

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ НА ОСНОВЕ МОЛЕКУЛЯРНО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

© 2018 г. А. С. Бугаев^{1,2}, А. Н. Антонов^{1,3}, В. М. Агафонов^{1,4}, К. С. Белотелов⁴,
С. С. Вергелес^{1,5}, П. В. Дудкин¹, Е. В. Егоров^{1,4}, И. В. Егоров^{1,4}, Д. А. Жевненко^{1,6,7},
С. Н. Жабин¹, Д. Л. Зайцев^{1,3,4}, Т. В. Криштоп⁷, А. В. Неешпапа^{1,4}, В. Г. Попов^{1,8},
В. В. Усков¹, А. С. Шабалина^{1,4}, В. Г. Криштоп^{7,8}. *

¹Московский физико-технический институт (государственный университет),
Российская Федерация, 141700, Долгопрудный, Московской обл., Институтский пер., 7

²Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Российская Федерация, 125009, Москва, ул. Моховая, 11, стр. 7

³ООО “НордЛаб”,
Российская Федерация, 141700, Долгопрудный, Московской обл., ул. Первомайская, 3

⁴ООО “Р-сенсор”,
Российская Федерация, 141701, Долгопрудный, Московской обл., ул. Жуковского, 8а

⁵Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН,
Российская Федерация, 142432, Черноголовка, Московской обл., просп. акад. Семенова, 1а

⁶АО “Научно-исследовательский институт молекулярной электроники”,
Российская Федерация, 124460, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, 12/1

⁷ООО “Сейсмотроника”, Российская Федерация, 141700, Москва, Долгопрудненское шос., 3

⁸Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН,
Российская Федерация, 142432, Черноголовка, Московской обл., просп. Акад. Осипьяна, 6

*E-mail: vgvvgk@mail.ru

Поступила в редакцию 26.06.2017 г.

Изложены основные принципы работы датчиков на основе молекулярно-электронных преобразователей (МЭП). Рассмотрены работы по изучению физических процессов в МЭП и рабочих характеристик. Обсуждены современные технологии изготовления МЭП и способы изготовления и применения планарного микроэлектронного МЭП. Дан краткий обзор приборов и систем на основе МЭП.

DOI: 10.1134/S0033849418110025

ВВЕДЕНИЕ

В устройствах регистрации механических сигналов **наибольшее** распространение получили приборы на основе молекулярно-электронных преобразователей (МЭП) [1–3].

Приборы на основе МЭП не содержат элементов точной механики, и в то же время их характеризует высокая эффективность преобразования механического сигнала в электрический на уровне происходящих в МЭП физических процессов, а не только с помощью корректирующей электроники. Это позволяет им по своим характеристикам на порядки превзойти параметры, достигнутые микроэлектромеханическими системами (МЭМС). Благодаря этим уникальным качествам приборы на основе МЭП успешно соперничают и с намного более дорогими прецизионными электро-механическими и магнитомеханическими при-

борами, так как обладают значительно меньшим весом и на порядок меньшей стоимостью. Кроме того, приборы МЭП нетребовательны к условиям транспортировки, практически не требуют времени для выхода на рабочий режим, отличаются рекордно низким энергопотреблением, долгим сроком службы и чрезвычайно просты в эксплуатации.

В настоящее время приборы на основе МЭП все еще проигрывают лучшим образцам электро- и магнитомеханических моделей по уровню собственных шумов в высокочастотной области. При сравнении с МЭМС к недостаткам следует отнести, во-первых, недостаточно высокую верхнюю граничную частоту (не более 3 кГц на сегодняшний день, что, впрочем, типично для большинства относительно медлительных современных электрохимических систем) и, во-вторых, на порядок большую стоимость. Развитие микроэлек-

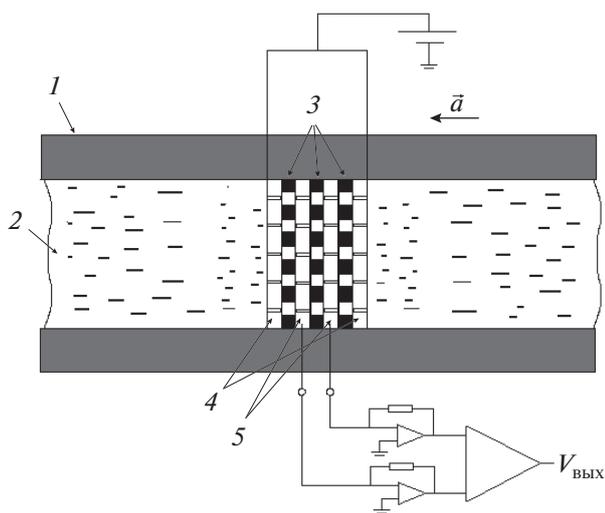


Рис. 1. Молекулярно-электронный преобразователь: 1 – керамическая или стеклянная трубка, 2 – электролит, 3 – пористые керамические перегородки, 4 – аноды, 5 – катоды; \vec{a} – внешнее механическое ускорение, $V_{\text{вых}}$ – выходной сигнал.

