

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ГИДРОГЕОСЕЙСМИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ УРОВНЯ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКИХ СКВАЖИНАХ

*Калинов Г.А.<sup>1</sup>, Копылова Г.Н.<sup>2</sup>, Калинов Д.Г.<sup>1</sup>, Смирнов А.А.<sup>2</sup>, Сизова Е.Г.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> ООО Полином, г. Хабаровск, polinom@poli.khv.ru

<sup>2</sup> Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, gala@emsd.ru

### Введение

Камчатский филиал Геофизической службы РАН с 1977 г. проводит наблюдения за физико-химическими параметрами режима подземных вод в скважинах Камчатки с целью поиска предвестников землетрясений и других видов гидрогеосейсмических эффектов. Долговременный мониторинг показал, что вариации уровня и показателей химического состава подземных вод могут использоваться в системе прогнозирования сейсмической опасности для оценки времени возникновения сильных землетрясений Камчатки [3-6]. Для эффективного использования данных наблюдений в скважинах в сейсмопрогностических целях необходимо применение высокоточной и надежной измерительной аппаратуры, позволяющей проводить мониторинг в полевых условиях и режиме близком к реальному времени.

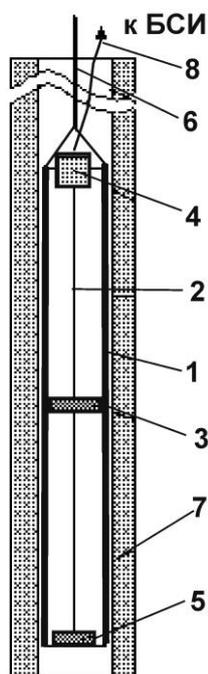
При проведении наблюдений в пьезометрических скважинах наиболее надежным и апробированным в России является аппаратный комплекс для синхронных измерений уровня, температуры и электропроводности воды, а также атмосферного давления и температуры воздуха, созданный в ООО Полином, г. Хабаровск [2]. В докладе представлены технические характеристики основных элементов измерительного комплекса, а также данные по регистрации гидрогеосейсмических вариаций в режиме скважин ЮЗ-5 и Е-1 во время сейсмической активизации на Камчатке в феврале-марте 2013 г.

### Измерительная станция

Основным блоком измерительной станции является система регистрации уровня воды в скважине (рис. 1-3). В КФ ГС РАН для уровнемерных наблюдений используются модификации Кедр-А2-У и Кедр-ДМ-У, в которых измерения уровня воды осуществляются ультразвуковым уровнемером. Индексы А и ДМ обозначают способы хранения и передачи информации с наблюдательных скважин. В Кедр-А2 результаты измерений хранятся в переносном модуле энергонезависимой памяти; передача информации выполняется посредством смены накопителя данных. В Кедр-ДМ имеет телеметрический канал на основе сотовой или спутниковой связи.

*Ультразвуковой скважинный уровнемер.* Метод определения уровня воды основывается на измерении времени распространения ультразвукового импульса (УЗИ) в вертикальном звукопроводе. Звукопровод представляет собой тонкий металлический стержень. При этом УЗИ формируется непосредственно на границе раздела жидкость-воздух [7]. На основе этого метода ранее был разработан ультразвуковой уровнемер для измерения уровня жидкости в резервуарах [8]. Конструкция скважинного уровнемера была существенно изменена, что позволило улучшить его метрологические характеристики и надежность, уменьшить габариты.

Рис. 1. Скважинный уровнемер. 1 – защитная труба, 2 – стержень-звукопровод, 3 – поплавко-излучатель УЗИ, 4 – блока питания, синхронизации и приема УЗИ, 5 – эталонный излучатель УЗИ, 6 – трос, 7 – скважина, 8 – соединительный кабель.



Скважинный уровнемер (рис. 1) состоит из: корпуса, представленного защитной трубой диаметром 51 мм и длиной до 3 м (1); вертикального стержня-звукопровода, натянутого в центре трубы (2); поплавка-излучателя УЗИ, коаксиально охватывающего стержень и свободно перемещающегося вдоль него (3); блока питания, синхронизации и приема УЗИ, укрепленного на верхнем конце стержня (4); эталонного излучателя УЗИ, укрепленного на нижнем конце стержня (5). Уровнемер опускается на специальном тросе (6) в

скважину (7). На поверхности земли у устья скважины расположен блок сбора информации БСИ (логгер), связь с которым осуществляется по кабелю (8).

