

УДК 550.348

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ПЛОТИН ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИЗМЕНЕНИЙ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ

Селезнев В.С.¹, Лисейкин А.В.¹, Адилов З.А.², Кречетов Д.В.¹

¹Сейсмологический филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, lexik1979@mail.ru

²Дагестанский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Махачкала

Введение

Для контроля целостности конструкций инженерных сооружений широко распространены способы мониторинга, основанные на анализе изменений во времени различных параметров поля стоячих волн (прежде всего, собственных частот). В то же время, вариации поля стоячих волн могут быть связаны не только с появлением каких-либо дефектов в конструкции, но и с другими факторами. Например, это может быть меняющаяся во времени внешняя нагрузка, не приводящая к возникновению дефектов. В случае с плотинами гидроэлектростанций, такой нагрузкой, как правило сезонно меняющейся, является давление воды со стороны водохранилища. В особо крупных и сложно устроенных сооружениях, к которым относятся плотины гидроэлектростанций, поле стоячих волн имеет сложную структуру, для определения которой необходимо выполнять измерения с высокой детальностью. Поэтому, для исключения неверной интерпретации, прежде чем проводить исследования по мониторингу состояния сооружений на основании изменения их собственных частот, необходимо, во-первых, достоверно определить данные частоты и, во-вторых, тщательно изучить все факторы, на них влияющие. В силу необходимости принятия оперативных решений, следует разработать способ определения текущих значений частот (близкий к реальному времени).

Объектом исследования, на примере которого разрабатывается методика мониторинга собственных частот плотин гидроэлектростанций, является плотина Чиркейской ГЭС. Это самая крупная арочная плотина России, расположена в зоне высокой сейсмотектонической активности, и представляет особый интерес. Немаловажным является и тот факт, что возраст данного сооружения достаточно большой (более 50 лет с начала строительства) и уже могут проявляться разнообразные эффекты, связанные со старением строительного материала. Вместе с тем, анализ опубликованной литературы, динамических паспортов и отчетов, показывает, что до настоящего времени не проводилось детальных исследований изменений параметров собственных колебаний плотины.

Методика исследований

Изучение собственных колебаний плотины Чиркейской ГЭС выполнялось по технологии метода когерентного восстановления полей стоячих волн [1]. Исследования можно условно разделить на два этапа: первое – это выполнение измерений микросейсмических колебаний объекта по детальной сетке с использованием опорных точек и второе – выполнение цифровой обработки полученных данных с целью получения единовременных колебаний стоячих волн и определения по ним собственных частот и мод колебаний.

Измерение микросейсмических колебаний выполнялось с использованием трехкомпонентных автономных сеймостанций «Байкал-АСН» (собственная разработка ФИЦ ЕГС РАН). Регистрация проводилась сериями последовательных измерений колебаний 5-ю единицами аппаратуры. Длительность записи каждого измерения – 10 минут, всего было выполнено регистраций в 287 различных точках, размещенных по 10 профилям на разных уровнях, проходящим или по галереям внутри плотины или по балконам (рис. 1). На уровне 290 профиль вынужденно разорван из-за невозможности установки сейсмических датчиков (в этом месте проходят водоводы). Еще три единицы аппаратуры использовались на опорных точках и не меняли своего положения в ходе измерений колебаний в перемещаемых точках. Точки №1 и №2 были установлены в связи с тем, что заведомо было неизвестно, в каком месте на плотине будут проходить узловые линии, а как известно, если точка попадет близко к узлу собственных колебаний, то значение когерентности будет пониженным. В ходе анализа спектров когерентности, установлено, что положение точки №2 более подходящее для последующего использования (значения когерентности для совокупности выделенных мод выше, и, соответственно, выше точность пересчета). Точка №3 была установлена с целью последующей реализации оценки сейсмостойкости плотины. Измерения проводились дважды:

при минимальном и максимальном уровнях водохранилища (далее – УВБ) с целью определения особенностей сезонных изменений полного поля стоячих волн.