тронной технологии изготовления МЭП дает возможность в значительной степени решить эти проблемы.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ МЭП

В преобразователе могут быть использованы различные бинарные электролиты, обеспечивающие обратимые окислительно-восстановительные реакции, например, йод-йодид, ферри-ферроцианид и др. При этом электроды МЭП изготавливают из металла, который не участвует в обмене катионами, а осуществляет только электронный обмен, что теоретически позволяет устройству работать бесконечно долгое время без изменения рабочих параметров.

В настоящее время наиболее широкое применение получили йод-йодидные системы с платиновыми электродами. Электролит такой системы состоит из высококонцентрированного водного раствора йодида калия KI (нижняя граница температурного диапазона -15°C) или йодида лития LiI (нижняя граница температурного диапазона -55°C) и небольшого количества молекулярного йода I_2 . В избытке йодида йод образует хорошо растворимое комплексное соединение – трийодид – по следующей схеме:



При прохождении тока через МЭП на электродах происходят следующие электрохимические реакции:

восстановление йода на катоде:



окисление йода на аноде:



При этом ионы калия играют роль фонового электролита и не принимают участия в реакциях.

Устройство типового МЭП показано на рис. 1. Работа МЭП основана на том, что прохождение тока через МЭП в значительной степени определяется гидродинамическим движением раствора, вызванным действием внешних механических возмущений. В МЭП скорость химической реакции на электродах значительно больше скорости доставки к ним реагирующих веществ. В этом случае при протекании реакции в МЭП возникает градиент концентрации реагирующих веществ и перенос заряда в неподвижном электролите осуществляется с помощью молекулярной диффузии от одного электрода к другому. Если жидкость приходит в движение под воздействием сил инерции, то наряду с молекулярной диффузией возникает конвективный перенос ионов, что резко изменяет скорость доставки реагирующих веществ к электродам и, соответственно, меняется ток, идущий через МЭП, как это показано на рис. 2. Здесь и на следующих рисунках буквами “А” и “К” обозначены аноды и катоды, \vec{u} – скорость потока электролита. Современные МЭП имеют линейный выходной сигнал по ускорению в широком частотном и динамическом диапазонах.

Принцип действия МЭП легко пояснить, используя приближение плоских электродов, проницаемых для жидкости, но непроницаемых для заряда, впервые предложенное в работе [4].

При приложении электрического напряжения в системе протекает электрохимический ток (так называемый “фоновый ток”), не зависящий от наличия механического движения (верхний рисунок). В этом случае электрохимические реакции создают градиент концентрации компонентов раствора и перенос заряда в неподвижном электролите осуществляется с помощью диффузии ионов от одного электрода к другому.

При наличии механического сигнала электролит приходит в движение под воздействием сил инерции и наряду с диффузией возникает дополнительный конвективный перенос ионов к электродам, что резко изменяет скорость доставки реагирующих веществ к электродам и, соответственно, резко меняется ток, идущий через чувствительный элемент. В системе возникает дополнительный (к “фоновому”) электрический ток, причем этот ток пропорционален внешнему механическому сигналу.

Иными словами (см. нижний рисунок), возникающий в результате механического движения поток жидкости искажает установившееся распределение концентрации носителей заряда в ме-

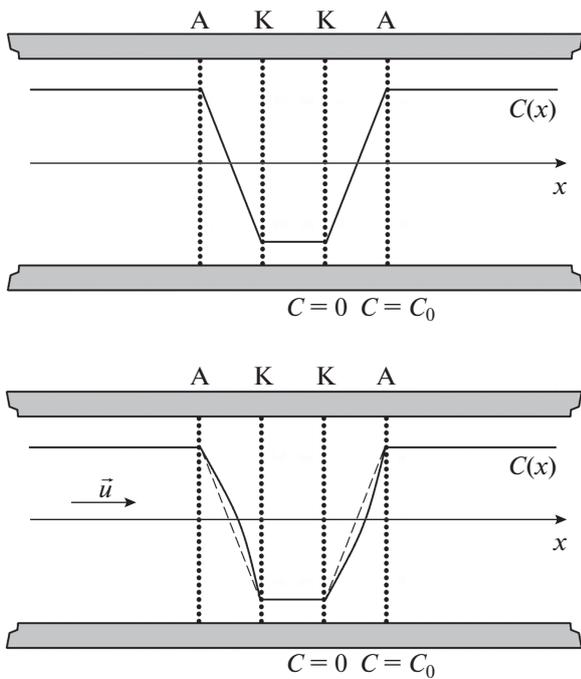


Рис. 2. Распределение концентрации электролита в электродном узле с плоскими проницаемыми электродами. На верхнем рисунке показана установившаяся при наличии напряжения смещения концентрация $C(x)$, на нижнем рисунке – изменение распределения концентрации $C(x)$ под воздействием набегающего потока жидкости со скоростью u ; C_0 – равновесная концентрация электролита.

жэлектродном пространстве, что приводит к сильному изменению градиента концентрации вблизи поверхности электродов, а электрический ток, идущий через электрод, в свою очередь, зависит от градиента концентрации вблизи поверхности электрода следующим образом:

$$I = -Dq \oint_S (\nabla C \cdot d\vec{s}), \quad (4)$$

где I – ток через электрод, D – коэффициент диффузии ионов, q – заряд одного иона, C – концентрация ионов, интегрирование производится по площади электрода S .