Возбуждение УЗИ производится пьезокерамикой в виде кольца, коаксиально охватывающего звукопровод. На пьезокерамику синхронно с запуском «счетчика времени» подается электрический импульс, который вырабатывается специальной электронной схемой, расположенной в поплавке. Для подачи питания и обеспечения синхронизации процесса излучения акустического импульса разработана специальная система на основе индукционного метода. В качестве первичного витка трансформатора используются металлический стержень – звукопровод и защитная труба. Вторичная обмотка трансформатора расположена внутри корпуса поплавка.

Индукцированный сигнал разделяется во времени на сигнал питания, обеспечивающий «накачку» накопительного конденсатора, и импульс синхронизации (СИ) (рис. 2). Включение питания излучателя происходит с задержкой по времени  $T_{зад-1}$  по отношению к сигналу «накачки» и длится 100 мкс ( $T_{стр}$ ).

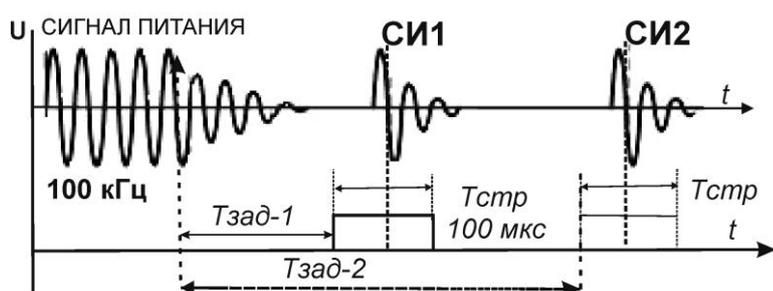


Рис. 2. Диаграмма работы схемы синхронизации акустического излучателя. Пояснения см. в тексте.

На рис. 3а представлена функциональная схема питания и синхронизации ультразвукового излучателя. Блоки 1–3 расположены на неподвижном основании, блоки 4–11 – внутри поплавка.

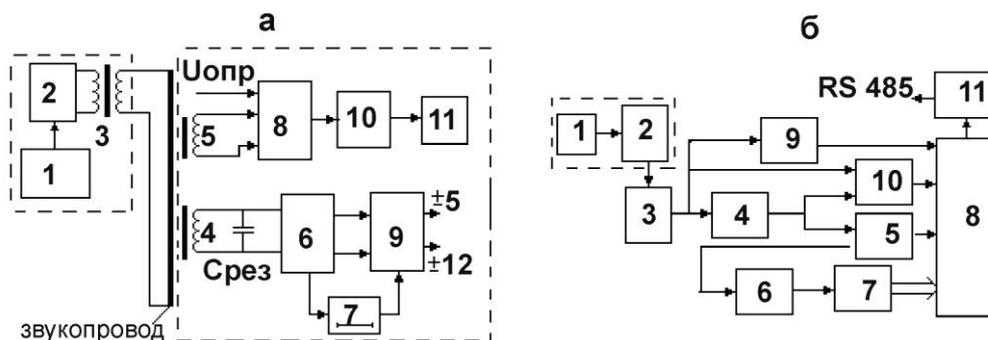


Рис. 3. Функциональная схема скважинного уровнемера: а – акустического излучателя; б – приема акустических сигналов. Пояснения см. в тексте.

Микропроцессор 1 формирует необходимые для работы сигналы. На вход смесителя 2 поступают сигналы частоты «накачки» и синхронизации. Выход смесителя 2 подключен к понижающему трансформатору 3. Вторичная обмотка трансформатора питания 4 и конденсатор Срез образуют резонансный контур, что позволяет получить высокое напряжение на выходе детектора напряжения 6. «Накачка» накопительных конденсаторов блока 6 производится в течение 20 мс частотой 16 кГц. Микропроцессор вырабатывает СИ через определенное время после окончания видео-импульса частоты «накачки» (рис. 2). После прекращения сигнала «накачки» в соответствии с диаграммой на рис. 2 через время  $T_{зад-1}$ , определяемое нормированной задержкой, схема 7 (рис. 3а) вырабатывает строб-импульс  $T_{стр}$  длительностью 0.1 мс. Во время его действия блок 9 обеспечивает питание сдвоенного фазового обнаружителя синхроимпульса 8 и блока 10, формирующего электрический импульс для возбуждения пьезокерамики 11. Фазовый обнаружитель 8 регистрирует первый переход напряжения СИ через нулевой уровень. При этом момент начала формирования акустического импульса не зависит от амплитуды СИ и параметров первичного витка. Конструкция и работа фазового обнаружителя описаны в работе [1]. Электронная схема поплавка, включая трансформаторы питания и синхронизации, размещается на печатной плате диаметром 31 мм, весом 7.5 г.