После проведения регистрации выполнялась цифровая обработка данных для пересчета разновременных колебаний в одновременные согласно методике [3]. Отметим, что в результате такого пересчета используются фильтры Винера, которые пропускают стоячие волны, являющиеся когерентными, и отфильтровывают некогерентные сигналы, к которым относятся бегущие волны-помехи. Кроме этого, использованный метод позволяет оценивать погрешность получаемых в результате пересчета амплитуд стоячих волн, которая тем меньше, чем большее время регистрации в каждой точке. В данном случае, при длительности регистрации 10 минут, погрешности восстановления амплитуд не превышали 3-5%, как и на большинстве подобных объектов.

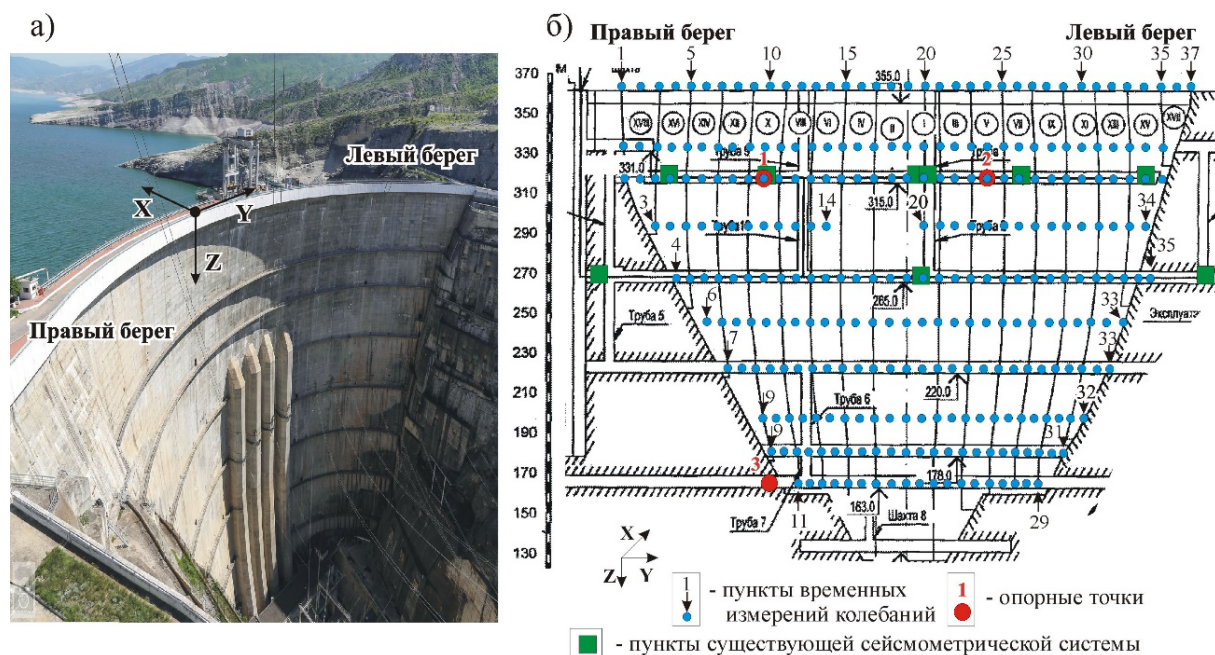


Рис. 1. Внешний вид плотины Чиркейской ГЭС (а) и реализованная схема сейсмических наблюдений (б)

С целью осуществления непрерывного мониторинга собственных частот использовались записи с постоянной сейсмометрической системы, установленной в плотине. По ежедневным записям микросейсмических колебаний рассчитывались усредненные спектры. По их локальным максимумам амплитуд определялись значения частот, соответствующих модам, определенным на первом этапе. При этом, частоты определяются в точках, расположенных в пучностях стоячих волн. Далее исследовались факторы, влияющие на изменения частот, но не связанные с изменением технического состояния плотины. Например, меняющийся уровень водохранилища. Исключение таких факторов повышает степень достоверности результатов мониторинга технического состояния сооружения.

