

УДК 550.34

ПОДАВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ВОДЫ В СКВАЖИНЕ

Полтавцева Е.В.

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский, 683006*

В работе поставлена и успешно решена задача выявления и устранения влияния температуры на результаты измерений удельной электропроводности (УЭП) воды в скважине Г-1, расположенной в г. Петропавловске-Камчатском, полученных с помощью кондуктометра МАРК-1102. Полученный в результате обработки ряд УЭП с отфильтрованной температурной составляющей не противоречит результатам измерений минерализации воды в скважине и используется при подготовке заключений о текущей сейсмической опасности в регионе.

Ключевые слова: удельная электропроводность воды в скважине, устранение температурного влияния.

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизированные измерения удельной электропроводности (УЭП) воды в скважине Г-1 с использованием кондуктометра МАРК-1102 были начаты группой скважинных измерений ИВиС ДВО РАН в 2014 г. Основной целью при этом было повышение оперативности и точности подобных измерений, проводимых в Камчатском филиале геофизической службы (КФ ГС РАН). В настоящее время в КФ ГС РАН ведутся измерения минерализации воды в скважине Г-1 с частотой один раз в трое суток путем отбора проб воды с дальнейшим анализом в химлаборатории. Точность измерений составляет порядка 1 %. Результаты измерений минерализации предоставляются со стороны КФ ГС РАН один раз в две недели и затем используются группой скважинных измерений при составлении регулярных прогнозных заключений о сейсмической опасности. В этом случае минерализация рассчитывается как сумма концентраций основных показателей катионно-анионного состава воды. В

составе воды скважины Г-1 преобладают хлор-ион (6600 мг/л) и натрий-ион (4200 мг/л). УЭП воды в скважине зависит от подвижностей и концентраций анионов и катионов:

$$\sigma = u_+n_+ + u_-n_-, \quad (1)$$

где u_+ , u_- - подвижности катионов и анионов ($\frac{\text{м}^2}{\text{Вс}}$),

n_+ , n_- - концентрации катионов и анионов ($\frac{\text{Кл}}{\text{м}^3}$).

Подвижность ионов зависит от температуры воды, и в этой связи УЭП воды приводится к одной температуре, например, к температуре 18⁰С. На рис. 1 представлены исходные данные по изменению УЭП и температуры воды в скважине за весь период наблюдений с использованием кондуктометра МАРК-1102 (июнь 2014 г. - март 2015 г.).

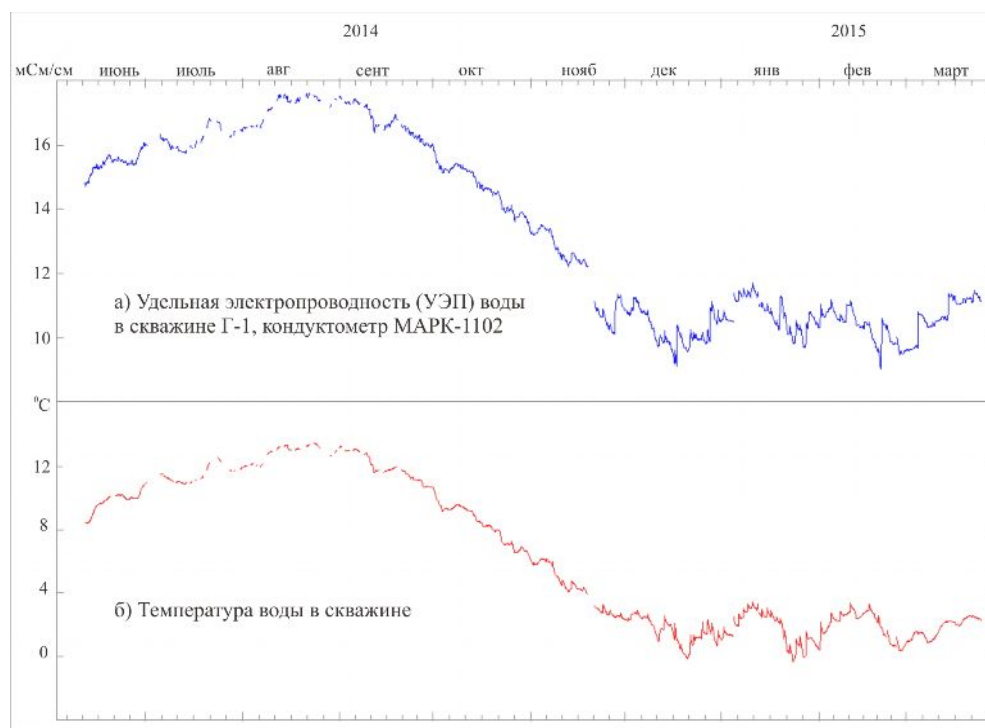


Рис. 1. Ряды исходных данных по изменению УЭП и температуры воды в скважине.