На рис. 3б представлена функциональная схема блока приема и измерения времени прихода УЗИ. Основными факторами, влияющими на работу уровнемера, являются точность регистрации момента прихода УЗИ и измерение времени его распространения ( $t_{узи}$ ). При перемещении акустического излучателя (поплавка) вдоль волновода амплитуда и форма переднего фронта

акустического сигнала существенно изменяются. В уровнемерах Кедр-А2-У и Кедр-ДМ-У реализован фазовый способ регистрации УЗИ, работа которого аналогична регистрации СИ поплавком-излучателем [1]. Началом отсчета для времени распространения УЗИ от излучателя до приемника является СИ, запускающий генератор УЗИ в поплавке. УЗИ, сформированный излучателем, распространяется по стержню волновода и поступает на пьезоприемник 1 (рис. 3б) и далее на вход малошумящего усилителя 2. Элементы 1 и 2 конструктивно совмещены и установлены на торце волновода. Далее сигнал проходит через ФВЧ 2-ого порядка 3, усилитель 4 и ограничитель амплитуды 5. Блок схемы 6 обеспечивают фазовый прием первой полуволны импульса. На выходе схемы 6 формируется импульс длительностью  $t_{узи}$ , который «оцифровывается» счетчиком 7. Микропроцессор 8 считывает состояние счетчика.

После окончания измерительного импульса микропроцессор вычисляет расстояние от излучателя до преобразователя. При работе схемы учитывается соотношение сигнал-шум [1]. Это делается с помощью детектора шума 9 и пикового детектора 10. Посредством встроенного интерфейса RS 485 (11) данные по линии связи предаются в микропроцессор блока сбора информации.

На точность измерения уровня воды влияют температура, линейное расширение металлического волновода, дрейф частоты кварцевого генератора и пр. С целью исключения помех используется метод измерения уровня с встроенной автоматической калибровкой [7]. Суть метода заключается в установке на нижнем конце звукового волновода калибровочного излучателя, аналогичного излучателю поплавка (5 на рис. 1, рис. 3а). Микропроцессор преобразователя (8 на рис. 3б), изменяя задержку импульса синхронизации (СИ2 на рис. 2), последовательно запускает два процесса измерения: с акустическим излучателем, расположенным на подвижном поплавке, или с калибровочным излучателем, который жестко закреплен на конце волновода. На основе измерения времени распространения калибровочного УЗИ микропроцессором рассчитываются поправки для времени  $t_{узи}$ .

Ультразвуковой скважинный уровнемер имеет следующие метрологические характеристики: диапазон измерения уровня – до 3 м; разрешающая способность датчика уровня – 0.1 мм; основная погрешность измерения уровня – 0.5 %; рабочий диапазон температур –  $0 \div +80^\circ \text{C}$ ; габаритные размеры –  $51 \div 3180$  мм; масса – 3.5 кг.

**Глубоководный зонд.** В пьезометрической скважине, кроме уровня воды, необходимо измерять вариации температуры и электропроводности воды, характеризующие физико-химическое состояние подземных вод. Для измерений температуры и электропроводности был создан глубоководный измерительный зонд, который устанавливается в стволе скважины в диапазоне глубин 10-200 м от поверхности земли. На рис. 4а и 4б представлены функциональная схема зонда и конструкция датчика электропроводности. Пояснения см. в тексте.