Обсуждение результатов

Данные, приведенные на рис. 2, показывают изменения амплитудных спектров когерентных колебаний, по результатам двух экспериментальных работ – при максимальном и минимальном УВБ, вдоль профиля, проходящего в галерее плотины на уровне 315 м. Из рисунка видно, что в обоих случаях подавляющая часть энергии колебаний сосредоточена на Х-компоненте, направленной радиально. Так, колебания 1-й, 2-й и 4-й мод (номер моды принят количеству наблюдаемых пучностей вдоль профиля), хотя и с разными частотами и интенсивностями, повторяются при разных напорах. На частотах между 2-й и 4-й модами наблюдается еще одно устойчивое колебание, имеющее одну пучность, которое можно классифицировать как вторичную первую моду, то есть в данном случае наблюдаются две первых моды с разными частотами колебаний. Такое явление связано с тем, что соответствующие стоячие волны образуются в объектах, объединяющих разные секции плотины. Остальные колебания значительно менее выражены и не повторяются по форме при разных режимах наполнения водохранилища. Можно сказать, что поля стоячих волн на частотах, отличных от двух 1-х, 2-й и 4-й форм, абсолютно разные. Такое различие, на наш взгляд, может быть вызвано существенным изменением напряженно-деформированного состояния плотины при изменении УВБ.

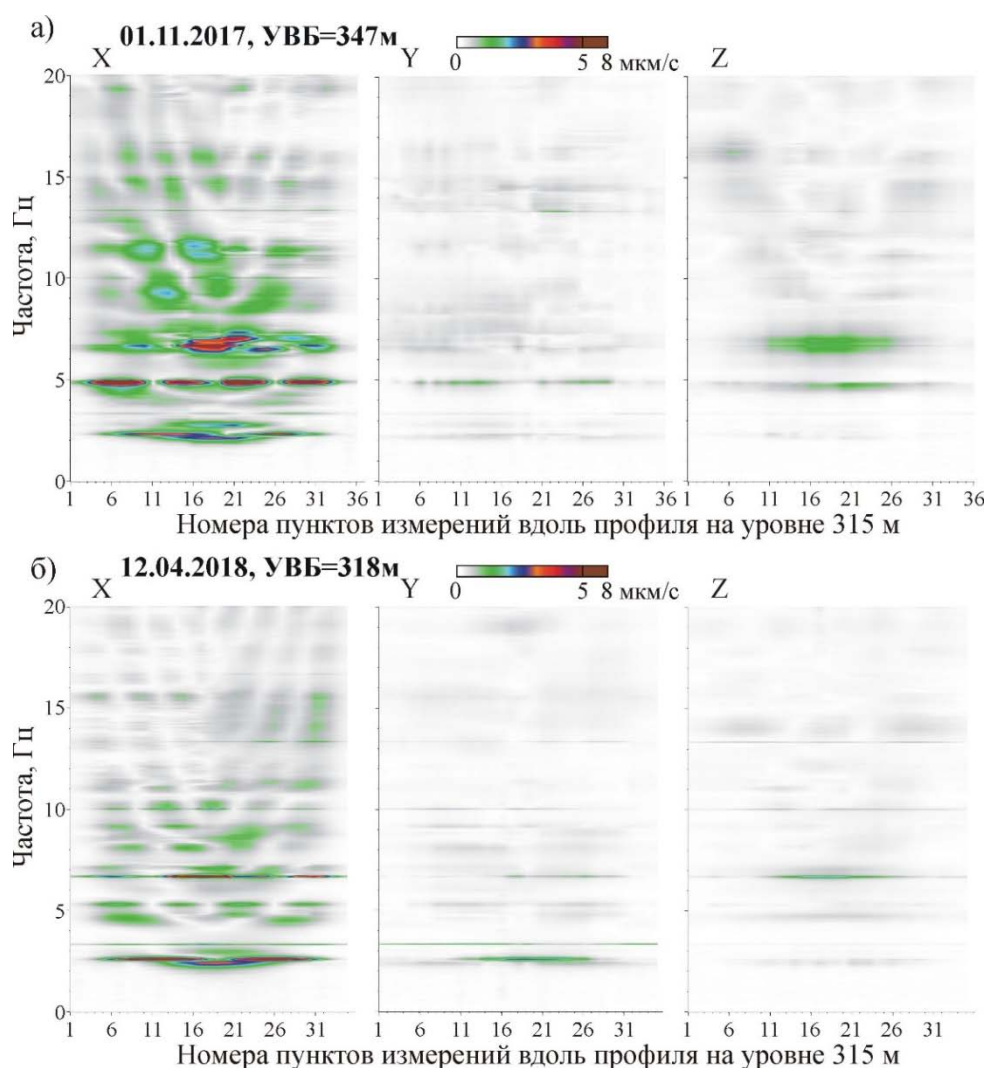


Рис. 2. Наборы амплитудных спектров когерентных колебаний плотины вдоль профиля на уровне 315 м при максимальном (а) и минимальном (б) уровнях водохранилища.