Из рис. 1 видно, что ряд УЭП фактически повторяет ряд температурных вариаций. Таким образом, в данных по УЭП воды в скважине обнаруживается значительная температурная составляющая, обусловленная двумя факторами:

1. Влиянием температуры воды скважины на подвижность ионов, которое корректируется по формуле поправки, указанной в документации к кондуктометру:

$$УЭП_{расч} = \frac{УЭП}{1 + 0.02(t - 18^{\circ}C)} \quad (2)$$

2. Влиянием температуры на измерительную аппаратуру.

К настоящему времени не представляется возможным получать термокомпенсированные данные с цифрового выхода кондуктометра, поскольку пока отсутствует интерфейс для связи с аппаратурой телеметрии, и данные поступают с аналоговых выходов прибора. При этом одновременно с данными по УЭП регистрируются данные по температуре воды в скважине.

В этой связи в работе была поставлена следующая задача:

1. Устранить температурное влияние в данных по УЭП, не связанное с изменениями подвижности ионов в воде скважины;
2. Привести данные по УЭП к температуре $18^{\circ}C$ по формуле температурной поправки.

В процессе работы опытным путем был выбран такой алгоритм подавления температурной компоненты в данных УЭП воды в скважине, когда вначале устраняется температурное влияние, не связанное с изменением подвижности ионов, а затем данные приводятся к температуре $18^{\circ}C$ по формуле температурной поправки. В этом случае итоговый ряд УЭП лучше всего согласовывался с данными измерений минерализации воды в скважине Г-1, не зависящих от температурных вариаций.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Перед тем, как приступить к компенсации температурного влияния, была проанализирована степень связи между рядами УЭП и температурой воды в скважине. Для этой цели был использован один из методов, предложенных авторами работ [2], [3], представляющий собой

исследование внутренней структуры полученных временных рядов через разложение их на трендовые и периодические составляющие. Алгоритм исследования основан на декомпозиции исходных рядов на компоненты с различными характерными периодами в диапазоне от нескольких минут до нескольких месяцев, и попарном исследовании связей между вариациями рядов УЭП и температуры на разных периодах. В случае подтверждения предположения о наличии устойчивой связи между какими-либо вариациями (возможно, связь будет обнаружена не для всех вариаций), подбирается подходящая модель компенсации температурной компоненты в ряде УЭП для каждой полученной вариации ряда УЭП на всем диапазоне характерных периодов. После применения компенсационной модели ряд УЭП, освобожденный от температурного влияния, собирается заново из скомпенсированных составляющих. Декомпозиция исходных рядов на компоненты с разными периодами проводилась следующим образом (здесь и далее для обработки временных рядов использована программа ABD [1]):

1) вариации с характерными периодами 1-3 месяца - исходные ряды УЭП и температуры воды в скважине отбирались с усреднением в 1 сутки и очищались от вариаций с периодами свыше 19 суток и менее 99 суток методом расчета трендов скользящего среднего с варьированием ширины скользящего окна;

2) вариации с характерными периодами 3 суток-1 месяц - исходные ряды отбирались с усреднением в 1 сутки и очищались от вариаций с периодами свыше 29 суток;

3) вариации с периодом 24 часа (суточный ход) - исходные ряды отбирались с усреднением в 5 минут и очищались от вариаций с периодами свыше 10 суток. Далее из них выделялась периодическая составляющая с периодом 1440 минут (1 сутки) методом наложения эпох в скользящем окне шириной 90 суток;

4) вариации с характерными периодами 3-20 часов - исходные ряды отбирались с усреднением в 5 минут и очищались от вариаций с периодами свыше 1 суток. Далее из них дополнительно отфильтровывалась предварительно выделенная периодическая суточная вариация в скользящем окне шириной 10 суток;

5) вариации с характерными периодами 20-200 минут - исходные ряды отбирались с усреднением в 5 минут и очищались от вариаций с периодами свыше 200 минут.

После проведенной декомпозиции рядов УЭП и температуры воды в скважине для каждой пары полученных вариаций в скользящем окне строились коэффициенты корреляции и регрессии, а также взаимно-регрессионные диаграммы. При анализе графиков коэффициентов корреляции и регрессии особое внимание уделялось отсутствию резких скачков в графиках, их плавному поведению в достаточно узком диапазоне значений, а также малой погрешности в расчете уравнений линейной регрессии.