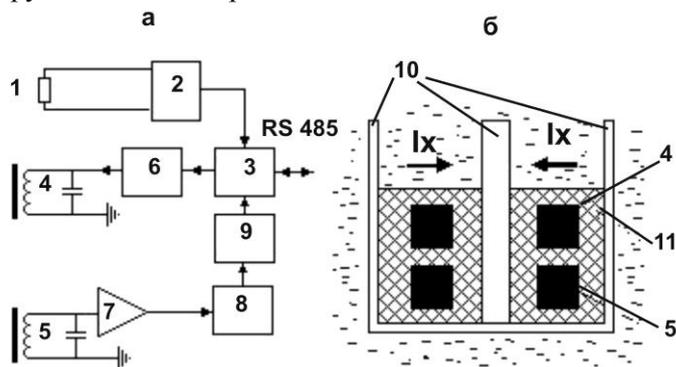


Рис. 4. Глубоководный зонд: а – блок-схема; б – конструкция датчика электропроводности. Пояснения см. в тексте.

В качестве датчика температуры (1 на рис. 4 а) применяется платиновое сопротивление типа Platinum RTDs 1000, подключенное к АЦП (2). В качестве АЦП используется 16-разрядный малошумящий сигма-дельта преобразователь с дифференциальным входом AD7788. Управление

устройством выполняется встроенным микропроцессором 3 средствами SPI-интерфейса. Расчет температуры производится микропроцессором по специальному алгоритму с погрешностью не более 0.5 % в диапазоне изменения температуры  $0 \div 100^\circ \text{C}$ .

Датчик проводимости основан на индукционном способе, который был предложен в работе [9] и представляет собой систему двух соосно расположенных тороидальных катушек индуктивности (4 и 5 на рис. 4 б), охваченных общей петлей связи в виде элементов корпуса датчика 10 и жидкостного проводника контролируемой водной среды. Для повышения электрической чувствительности и снижения электрических помех, обусловленных индуктивными и емкостными связями, приемная катушка находится в незамкнутом экране. Генератор 6 подает переменное

напряжение амплитудой 10 В на излучающую катушку 5. Электромагнитное поле вихревых токов возбуждает в приемной катушке 4 ЭДС, величина которого пропорциональна электропроводности жидкости, в которую погружен датчик. ЭДС с катушки поступает на усилитель 7, детектор 8 и через АЦП 9 – на микропроцессор. Схема формирует постоянное напряжение, которое прямо пропорционально проводимости в диапазоне от 10 мВ до 3.3 В. У датчика проводимости фактически отсутствуют электроды и электрический контакт с жидкостью, что позволяет использовать его в полевых условиях и на больших глубинах. Оцифрованные значения температуры и проводимости по запросу передаются в блок сбора информации.

**Блок сбора информации.** Центральным узлом измерительного комплекса является блок сбора информации (БСИ), который представляет собой специализированный регистратор данных (логгер), расположенный на поверхности в оголовке скважины. Программное управление логгера и специализированными датчиками осуществляется микропроцессором серии AVR типа ATMEGA128.

В исходном состоянии микропроцессор БСИ всегда находится в «спящем» режиме и потребляет от источника напряжением +12 В не более 70 мкА. При воздействии сигналов от кнопок управления выносного индикатора или от минутных импульсов встроенных часов процессор активизируется. Логгер производит опрос измерительных датчиков, заносит результаты в накопитель данных, осуществляет сеансы связи и переходит в режим пониженного энергопотребления. Информация с уровнемера, датчиков электропроводности и температуры воды по специальному кабелю (интерфейс RS 485) передается на микропроцессор БСИ. Температура воздуха и атмосферное давление измеряются датчиками, установленными на плате БСИ и подключенными к его микропроцессору. Опрос всех датчиков производится с заданной периодичностью от 5 минут до 1 часа.