Чаще всего в качестве выходного сигнала используемой четырехэлектродной системы (два анода и два катода, расположенные симметричным образом) рассматривают амплитуду разностного катодного тока:

$$I(t) = I_{K2}(t) - I_{K1}(t) = Dq \left(\int_{K2} \vec{n} \cdot \nabla C(t) - \int_{K1} \vec{n} \cdot \nabla C(t) \right), \quad (5)$$

где t – время, $I(t)$ – выходной сигнал, $I_{K1}(t)$ и $I_{K2}(t)$ – токи через катоды $K1$ и $K2$, \vec{n} – вектор нормали к поверхности электрода. При этом чувствительность такой несложной на первый взгляд системы к механическому воздействию исключительно высока по современным меркам.

При изготовлении сейсмического датчика чувствительный элемент помещают поперек диэлектрического канала, ограниченного с обеих сторон гибкими мембранами и заполненного рабочей жидкостью. Схематическое изображение датчиков и внешний вид преобразующих электродов показаны на рис. 3. Выходная амплитудно-частотная характеристика серийно выпускаемого преобразователя приведена на рис. 4. Дальнейшее формирование выходной характеристики обеспечивается посредством использования корректирующей электроники. В зависимости от электронной обработки можно получить выход, пропорциональный либо скорости (велосиметр MTSS-1001/3), либо ускорению (акселерометр MTSS-1033). В результате, например для датчика скорости, получается выходная АЧХ, имеющая совершенно стандартный для устройств такого назначения плоский вид в широкой полосе частот.

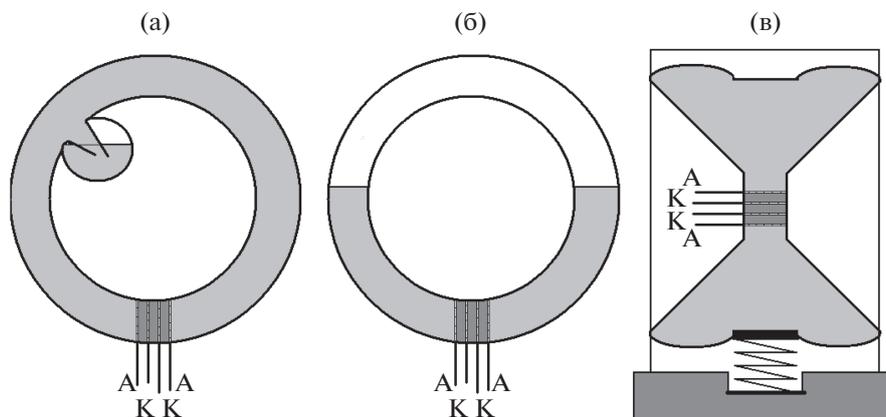


Рис. 3. Типы датчиков на основе МЭП: а – датчик вращательных движений, б – горизонтальный; в – вертикальный; А – аноды, К – катоды.

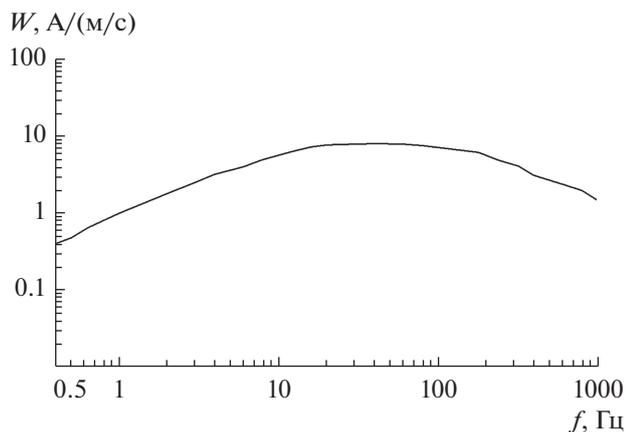


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика $W(f)$ чувствительного элемента сейсмодатчика с преобразующей ячейкой сеточного типа.

Несмотря на достаточно высокие выходные параметры, достигнутые у разработанных и выпускаемых в настоящий момент устройств, они обладают рядом недостатков, ограничивающих область их применения. Основными недостатками являются:

1) высокая стоимость изготовления преобразующих элементов;

2) довольно сильный разброс параметров изготовленных вручную преобразующих элементов, приводящий к необходимости индивидуальной для каждого датчика настройки сопутствующей электроники, что также увеличивает стоимость прибора;

3) ранний спад чувствительности элемента в области высоких частот.

Однако развитие микроэлектронных технологий производства дает возможность в значительной степени преодолеть эти проблемы. В работах [5–8] показана возможность реализации планарного чувствительного элемента микроэлектронными средствами. В работе [8] изложены технологические основы изготовления планарных МЭП.

2. ПЕРЕНОС ЗАРЯДА И МАССЫ В МЭП

Для описания процессов переноса и преобразования сигнала, расчета частотных, динамических и шумовых характеристик МЭП необходимо решить систему уравнений гидродинамики и конвективной диффузии в условиях протекания через электрохимическую ячейку переменного потока электролита.

Наиболее распространенный подход [9–18] к моделированию основан на использовании уравнения конвективной диффузии для ионов I_3^- :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\Delta C - \vec{V} \cdot \nabla C, \quad (6)$$

где C – концентрация активных ионов, \vec{V} – гидродинамическая скорость течения электролита относительно корпуса преобразователя. Достоинством данного подхода является простота математической формулировки задачи, допускающая получение аналитических решений [4, 11, 12, 19] или невысокие требования к вычислительным ресурсам при использовании численных методов [14, 9, 10, 20–23].