Рис. 2. Декомпозиция исходных рядов УЭП и температуры воды в скважине на составляющие с различными характерными периодами.

На рис. 2 представлены графики полученных вариаций для рядов УЭП и температуры с различными характерными периодами в диапазоне от 1-3 месяца до 20-200 минут.

На рис. 3 представлены результаты построения графиков корреляции и регрессии в скользящем окне (180 суток) и взаимнорегрессионных диаграмм для вариаций с характерными периодами 1-3 месяца и 3 суток-1 месяц.

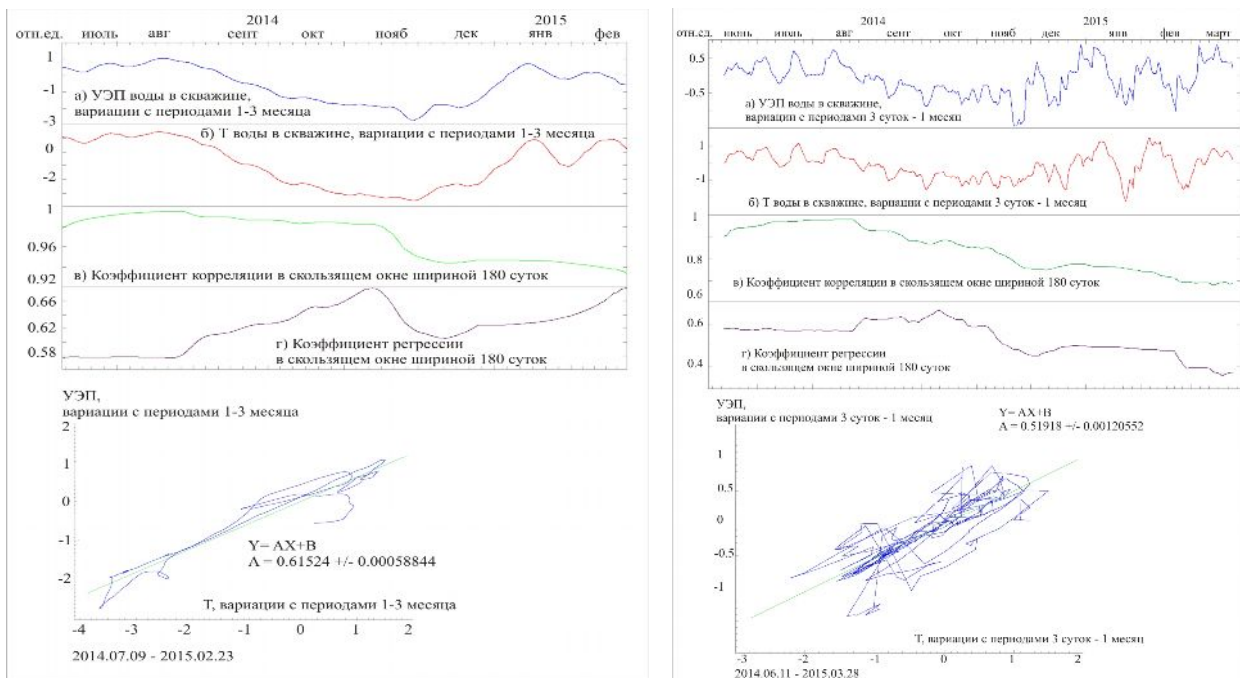


Рис. 3. Коэффициенты корреляции и регрессии в скользящем окне 180 суток и взаимнорегрессионные диаграммы для низкочастотных вариаций с периодами 1-3 месяца и 3 суток-1 месяц.

В случае наиболее длиннопериодных вариаций связь между рядами УЭП и температурой устойчивая, значения коэффициента корреляции доходят до значений, близких к 1. Резких скачков в графиках коэффициентов корреляции и регрессии не наблюдается, значения коэффициента регрессии находятся в узком диапазоне 0.58-0.66. Из взаимнорегрессионной диаграммы видно, что облако точек хорошо аппроксимируется линейным уравнением регрессии.

В случае вариаций с периодами 3 суток-1 месяц связь между рядами УЭП и температурой также наблюдается, коэффициент корреляции существенно выше в первой половине срока наблюдений, далее снижается

до 0.6. Резких скачков в графиках коэффициентов корреляции и регрессии не наблюдается, значения коэффициента регрессии находятся в диапазоне 0.4-0.6. Из взаимнорегрессионной диаграммы видно, что облако точек равномерно рассеяно вокруг тренда линейной регрессии.

