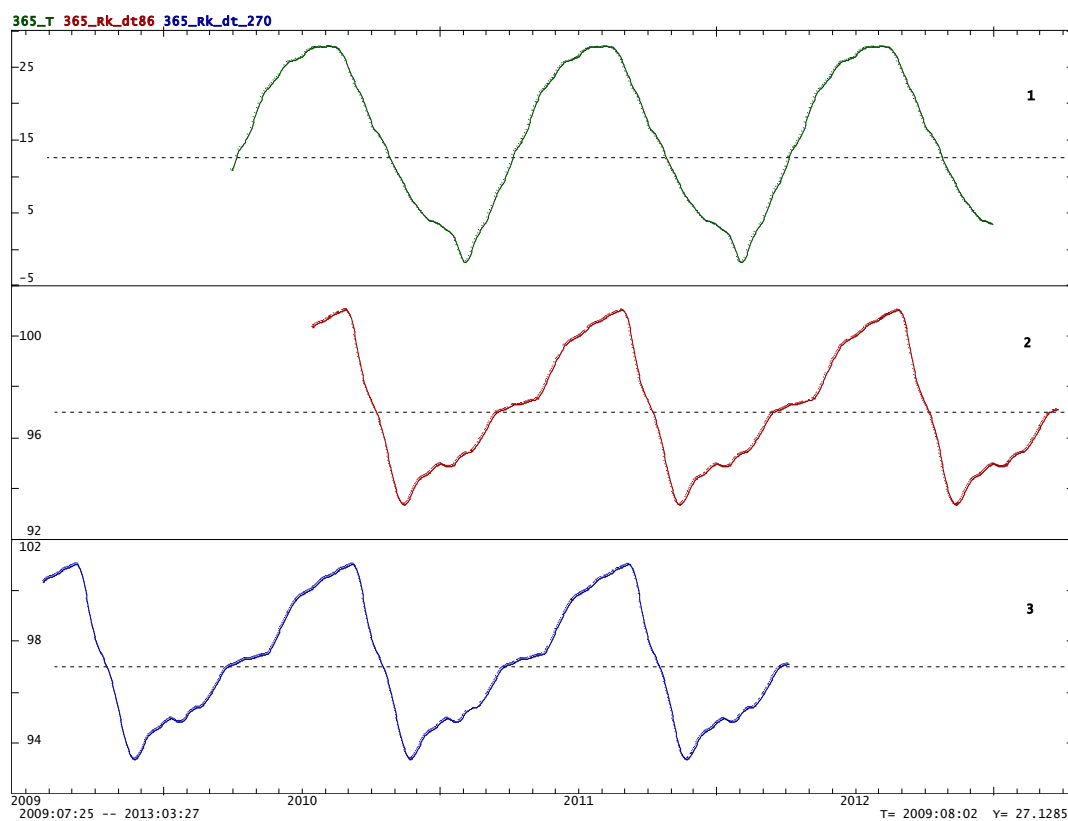


Рис. 6. Сезонные компоненты рядов  $365\_T_{атм}$  (1) и  $365\_R_k$  со сдвигом на 86 (2) и 270 суток (3)



объяснить нижнюю кривую как результат действия  $T_{атм}$ . Обычно, если временной лаг между причинным фактором и откликом настолько сильно размазан во времени, то это приводит к сглаживанию отклика. То есть даже в том случае, когда причинный фактор имеет резкие особенности, отклик все равно получится более плавным и сглаженным. В данном случае все с точностью наоборот. Вариации  $T_{атм}$  более плавные, а на графике  $R_k$  имеются резкие изломы. Поэтому даже, несмотря на достаточно высокую корреляцию между кривыми (более 0,9 по модулю в обоих случаях) можно наверняка утверждать, что сезонная вариация  $R_k$  не связана с влиянием температуры.

### Оценка влияния $P_{атм}$ на $R_k$

Для атмосферного давления (рис. 4, график 2) рост  $P_{атм}$  начинается раньше  $R_k$  на 36 суток, заканчивается позже на 220 суток, т.е. наблюдается полное несоответствие хода графиков 2 и 3. При сдвиге графика 3 вперед на 64 суток функция ВКФ имеет коэффициент корреляции равный  $-1$ . Однако данный сдвиг графика 3 вперед не имеет физического смысла для определения причинно-следственной связи между  $P_{атм}$  и  $R_k$ , так как изменение  $R_k$  не может опережать изменение давления.