Распределение скоростей течения электролита, необходимое для решения (5), может быть получено из уравнения Навье–Стокса (при расчете линейного отклика достаточно использовать приближение малых чисел Рейнольдса) и условия несжимаемости жидкости:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = \nu \Delta \vec{V} - \frac{\nabla P}{\rho}, \quad (7)$$

$$\operatorname{div} \vec{V} = 0, \quad (8)$$

где ν – коэффициент вязкости электролита, p – давление, ρ – плотность электролита.

Граничные условия для (7) и (8) формулируются в виде стандартных для гидродинамики условий “прилипания” на твердых поверхностях и условий на давление или скорость на краях преобразующего канала, в зависимости от того, какая величина рассматривается как входной механический сигнал. После того, как распределение гидродинамических скоростей получено, остается рассчитать перенос ионов в ячейке и найти электрические токи, протекающие через электроды.

При малых скоростях протекания электролита решение уравнения конвективной диффузии можно искать в виде ряда, где каждое последующее слагаемое пропорционально амплитуде скорости течения электролита \vec{v} в более высокой степени. При исследовании линейного отклика системы достаточно ограничиться первыми двумя членами разложения:

$$C = C_0 + C_1 \exp(i\omega t), \quad (9)$$

где C_0 – распределение концентрации в неподвижной жидкости, C_1 – малая добавка к концентрации, линейная по гидродинамической скорости, изменяющаяся по гармоническому закону. Тогда уравнение (6) преобразуется в следующую систему:

$$\Delta C_0 = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = D\nabla^2 C_1 - \vec{V} \cdot \nabla C_0. \quad (11)$$

Система, состоящая из уравнений (7), (8), (10) и (11), в линейном приближении полностью определяет процессы конвективной диффузии, происходящие в ячейке. Обычно используемые для ее решения граничные условия представляют

собой естественные физические условия отсутствия потока активных ионов на диэлектрических поверхностях, постоянства концентрации на проводящих электродах, стандартные для гидродинамики условия прилипания жидкости на твердых стенках, а также условия известного перепада давлений на входе и выходе каналов преобразующего элемента. В качестве граничного условия для определения значения концентрации I_3^- на электродах часто используется граничное условие предельного тока или условия Нернста.

Для практически используемых преобразующих ячеек концентрацию I_3^- выбирают в диапазоне от 0.01 до 0.1 моль/л. При этом КИ представлен в значительно более высокой концентрации, от 2 до 4 моль/л. В частности, как показано в работах [24, 27], можно ввести малый параметр $\varepsilon \sim C_{I_3^-}/C_b \sim \delta C_{I^-}/C_b \sim \delta C_K/C_b$, где $dC_{I^-} = C_{I^-} - C_b$, $\delta C_{K^+} = C_{K^+} - C_b$, C_b – концентрация йодида калия в однородном растворе.

Для уравнения (6) чаще всего применяют упрощенные граничные условия [24]. К ним относятся условия постоянства концентрации электроактивных ионов I_3^- [7, 8, 18–21, 25] и плотности тока на поверхности электродов [16–18, 26, 27]. В случаях, когда межэлектродное расстояние превышает диффузионную и гидродинамическую длину в системе, электроды можно рассматривать удаленными друг от друга, и тогда условия на удаленных анодах слабо влияют на результат моделирования катодных токов, которые формируют выходной сигнал. Также для практически используемого в датчиках режима предельного тока вполне обоснованным является применение условия нулевой концентрации основных ионов на поверхности катода (для йод-йодида условие нулевой концентрации на катоде ставится для ионов I_3^-). Благодаря этому для таких систем даже при применении упрощенных граничных условий были получены хорошо согласующиеся с экспериментом теоретические зависимости.

3. МОДЕЛИ МЭП

Целью моделирования процессов переноса заряда в преобразующей молекулярно-электронной ячейке является расчет электродных токов в стационарном случае и в условиях движения жидкости под действием сил инерции. Это позволяет найти отклик преобразующей ячейки при заданном типе внешнего механического воздействия.

В ранних теоретических моделях исследовали в основном сильно упрощенную одномерную задачу [1, 4, 28, 29]. Расчеты в рамках такой модели не давали удовлетворительного соответствия экспери-

ментальным данным. Были разработаны теоретические модели для некоторых конфигураций, близких к существующим электродным системам, с использованием аналитических и численных методов [9–12, 14–18] (см. рис. 3). В частности, в работе [13] было показано, что необходим последовательный учет геометрии преобразующей ячейки, в общем случае представляющей собой достаточно сложную трехмерную структуру.

Необходимо отметить, что большинство разработанных ранее теоретических моделей применимо в основном в области низких частот (от тысячных долей до единиц герц). Практическая ценность этих моделей связана, в частности, с широким использованием датчиков на основе МЭП в длиннопериодной сейсмологии. Для создания микро- и нанопреобразователей потребовалась разработка соответствующих теоретических моделей. В связи с этим возникло множество работ по изучению процессов переноса в МЭП различных геометрий и исследованию характеристик таких преобразователей как в области низких и инфранизких частот [30–33], так и в высокочастотной области спектра [11, 12, 16, 17, 34]. С точки зрения выходных параметров чувствительного элемента основные недостатки сейсмических датчиков связаны с особенностями поведения его характеристики в области высоких частот.