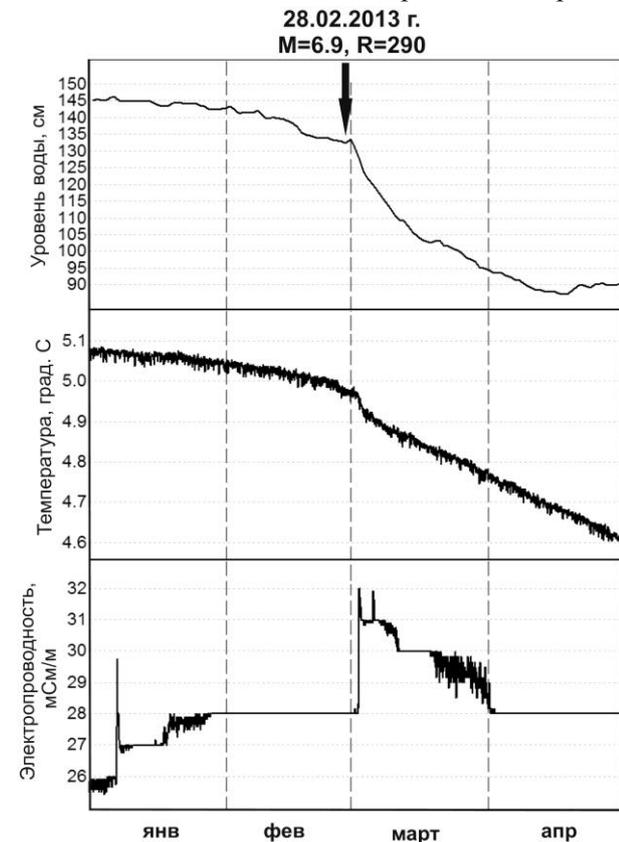
Микропроцессор БСИ контролирует напряжение батареи питания и токи потребления в измерительных каналах с помощью встроенных АЦП. БСИ обеспечивает минимизацию электропотребления всеми устройствами и защиту от короткого замыкания в измерительных каналах. В КФ ГС РАН информация с измерительных станций Кедр-ДМ передается по каналам сотовой связи. Управление модемами осуществляет микропроцессор средствами интерфейса RS 232 (конвертор UART – RS 232). Для сотовой связи применяются модемы TC65 (Terminal фирмы Siemens), которые работают в диапазоне GSM 850/900/1800/1900 МГц. Пакетная передача данных осуществляется с использованием модема с встроенными средствами GPRS. Передача информации осуществляется

один раз в час.

#### Результаты наблюдений

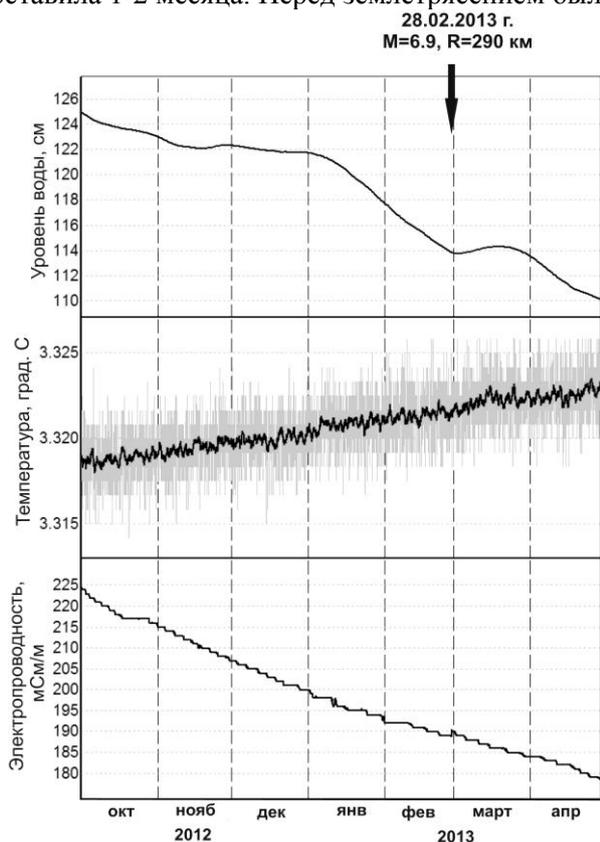
На рисунках 5 и 6 представлены изменения уровня, температуры и электропроводности воды, зарегистрированные в скважинах Ю3-5 и Е-1 в период землетрясения 28 февраля 2013 г с использованием представленного выше измерительного комплекса. Начало наблюдений на скв. Ю3-5 – 23 сентября 2010 г., на скв. Е-1 – с 15 сентября 2011 г. Характеристика наблюдательных скважин приводится в [3, 4, 6]. Интервал измерения параметров составлял 5 минут; передача данных в КФ ГС РАН осуществлялась один раз в час по каналам сотовой связи. Обработка данных проводилась ежедневно, что позволяло диагностировать гидрогеосейсмические вариации параметров режима подземных вод в режиме близком к реальному времени.