Все вышеперечисленное указывает на наличие устойчивой взаимосвязи для низкочастотных компонент рядов УЭП и температуры воды в скважине.

На рис. 4 представлены результаты построения графиков корреляции и регрессии в скользящем окне (90 суток) и взаимнорегрессионных диаграмм для суточного хода, выделенного из обоих рядов.

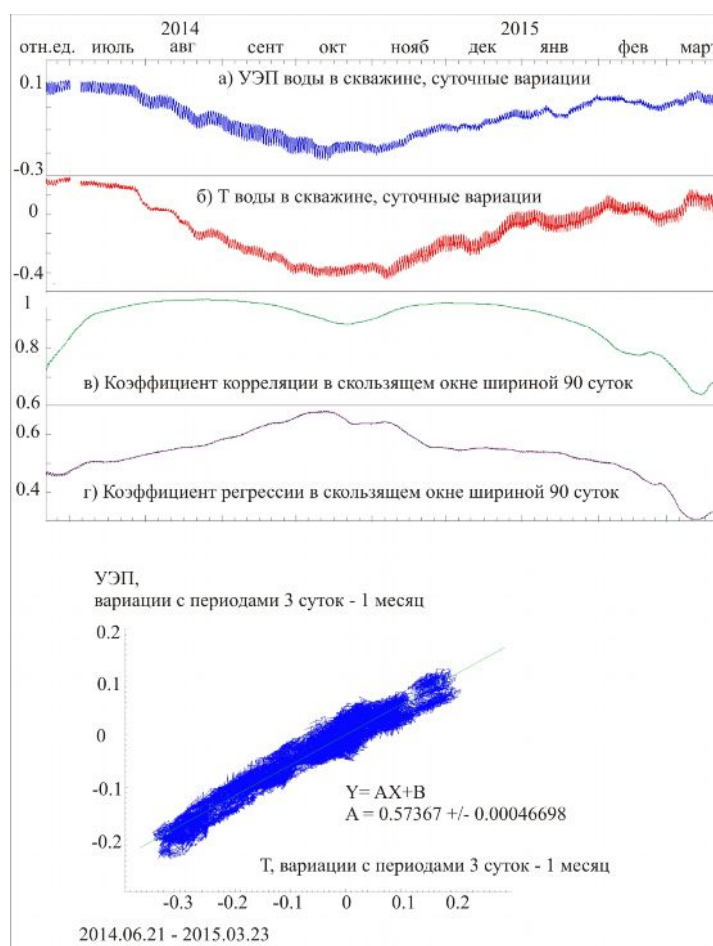


Рис. 4. Коэффициенты корреляции и регрессии в скользящем окне 90 суток и взаимнорегрессионные диаграммы для суточных вариаций.

В случае суточных вариаций связь между рядами УЭП и температурой очень устойчивая, коэффициент корреляции практически достигает 1. Резких скачков в графиках коэффициентов корреляции и

регрессии не наблюдается, значения коэффициента регрессии находятся в диапазоне 0.4-0.6, падают до 0.3 только в самом конце срока наблюдений. Из взаимнорегрессионной диаграммы видно, что облако точек равномерно рассеяно вокруг тренда линейной регрессии. Из рис. 4 можно сделать вывод, что суточные колебания в ряде УЭП воды в скважине обусловлены, главным образом, суточными изменениями температуры воды в скважине.

На рис. 5 представлены коэффициенты корреляции в 3-месячном скользящем окне для наиболее высокочастотных вариаций. Видно, что связь наблюдается только для вариаций с периодами 3-20 часов. Что касается вариаций с периодами 20-200 минут, здесь корреляция не превышает 0.5 за исключением небольшого участка в январе-феврале 2015 г., эту составляющую решено внести в итоговый ряд без изменений.