Из рис. 3, на котором представлены схематичные изображения двух 1-х, 2-й и 4-й мод собственных колебаний плотины, видно, что при максимальном и минимальном УВБ они практически не меняются, а меняются только частоты. Заметны лишь некоторые искажения формы 1-й моды, которые, по нашему мнению, связаны с затягиванием колебаний 2-й моды, по частоте близкой к 1-й. Это возможно из-за пониженной добротности колебаний и наблюдалось нами на многих других исследованных зданиях и сооружениях.

В силу того, что формы колебания только четырех мод (двух 1-х, 2-й и 4-й) повторяются как при минимальном, так и при максимальном уровнях водохранилища, именно эти моды можно использовать для непрерывного мониторинга технического состояния плотины Чиркейской ГЭС. Остальные собственные колебания, безусловно, тоже несут в себе информацию о состоянии плотины. Однако, из-за изменения поля стоячих волн при смене уровня водохранилища, эти колебания будут наблюдаться лишь в ограниченных временных промежутках.

Рассмотрим более подробно, как меняются эти частоты в зависимости от уровня наполнения водохранилища. Из рис. 4а, на котором показаны результаты обработки данных с сейсмометрической системы плотины за 2016 г, видно, что зависимость между значениями частот и УВБ неоднозначная. Графики имеют отличия в зависимости от режима водохранилища – его наполнения или сработки. В целом, отмечается запаздывание изменений частот от хода изменений УВБ. Это приводит к образованию петель на графиках, подобных петлям гистерезиса. Аналогичный эффект был замечен нами ранее при исследованиях по мониторингу собственных частот плотины Саяно-Шушенской ГЭС [2]. Можно предположить, что такое запаздывание связано с тем, что плотина (или, вся система плотина-основание) не мгновенно реагирует на изменения уровня водохранилища, а постепенно

релаксирует. Если это не учитывать, то при выполнении мониторинга собственных частот плотины может быть сделан неправильный вывод о ее состоянии.

Для оценки времени релаксации мы ввели временной сдвиг между рядами изменений УВБ и значений частот (рис. 4б). Видно, что после сдвига на 5, 7 и 11 суток для каждой из трех собственных частот, зависимости приобретают более простой и однозначный вид. Их можно приближенно аппроксимировать линейными функциями. Таким образом, определив параметры этих функций, можно прогнозировать изменения значений собственных частот от УВБ. В дальнейшем, сопоставляя прогнозные значения частот с измеренными, можно осуществлять непрерывный мониторинг технического состояния плотины: если измеренные и прогнозные значения частот совпадают, то можно полагать, что состояние сооружения остается стабильным.