Миниатюризация чувствительного элемента [12] способствует существенному увеличению верхней рабочей частоты МЭП, однако дальнейшее уменьшение размеров возможно только с помощью микроэлектронных технологий [6, 7].

Разработка микроэлектронной технологии промышленного производства электродных узлов МЭП с использованием стандартных микроэлектронных технологий позволит значительно миниатюризировать электродный узел, а также минимизировать разброс параметров преобразователя, снизить энергопотребление и существенно уменьшить стоимость готовых сенсоров. Электродная система с планарными электродами имеет ряд преимуществ перед другими рассмотренными конфигурациями электродов даже при сохранении характерных размеров преобразующих микроструктур на прежнем уровне. Уменьшение характерных размеров основных элементов преобразующей системы позволяет расширить частотный диапазон преобразования, повысить линейность, а во многих случаях и обеспечить более высокую чувствительность. При этом одним из важнейших параметров планарной структуры, в значительной степени определяющим характеристики планарного МЭП, является расстояние между катодом и анодом.

Принципиальная новизна состоит в том, что МЭП, изготовленный на основе микро- и нанотехнологий, может иметь характерный размер ос-

новых конструктивных элементов вплоть до 100 нм, т.е. на 2–3 порядка уменьшить характерные размеры преобразующих элементов, достижимые с помощью используемых в настоящее время технологий. Существенное уменьшение размеров преобразующих элементов радикально отразится на повышении технических параметров сенсоров на их основе.

4. ШУМЫ В МЭП, ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ

Один из основных механизмов шума в МЭП обусловлен гидродинамическими флуктуациями потока жидкости через преобразующую ячейку. Экспериментально установлено, что этот механизм шума является определяющим для МЭП на частотах ниже нескольких герц. В работе [35] были рассмотрены равновесные гидродинамические флуктуации в моделях, соответствующих реальным молекулярно-электронным сейсмическим датчикам, и в рамках флуктуационно-диссипационной теоремы было получено выражение для спектральной плотности среднего квадрата перепада давления по площади преобразователя как функции макроскопических параметров преобразующего элемента:

$$\langle \delta p^2 \rangle_{\omega} = 2k_B T R_h, \quad (12)$$

где R_h – гидродинамическое сопротивление преобразователя, k_B – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, ω – частота.

Спектр собственных шумов молекулярно-электронного преобразователя в широком частотном диапазоне аналогичен шуму Найквиста с той лишь разницей, что в МЭП роль электрического сопротивления играет R_h . Работа [35] сыграла важную роль в истории создания молекулярно-электронных преобразователей, поскольку на их основе была разработана методика экспериментальной и теоретической оценки собственных шумов конкретных приборов. Формула (25) многократно подтверждена экспериментально для разных типов практически используемых приборов, имеющих гидродинамическое сопротивление $R_h \sim 10^9$ (Нс)/м⁵.

Проведенные в работах [36–39] эксперименты показали, что зависимость собственных шумов преобразователя от указанных параметров может быть более сложной, нежели это следует из формулы (12). В частности, было установлено, что абсолютное значение шума, начиная с некоторого уровня внешнего сигнала, зависит от его амплитуды и, кроме того, спектральная плотность шума МЭП с пониженным значением гидродинамического сопротивления испытывает подъем в сторону низких частот.

Существенный вклад в собственные шумы МЭП на низких частотах, помимо исследованного в работе [35], дает изученный в работе [37] гидродинамический шум вихревых пульсаций локальных скоростей и давления. Эти пульсации возникают при обтекании электродной системы преобразователя потоком электролита при достаточно высоком уровне сигнала.

Полная спектральная плотность гидродинамического шума МЭП в рабочей полосе частот, выраженная в единицах ускорения, имеет вид

$$\langle \delta a^2 \rangle_{\omega} = \frac{\sqrt[3]{2}}{432 (2\pi)^{8/3}} \left(\frac{R}{\xi} \right)^4 \left(\frac{Sa}{S_0} \right)^{2/3} \times \left(\frac{\xi \rho a}{S} \right)^{5/3} \frac{1}{l^{1/3} R_h^{5/3}} + \frac{2k_B T R_h}{\rho^2 l^2}, \quad (13)$$

где a – возмущающий сигнал (внешнее ускорение), R – характерный размер элемента структуры электрода, ξ – толщина пограничного слоя, S – суммарная площадь отверстий в сетчатом электроде, S_0 – площадь поперечного сечения канала преобразователя, l – длина канала преобразователя, ρ – плотность электролита.

Существенный вклад в общий гидродинамический шум вносит шум локальных вихревых пульсаций, начиная с уровня $(1.5...3) \times 10^{-8}$ м/с²/√Гц, причем величина данного шума растет при увеличении уровня сигнала.

В работах [38, 39] были экспериментально исследованы шумы молекулярно-электронного преобразователя в вертикальном сейсмодатчике с зафиксированными мембранами на концах канала, что практически исключало наличие интегрального потока жидкости в канале и влияние механизма шума, исследованного в [35]. Было показано, что в преобразователе с пониженным значением гидродинамического сопротивления R_h при частотах ниже 0.1 Гц наблюдается шум, превышающий уровень шума Козлова-Сахарова [35] и растущий в сторону низких частот. В [39] была предложена модель, описывающая физику возникновения шума данного вида, связанная с существованием замкнутых микропотоков через отдельные микроканалы в диэлектрической перегородке между электродами, а также неидентичностью элементов электродной сетки в каждом из этих каналов.