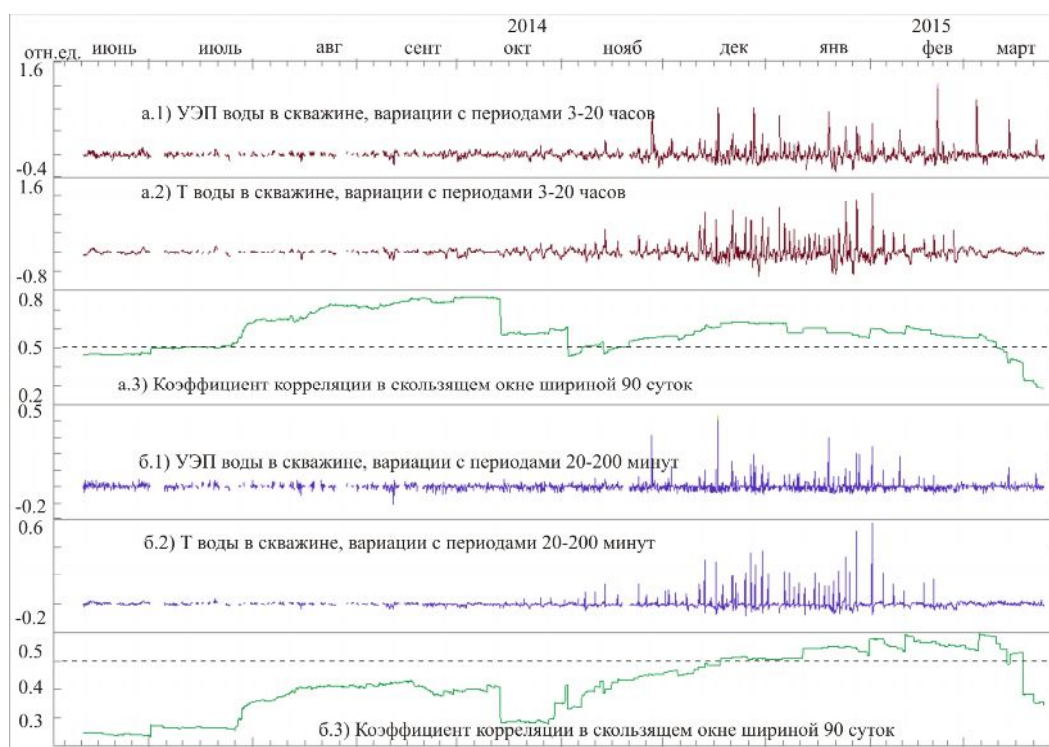


Рис. 5. Коэффициенты корреляции в скользящем окне 90 суток для высокочастотных вариаций с периодами 3-20 часов и 20-200 минут.

На рис. 6 показаны спектры вариаций с периодами 3-20 часов для рядов УЭП и температуры воды в скважине. Можно видеть, что периоды свыше суток подавлены, а также подавлена суточная периодичность

вместе с субгармониками. После анализа спектров эти вариации решено компенсировать от температурного влияния с использованием адаптивных методов фильтрации [4]. В случае вариаций с характерными периодами 3-20 часов значения коэффициента корреляции значительно ниже в сравнении с длиннопериодными составляющими, связь между рядами УЭП и температуры на этих частотах менее устойчива, и применение адаптивной фильтрации поможет избежать искажений в итоговом отфильтрованном от температурного влияния сигнале.

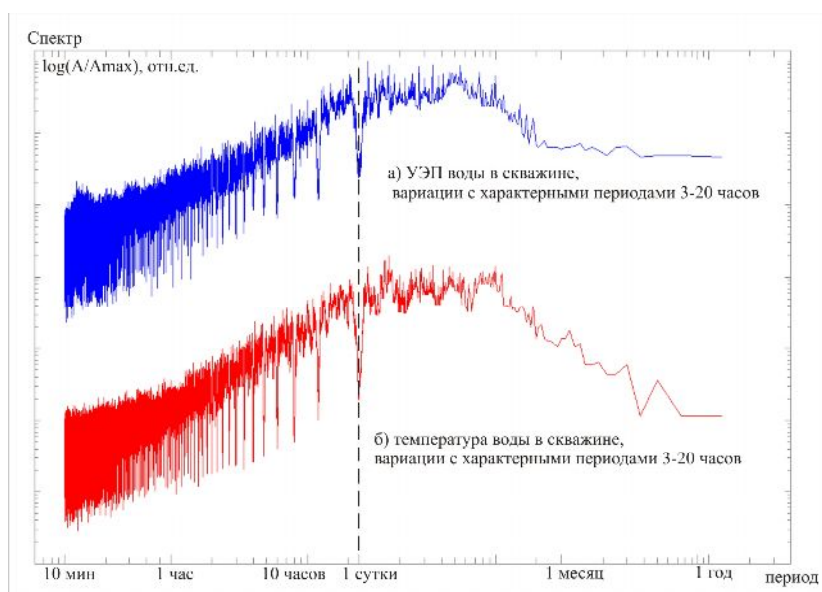


Рис. 6. Спектры вариаций с периодами 3-20 часов рядов УЭП и Т.