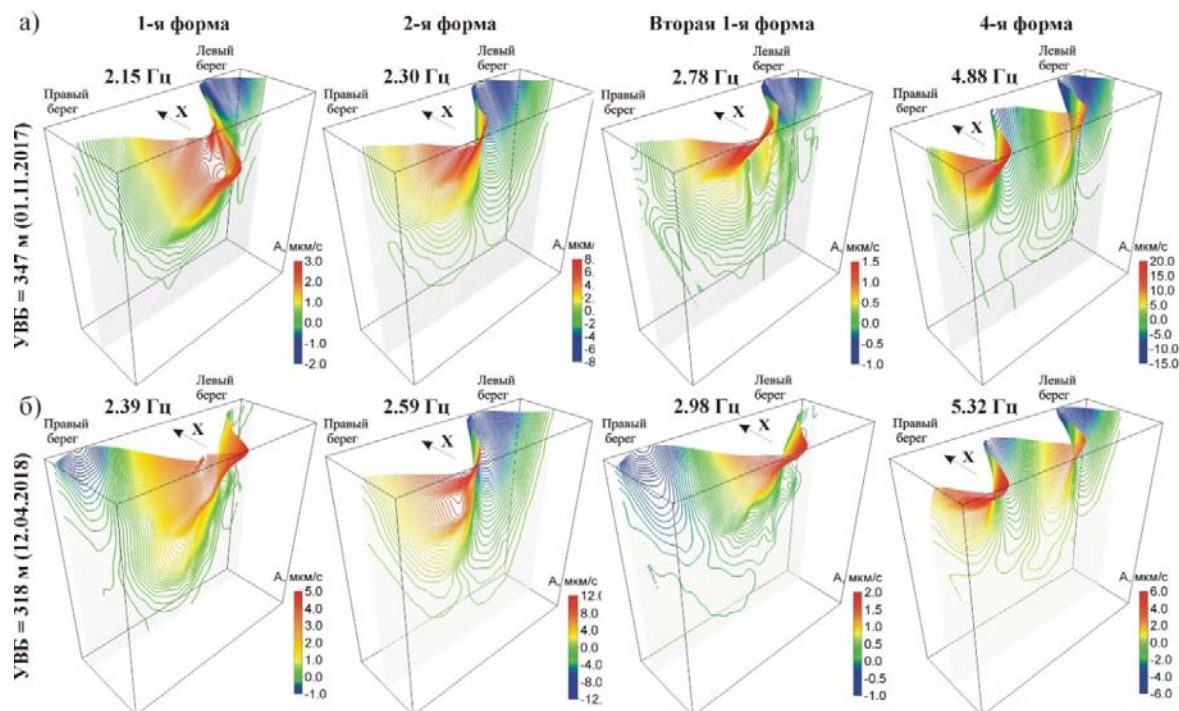


Рис. 3. Схематичные изображения двух 1-х, 2-й и 4-й мод радиальных колебаний плотины Чиркейской ГЭС при высоком (а) и низком (б) УВБ.

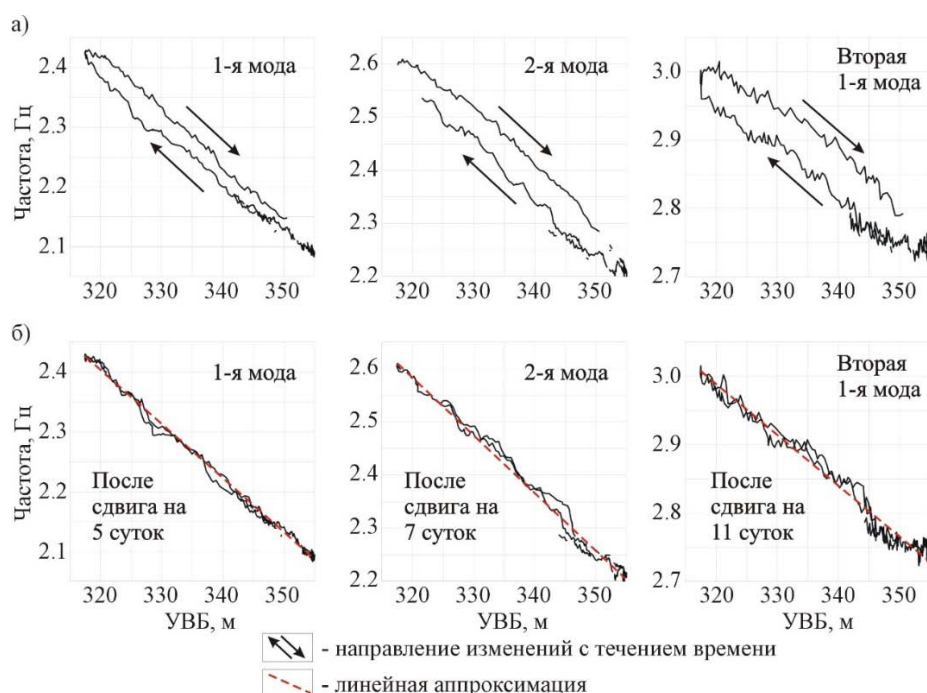


Рис. 4. Зависимости собственных частот плотины от уровня верхнего бьефа (УВБ) за 2016 г. (а) – единовременные зависимости; (б) – зависимости после временного сдвига.