С использованием метода случайных сил было получено выражение для описанной модели:

$$\langle v \rangle_{\omega}^2 = \beta \frac{4k_B T}{R_h} (\bar{k})^2 \alpha^2, \quad (14)$$

где \bar{k} – усредненная электрохимическая передаточная функция преобразователя, β – коэффициент преобразования выходного шумового тока в

единицы входной скорости, $\alpha = \sqrt{\langle (\Delta k_n)^2 \rangle / (\bar{k})^2}$ – полуэмпирический коэффициент, который демонстрирует степень неоднородности электродной сетки в молекулярно-электронной ячейке, Δk_n – отклонение коэффициента преобразования скорости потока в ток для n -го канала от среднего значения. Для дополнительного шума в токе действительно следующее выражение:

$$\langle I^2 \rangle = 4k_B T N \left\langle \frac{(\Delta k_n)^2}{r_n} \right\rangle, \quad (15)$$

где N – число микроканалов в диэлектрической перегородке, r_n – гидродинамическое сопротивление n -го канала.

Для снижения влияния этого механизма собственного шума необходим подбор оптимальных параметров электродной сетки в узле. В этом случае параметр α принимает наименьшее значение [40].

В работе [26] была предложена теоретическая модель флуктуаций диффузионного тока в молекулярно-электронной ячейке с планарными электродами в условиях свободной конвекции в отсутствие интегрального потока жидкости в канале при различных значениях числа Рэлея Ra . Показано, что существует возможность снижения шума конвекции путем уменьшения числа Рэлея системы, которого можно добиться снижением концентрации электролита или уменьшением размеров элементов преобразующей ячейки. Вместе с тем Ra не может быть слишком малым, поскольку увеличение гидродинамического сопротивления приводит к росту гидродинамического шума [35].

В работе [41] исследованы шумы электроники, задающей рабочее напряжение преобразователя и обеспечивающей преобразование токов в молекулярно-электронной ячейке в выходное напряжение. Практическая задача отделения собственных шумов молекулярно-электронного преобразователя от шумов, вносимых сопутствующей электроникой, сводится к корректному определению импедансов преобразователя, что, в свою очередь, далеко не всегда является тривиальной задачей.

Установлено, что шумы, вносимые сопутствующей электроникой и обусловленные импедансом МЭП, стоящим на входе электронного каскада усиления сигнала, дают существенный вклад только на частотах выше 10...20 Гц для малых концентраций (0.002...0.01 моль/л). Для более высоких концентраций электролита и частот от 1 до 10 Гц шум электроники для всех исследованных образцов лежит существенно ниже собственного шума сенсора. На частотах выше 1 Гц собственный шум измерительных устройств на основе МЭП обусловлен конвективными процессами в

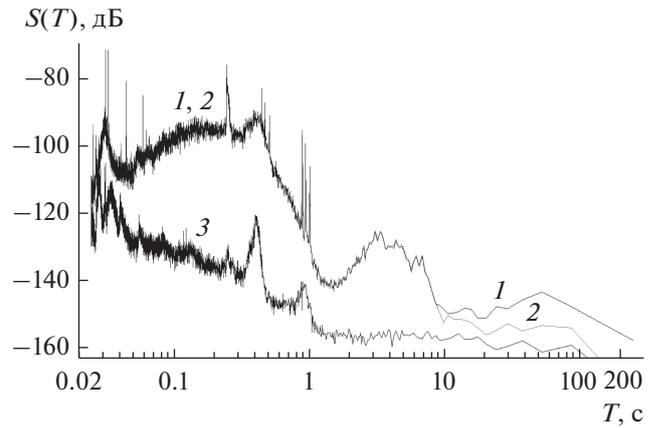


Рис. 5. Спектральная плотность мощности шумов МЭП миниатюрного геофона. Кривые 1 и 2 – зарегистрированный в течение длительного времени сигнал с двух одинаковых геофонов, кривая 3 – уровень собственных шумов, вычисленный методом кросскорреляции.

преобразующем элементе, а не шумами сопутствующей электроники, как считалось ранее.

В работе [42] предложена модель собственных шумов молекулярно-электронных угловых датчиков для диапазона частот 1...150 Гц. На основании экспериментальных данных установлено, что в диапазоне частот до 50 Гц преобладающим является шум конвекции, согласно механизму, представленному в работе [43], а на более высоких частотах преобладает шум по напряжению входного операционного усилителя электронного блока датчика. При этом шум по последнему из этих механизмов зависит от выходного импеданса датчиков. В работе [42] предполагали, что импеданс имеет чисто активный характер, более точная модель должна учитывать частотную зависимость импеданса.

На рис. 5 показана типичная шумовая запись МЭП, представленная в терминах спектральной плотности мощности. Метод кросскорреляции, позволяющий выделить из записей сигнала двух приборов (кривые 1 и 2) коррелированную часть, дает результат в виде кривой 3, соответствующей шумовой характеристике МЭП.