Надо отметить, что для рядов, обладающих низкочастотной расходимостью (тех рядов, в которых максимальную амплитуду имеют колебания с наибольшими периодами, то есть, фактически, тренды), применение любых методов шумоподавления, связанных с расчетами корреляционных матриц, в том числе, методов адаптивной фильтрации, является не вполне корректной операцией. В случае же вариаций с периодами 3-20 часов низкие частоты отсечены (рис. 6), эффект низкочастотной расходимости подавлен, и применение адаптивных алгоритмов оправдано. Для работы с вариациями с характерными периодами 3-20 часов выбран адаптивный алгоритм RLS.

В процессе работы адаптивных алгоритмов для шумоподавления решается задача прямой идентификации преобразований шума на пути от источника шума к источнику сигнала. При этом с входным сигналом фильтра коррелирует только шумовая составляющая образцового сигнала, а сигнал ошибки (разность между образцовым сигналом и выходным сигналом адаптивного фильтра) представляет собой очищенный от шума сигнал [4].

На рис. 7 представлен результат компенсации вариаций ряда УЭП с периодами 3-20 часов от влияния температуры средствами среды MatLab с использованием адаптивного алгоритма RLS, реализованного в разделе DSP Blockset среды моделирования Simulink.

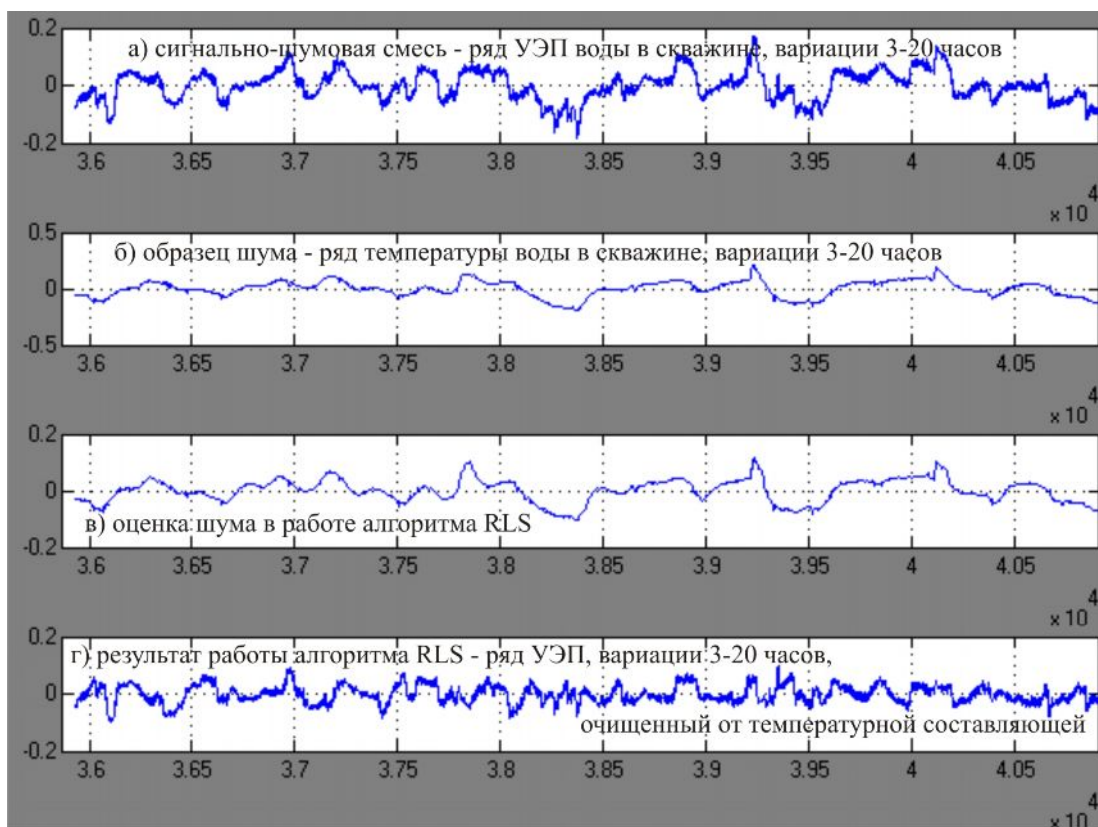


Рис. 7. Результат компенсации вариаций ряда УЭП с периодами 3-20 часов от температурного влияния средствами MatLab с использованием адаптивного алгоритма RLS.

После компенсации можно видеть, как изменился вид взаимнокорреляционной функции (ВКФ) для вариаций с периодами 3-20 часов рядов УЭП и температуры воды в скважине (рис. 8).