Рис. 5. Изменения уровня, температуры и электропроводности воды в скважине Ю3-5 в период землетрясения 28 февраля 2013 г. (январь-апрель 2013 г.); R – эпицентральное расстояние, км.



В режиме скв. Ю3-5 (рис. 5) обнаружены гидрогеосейсмические вариации, вызванных воздействием сейсмических волн от землетрясения, в т. ч. понижение уровня и температуры воды, увеличение электропроводности с

максимальной амплитудой 4 мСм/м. Продолжительность развития постсейсмических эффектов составила 1-2 месяца. Перед землетрясением было зафиксировано повышение электропроводности на 4 мСм/м 7 января 2013 г., т.е. примерно за 6 недель до землетрясения.



В скв. Е-1 перед землетрясением проявился гидрогеодинамический предвестник [3, 6] с 16 января по 27 февраля в форме понижения уровня воды с повышенной скоростью (рис. 6). На основе этого предвестника 1 февраля 2013 г. Г.Н. Копыловой был подготовлен среднесрочный прогноз о повышенной вероятности возникновения сильного землетрясения на Камчатке, который был передан в Камчатское отделение Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений.

Рис. 6. Изменения уровня, температуры (серым цветом показаны 5-минутные данные, черным цветом – среднечасовые) и электропроводность воды в скважине Е-1 в период землетрясения 28 февраля 2013 г. (октябрь 2012 – апрель 2013 г.)

После землетрясения в скв. Е-1 в течение 1.5 мес. наблюдалось постсейсмическое повышение и восстановление уровня воды. В течение двух суток после землетрясения в изменениях электропроводности фиксировалось слабое повышение с амплитудой 2 мСм/м. 12

января 2013 г. ретроспективно было выявлено повышение электропроводности на 2 мСм/м.

**Закключение.** Опыт наблюдения гидрогеосейсмических вариаций в режиме двух пьезометрических скважин в период землетрясения 28 февраля 2013 г. с использованием аппаратного комплекса Кедр-ДМ-У показал надежность всех его элементов и высокую точность регистрации вариаций уровня воды с использованием ультразвукового скважинного уровнемера. Вместе с тем, глубоководный зонд нуждается в доработке за счет обеспечения более высокой разрешающей способности датчика электропроводности воды. В настоящее время его разрешающая способность составляет 1 мСм/м, что является недостаточным для уверенного выделения гидрогеосейсмических вариаций в изменениях электропроводности подземной воды.

### Список литературы

1. Калинов Г.А., Мигунов Д.С., Римлянд В.И. Оценка влияния шумов на фазовый способ определения момента прихода акустических импульсов // Вестник ТОГУ. 2009. № 1, Вып. 12. С. 275-282.
2. Калинов Г.А., Лысаков А.В., Римлянд В.И. и др. Автоматизированная система сбора гидрологической информации // Измерительная техника. 2012. № 2. Вып. 32. С. 92-99.
3. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине Елизовская-1, Камчатка, вызванные сильными землетрясениями (по данным наблюдений в 1987-1998 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2001. № 2. С.39-52.
4. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 52-64.
5. Копылова Г.Н., Сугробов В.М., Хаткевич Ю.М. Особенности изменения режима источников и гидрогеологических скважин Петропавловского полигона (Камчатка) под влиянием землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 53-70.
6. Копылова Г.Н., Болдина С.В. О связи изменений уровня воды в скважине Е-1, Восточная Камчатка, с активизацией вулкана Корякский в 2008-2009 гг. и сильными ( $M \geq 5$ ) землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2012. № 5. С. 41-54.
7. Пат. 2156962 РФ. Способ ультразвукового измерения уровня жидкости / Г.А. Калинов, А.В. Лысаков, В.И. Римлянд. 2000 г.
8. Римлянд В.И., Калинов Г.А., Казарбин А.В. Автоматизированная система измерения уровня жидкости в резервуарах // Изв. вузов. Приборостроение. 2000. Т. 43. № 3. С. 47-50.
9. Лугуманов М.Г., Аметшин Р.М. Высокочувствительный датчик электропроводности бурового раствора // Научно-технический вестник «Каротажник». 2003. С. 111-112.