Приведем также типичные значения шумовых и динамических характеристик устоявшихся классов приборов на основе МЭП. В табл. 1, составленной на основе обзора приборов, приведенного в работе [44], указаны характерные значения для сформировавшихся различных классов приборов на основе МЭП. Разработано большое количество приборов на основе МЭП и российской компанией “Р-сенсорс”, налажено серийное производство сейсмометров, успешно конкурирующих на мировом рынке с лучшими иностранными образцами [6, 7, 45–50].

Таблица 1. Характерные значения шумовых и динамических характеристик различных классов приборов на основе МЭ

Класс приборов	Характеристики приборов			
	уровень собственных шумов	значение собственных шумов	максимальный регистрируемый сигнал	динамический диапазон, дБ
Широкополосные сейсмометры	–130...–160 дБ (от уровня $1 \text{ м/с}^2\sqrt{\text{Гц}}$)	$10 \text{ нм/с}^2\sqrt{\text{Гц}}$	$\pm 7.5 \text{ мм/с}$	125
Короткопериодные сейсмометры	–140 дБ (от уровня $1 \text{ м/с}^2\sqrt{\text{Гц}}$)	15 нм/с в рабочей полосе	$[\pm 3.75 \text{ мм/с}$ $\pm 7.5 \text{ мм/с}]$	120
Компактные сейсмические датчики	–120 дБ (от уровня $1 \text{ м/с}^2\sqrt{\text{Гц}}$)	100 нм/с $70 \text{ нг/}\sqrt{\text{Гц}}$, на 10 Гц	50 мм/с на 100 Гц	110
Акселерометры сильных движений	–110...–120 дБ (от уровня $1 \text{ м/с}^2\sqrt{\text{Гц}}$)	$130 \text{ нг/}\sqrt{\text{Гц}}$, на 10 Гц	$\pm 0.8 \text{ г} / \pm 4 \text{ г}$	130
Угловые сейсмические датчики	–122 дБ (от уровня $1 \text{ рад/с}^2\sqrt{\text{Гц}}$)	$8 \times 10^{-7} \text{ рад/с}^2\sqrt{\text{Гц}}$ $2 \times 10^{-7} \text{ рад/с}$ плоский в диапазоне $0...10 \text{ Гц}$	$\pm 0.1 \text{ рад/с}$	110

Примечание. Здесь и в табл. 3 $1 \text{ нг} = 9.81 \times 10^{-9} \text{ м/с}^2$.

5. ТРЕБОВАНИЯ К ПРИБОРАМ И ПРИМЕНЕНИЕ МЭП В СЕЙСМОЛОГИИ

Для оценки качества сейсмических станций и уровня собственного шума сейсмических приборов используется модель низких шумов Петерсона (Low Noise Model, LNM) [51, 52] и модель высоких шумов (High Noise Model, HNM). Для построения моделей берется некоторая характеристика, описывающая частотное распределение шумов (например, спектральные плотности) для большого количества сейсмических станций, зафиксированное в тихое для данных станций время. Затем строятся огибающие сверху (модель высоких шумов, HNM) и снизу (модель низких шумов, LNM) для полученной совокупности кривых. Позднее, с накоплением большего количества экспериментальных данных, появилось наименование новая модель низких шумов (Low Noise Model, NLNM).

Почти повсеместно наблюдаемый шум превышает LNM во многих случаях на весьма заметную величину. Например, на частотах выше 1 Гц уровень шума на 20 дБ выше NLNM может рассматриваться как уникально низкий. Другой пример — шум микросейсмов между 2 и 20 с имеет сильные сезонные вариации и в зимнее время может быть до 50 дБ выше NLNM. На низких частотах уровень шумов отличается большей стабильностью и обычно выше модели низких шумов только на

$10...20 \text{ дБ}$ даже для шумных в других отношениях мест. Последнее утверждение справедливо только для вертикального канала, для которого и построена модель. Для горизонтальных компонент уровень шума для частот ниже 0.05 Гц на десятки децибел выше и испытывает сильные вариации, что связано с сильной чувствительностью горизонтальных каналов к наклонам, создаваемым ветровым нагрузками на близко расположенные деревья, здания. Еще одним источником подобных наклонов являются вариации атмосферного давления вдоль земной поверхности.

Таким образом, если собственный шум прибора ниже модели Петерсона, то такой прибор пригоден для регистрации очень слабых сигналов на рекордно тихих сейсмических станциях. Приборы с шумами на $10...20 \text{ дБ}$ выше NLNM пригодны для подавляющего большинства сейсмических станций. Именно к такому классу приборов относится сейсмометр СМЕ-6211 [53], что и определяет его высокую востребованность на практике. На рис. 6 показан уровень собственных шумов для распространенных моделей сейсмометров по отношению к NLNM и HNM.

В то же время приборы с более высокими шумами могут использоваться в сейсмических измерениях для регистрации достаточно сильных движений земной поверхности. Модели СМЕ-4211 и СМЕ-4311 получили широкое распространение при выполнении работ в полевых условиях, где

уровень шума заметно выше, чем на сейсмических станциях, использованных для построения описанной выше шумовой модели. Поэтому на первое место выходят такие эксплуатационные показатели как малая масса и компактные габариты в сочетании с надежностью и простотой использования [54].