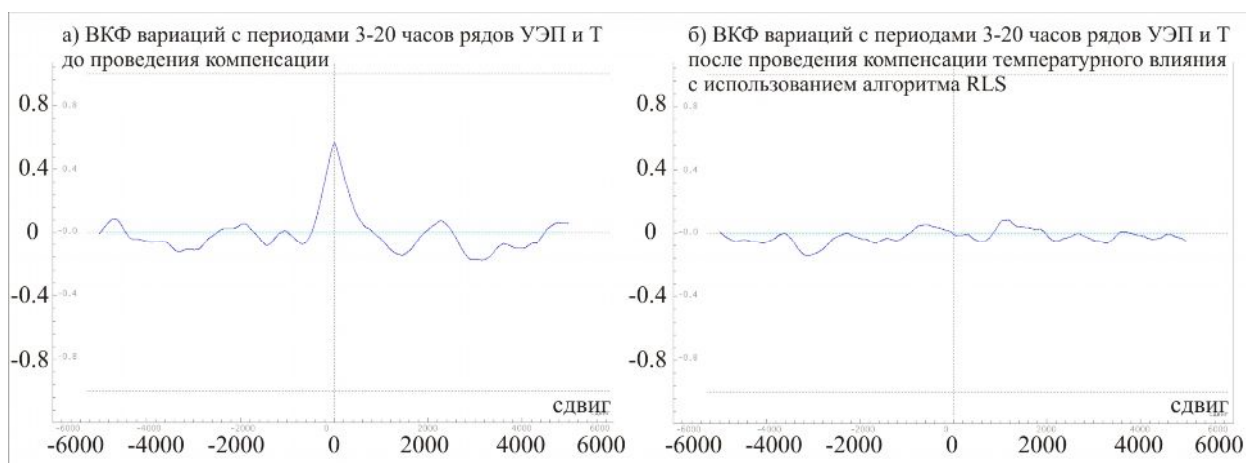


Рис. 8. Изменения в форме ВКФ для вариаций с периодами 3-20 часов рядов УЭП и температуры воды в скважине до и после применения алгоритма RLS.

По результатам проведенного анализа, в частности, построения взаимнорегрессионных диаграмм для низкочастотных вариаций и суточного хода выбрана линейная компенсационная модель с аддитивной температурной поправкой по формуле:

$$\text{УЭП}_{\text{комп}} = \text{УЭП} - A * T, \quad (3)$$

где УЭП - значения соответствующей вариации ряда УЭП, T - значения соответствующей вариации ряда температуры, A - коэффициент линейной регрессии соответствующей вариации УЭП на вариацию температуры, свободный член равен 0, т.к. тренды с периодами свыше 99 суток из рассматриваемых вариаций удалены. В табл. 1 приведены значения коэффициента A для всего диапазона характерных периодов, вариации с периодами 3-20 часов компенсировались методом RLS, вариации с периодами 20-200 минут не компенсировались.

Табл. 1. Значения коэффициента линейной регрессии A для вариаций всего диапазона характерных периодов.

вариации	1-3 месяца	3 суток -1 месяц	суточный ход	3-20 часов	20-200 минут
A	0.61524	0.51918	0.57367	RLS	-

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 9 приведены результаты проделанной работы, где итоговый ряд УЭП воды в скважине "собран" из рядов компенсированных вариаций на всем диапазоне периодов, включая удаленный на этапе декомпозиции тренд (вариации с периодами свыше 99 суток). Для оценки работы было дополнительно сделано сопоставление ряда УЭП, компенсированного от температуры, с данными по минерализации воды в скважине Г-1. Видно, что ряды УЭП и минерализации обладают общей согласованностью поведения.