### Выводы

1. На основе корреляционного анализа временных рядов уровня воды в Чиркейском водохранилище, кажущегося сопротивления пород в скважине, температуры и давления атмосферы в районе ГЭС с использованием методики, позволяющей рассчитывать среднесезонную составляющую, взаимнокорреляционную функцию с учетом возможной задержки во времени установлено:

а) отсутствие влияния сезонных изменений температуры и давления атмосферы на кажущееся электрическое сопротивление пород в скважине;

б) для рядов уровня водохранилища и кажущегося сопротивления обнаружена физически обоснованная связь (коэффициент корреляции  $-0,93$ ) с задержкой во времени на 16 суток.

2. Высокий коэффициент корреляции ( $-0,86$ ) при нулевом сдвиге позволяет предложить модель деформации земной коры под действием изменяющихся упругих напряжений в массиве горных пород под водохранилищем от сезонной нагрузки веса воды. Вместе с тем, периоду, когда уровень воды стабилизировался после паводкового наполнения водохранилища, наблюдается увеличение кажущегося сопротивления, которое не соответствует ходу графика уровня воды. Предполагается, что увеличение кажущегося сопротивления может быть связано с процессом боковой фильтрации, который будет усиливаться с подъемом уровня воды в водохранилище. Одновременное действие этих двух факторов приводит к искажению сезонного хода графика кажущегося сопротивления относительно графика уровня водохранилища.

### Литература

1. Авагимов А. А. Динамика электромагнитных процессов в Копетдагском сейсмоактивном регионе // Автореферат диссертации доктора физ.-мат. наук. – М., 1991. – 52 с.
2. Дещеревский А. В., Журавлев В. И., Сидорин А. Я. Сезонные вариации кажущегося сопротивления на Гармском геофизическом полигоне. – Изучение природы вариаций геофизических полей. М.: ОИФЗ РАН, 1994. – С. 60–78.

3. Дещеревский А.В., Сидорин А.Я. Некоторые вопросы методики оценки среднесезонных функций для геофизических данных. – М.: ОИФЗ РАН, 1999. – 40 с.

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

5. Идармачев Ш.Г., Алиев М.М., Абдулаев Ш.-С. О., Хаджи Б.А. Станция для электрического зондирования «Георезистор». Современная геодинамика, глубинное строение и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов // Мат. Междунар. конф. Воронеж. – 2001. – С. 86–87.

6. Morrow C., Brace W.F. Electrical resistivity changes in tuffs due to stress // J. Geophys. Res. 1981. Vol. 86, N B4. – P. 2929–2934.

DOI: 10.23671/VNC.2016.3.20829

## **ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SEASONAL ATMOSPHERIC PARAMETERS ON THE APPARENT RESISTIVITY OF ROCKS IN A BOREHOLE LOCATED IN THE AREA OF THE STARBOARD SIDE OF CHIRKEY HYDROPOWER STATION DAM**

© 2016 A.V. Desherevski<sup>1</sup>, Sc. Cand. (Phys.-Math.), I.Sh. Idarmachev<sup>2</sup>, Sh.G. Idarmachev<sup>2</sup>, Sc. Doctor (Phys.-Math.)

<sup>1</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Russia, 123995, Moscow, Bolshaya Gruzinskaya str., 10–1, e-mail: adeshere@online.stack.net;

<sup>2</sup>Institute of Geology, DSC RAS, Russia, 367030, 75, M. Yaragski st., Makhachkala, e-mail: idarmachev@yandex.ru

The article made the analysis of time series of water level in Chirkei reservoir, temperature and pressure of the atmosphere to determine its effect on the electrical resistance of rocks in the borehole located in the area starboard of the high dam hydroelectric power station. Based on the analysis found: 1) no effects of seasonal changes in temperature and pressure of the atmosphere on the electrical resistance of rocks in the borehole; 2) the presence of high regard with the correlation coefficient of 0.9 for the module between the seasonal change of water level in the reservoir and an electric resistance of rocks. As the mechanism of such influence is considered the simultaneous influence of two different seasonal factors, deformation of rocks and lateral filtering.

**Keywords:** the water level in the reservoir, the apparent electrical resistance, bore hole, mutually correlated function.