Как известно, из работы [2], собственные частоты крупных сооружений можно определять из записей сейсмических станций, расположенных на некотором удалении от них. На удалении 5.5 км от плотины Чиркейской ГЭС находится сейсмостанция «Дубки» (код DBKG, рис. 5а). Мы попытались определить, какую информацию можно извлечь из непрерывных записей этой сейсмостанции. Для этого применялась методика определения собственных частот сооружений по записям удаленных сейсмостанций, описанная в работе [2]. Анализ сейсмограмм показал, что из микросейсмических колебаний записей сейсмостанции, длительностью до 1 суток, используя методику накопления спектров, можно определить значения частот 1-й моды собственных колебаний плотины. Для оценки достоверности таких определений, полученные значения сравнивались со значениями, определенными по спектрам колебаний, фиксируемых сейсмокомплексом, расположенным в теле плотины. Как видно, из рис. 5б, где представлены ряды изменения за полугодовой период УВБ и значений частоты 1-й формы, определенной разными способами, последняя устанавливается с точностью до 0.03 Гц. Таким образом, в случае отсутствия данных о колебании тела плотины, для целей мониторинга можно использовать записи сейсмостанции «Дубки». Однако, нужно отметить, что записи полезного сигнала на этой сейсмостанции осложнены всевозможными помехами. Поэтому, эти записи следует использовать только в исключительных случаях. Например, при выходе из строя регистрирующей аппаратуры, расположенной в плотине.

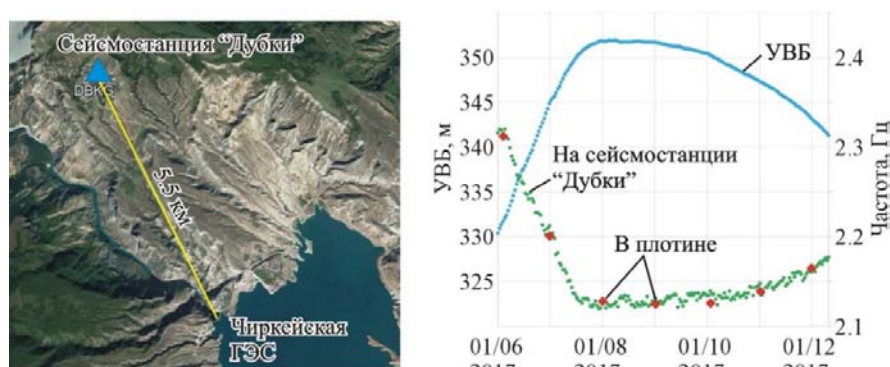


Рис. 5. Положение сейсмостанции «Дубки» и изменения значений частот 1-й моды и УВБ.

Выводы

1. Выполнены детальные исследования плотины Чиркейской ГЭС методом когерентного восстановления полей стоячих волн при максимальном и минимальном уровнях наполнения водохранилища с определением частот и форм собственных колебаний.
2. Установлено, что полное поле стоячих волн меняется при изменении УВБ, а неизменными остаются две 1-х, 2-я и 4-я формы собственных колебаний, частоты которых, в целом, увеличиваются с ростом уровня водохранилища. Данные формы можно использовать для непрерывного мониторинга технического состояния плотины путем периодического определения значений частот по записям сейсмической аппаратуры.
3. Определено, что существуют дополнительные факторы, приводящие к эффекту гистерезиса в зависимости между значениями УВБ и собственными частот, предположительно, связанные с релаксационными процессами в теле плотины или в системе плотина-основание после изменения уровня водохранилища.
4. Предложена методика мониторинга состояния плотины, основанная на сопоставлении наблюдаемых значений частот с прогнозными. Последние определяются по линейным зависимостям от УВБ с учетом временного сдвига, связанного с релаксационными процессами.

Список литературы

1. Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А. Когерентное восстановление полей стоячих волн как основа детального сейсмологического обследования инженерных сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2007. № 3. С. 20–24.
2. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Кречетов Д.В. О мониторинге состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС на основе совместного анализа изменений ее собственных частот и уровня водохранилища // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. Т. 2. № 2. С. 58–62.
3. Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Кузьменко А.П., Барышев В.Г., Сабуров В.С. Способ приведения к единому времени регистрации разновременных записей измерений // патент на изобретение RUS 2150684 26.08.1998.