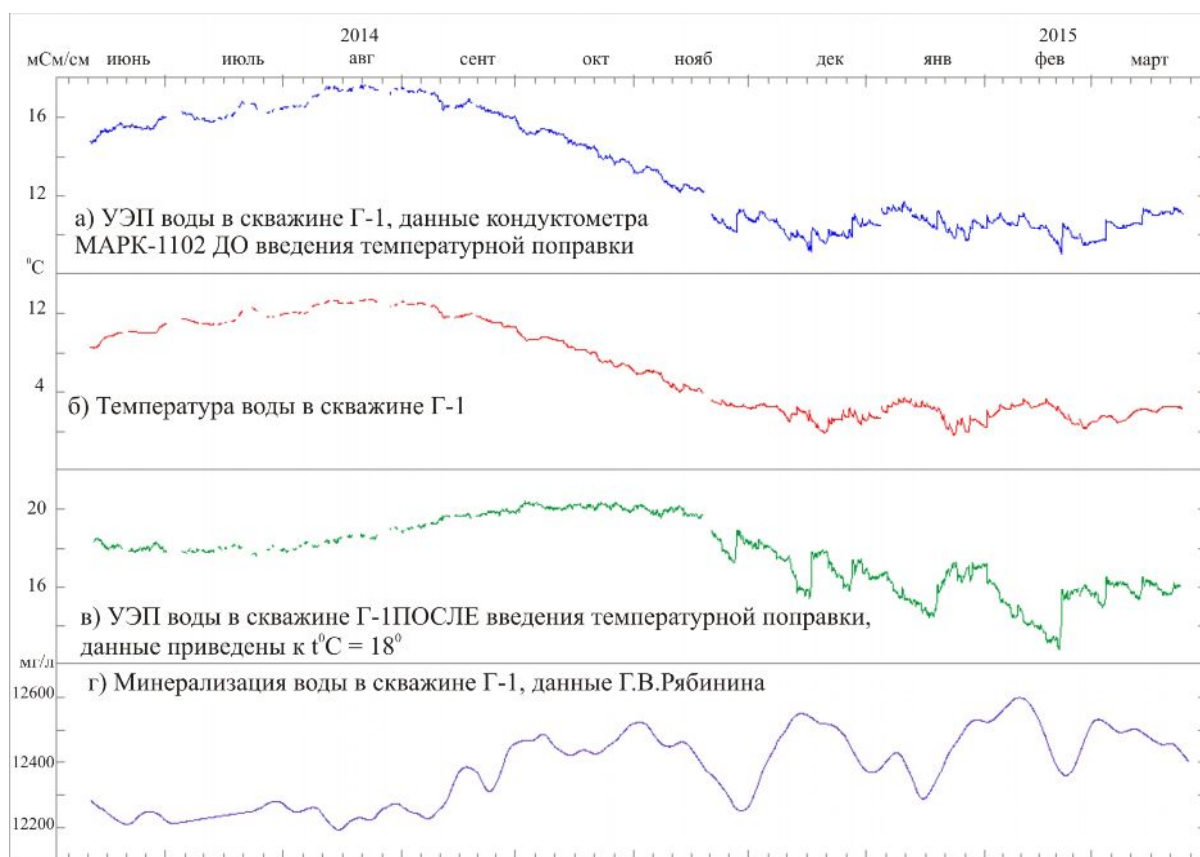


Рис. 9. Сравнение ряда УЭП, компенсированного от температуры, с введенной температурной поправкой на 18°C с данными по минерализации воды в скважине Г-1.

ВЫВОДЫ

1. Реализован алгоритм анализа и устранения температурного влияния аппаратного происхождения в ряде УЭП воды в скважине, основанный на декомпозиции исходных рядов на составляющие с

различными характерными периодами и применении к ним линейно-компенсационной аддитивной модели.

2. После температурной коррекции и приведения к температуре 18⁰С по формуле поправки наблюдается согласованное поведение ряда УЭП воды и результатов измерений минерализации воды в скважине Г-1.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Децеровский А.В., Журавлев В.И.* Анализ временных рядов с программой ABD. М.: ОИФЗ РАН, 1997. 80 с.
2. *Децеровский А.В., Журавлев В.И., Сидорин А.Я.* Некоторые алгоритмы фильтрации для геофизических временных рядов // Физика Земли. 1996. № 2. С. 56-67.
3. *Децеровский А.В., Лукк А.А.* Выделение регулярных составляющих во временных вариациях геофизических параметров методом разложения на негармонические компоненты // Вулканология и сейсмология. 2002. № 5. С.65-78.
4. *Полтавцева Е.В.* Применение алгоритмов адаптивной фильтрации для обработки данных скважинных геоакустических измерений // Материалы XIII Региональной молодежной научной конференции «Природная среда Камчатки». 15 апреля 2014 г. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

SUPPRESSION OF A TEMPERATURE COMPONENT IN THE DATA OF
THE BOREHOLE WATER SPECIFIC ELECTRICAL CONDUCTION
MEASUREMENTS

E.V. Poltavtseva

Institut of Volkanology and Seismology FEB RAS, 683006

In this work the problem of revealing and elimination of the temperature influence in the data of the borehole water specific electrical conduction (SEC) measurements in the borehole G-1 located in Petropavlovsk-Kamchatskii is put and successfully solved. This data received by applying the conductometer MARK-1102.

As a result of processing the received SEC time series with the filtered temperature influence is does not contradict with other results of borehole water mineralization measurements and is used by preparation of the current seismic danger conclusion in the region.

Key words: borehole water specific electrical conduction, elimination of the temperature influence.