В работе [55] исследованы кальдеры вулканов Авачинской группы (Камчатка). Непрерывные измерения проводили несколько месяцев временной сетью из 11 сейсмостанций, оснащенных приборами СМЕ-4311. Позднее с помощью сети из 21 аналогичной сейсмостанции была построена сейсмическая модель вулкана Горелый.

В работе [56] сейсмоприемники молекулярно-электронного принципа действия MTSS-2003 были использованы в качестве регистраторов колебаний грунтов земляного полотна и торфяного основания железнодорожного пути при движении поездов.

Эффективно развивается греческий проект SEANELLARC по созданию наземно-подводной сейсмической сети с передачей данных в режиме реального времени для раннего предупреждения цунами, в состав которой входят наземные станции и донные, оборудованные приборами на основе МЭП СМЕ-4011 соответственно в стандартной модификации и модификации для донных сейсмостанций [57–59]. Подробнее о применении сейсмометров на основе МЭП в составе донных сейсмических станций см. [60, 61].

Три цифровые региональные сейсмостанции, оборудованные приборами СМЕ-6011 и СМЕ-4011 в низкотемпературной модификации работают в составе сейсмической сети YARS в Республике Саха-Якутия (региональные коды и названия станций: VTM – Vitim, непрерывно функционирует с 2003 г., BLS – Bulus, а также SOT – Stolb, установлена в зоне вечной мерзлоты) [62].

Также сейсмометры СМЕ-4111 использовали для контроля за состоянием ледового поля в режиме круглосуточной регистрации и исследования динамических свойств ледяного покрова на дрейфующих станциях “Северный Полюс-36”, “Северный полюс-39”, “Северный полюс-40”. Эту же модель сейсмометра использовали для наблюдения за динамикой ледника Норденшельда сейсмометрическим методом [63].

В настоящее время сейсмометры на основе МЭП занимают уверенное положение на мировом рынке и позволяют получать научные данные нового качества. Однако потенциал применения МЭП в измерительных приборах далеко не исчерпывается сейсмологическим оборудованием. Происходящее в настоящее время развитие микроэлектронных технологий изготовления МЭП отодвигает технологические ограничения МЭП на верхнюю рабочую частоту и создает возможно-

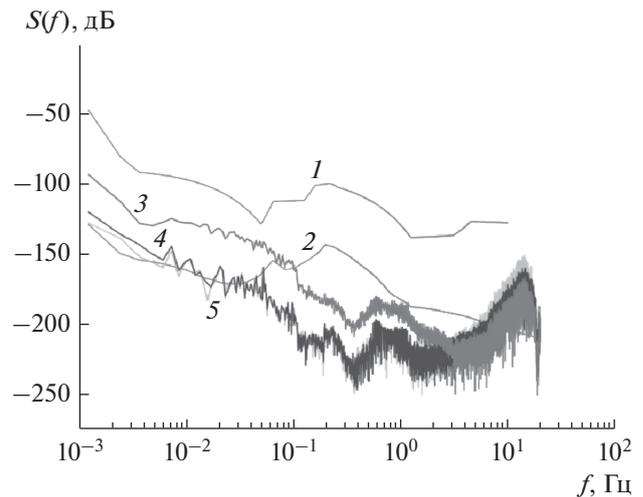


Рис. 6. Сравнение собственных шумов сейсмометров: кривая 1 – модель низких шумов Петерсона LNM [53], кривая 2 – модель высоких шумов HNM, кривая 3 – собственный шум сейсмометра Р-сенсор СМЕ-6211 на основе МЭП, кривая 4 – собственный шум сейсмометра Shtreckeisen ST62, кривая 5 – собственный шум сейсмометра Trillium T240.

сти для массового производства, и тем самым расширяет круг возможных применений датчиков на их основе.

6. ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ПЛАНАРНЫХ И СЕТОЧНЫХ МЭП

Современное состояние приборостроения на основе МЭП описано в работах [64, 65]. Сейсмометры, акселерометры и геофоны на основе МЭП серийно выпускаются российскими научно-производственными компаниями “Р-Сенсорс” [44], “Сейсмотроника” [66], “НордЛаб” [67], созданными выпускниками МФТИ и (или) с участием МФТИ. С техническими характеристиками серийных приборов можно ознакомиться на сайтах этих компаний. Ряд работ посвящен исследованию характеристик МЭП и использованию сейсмометров и геофонов [68–71].

Следует отметить, что развитие методов моделирования температурной зависимости [72] позволило разработать эффективные схемы компенсации температурного ухода характеристик. Введение обратной связи в устройство приборов в значительной степени решило проблему частотной коррекции характеристики приборов [45].

На основе нового планарного МЭП был изготовлен прототип высокоточного геофона и проведены исследования его характеристик. Основные результаты представлены в работах [6, 7]. Появление нового типа высокоточных геофонов на рынке приборов для сейсморазведки способно оказать существенное комплексное влияние на

Таблица 2. Сравнительные характеристики однокомпонентных геофонов на основе МЭП с распространенными геофонами других известных производителей.

Параметры геофона	Фирма-производитель и название геофона			
	OYO Geospace, GS-11D	Sercell, L28LB	P-сенсорс, MTSS-1001	Сейсмотроника, STRA-1001
Тип чувствительного элемента	Магнитно-механический	Магнитно-механический	МЭП	Планарный МЭП
Количество осей	1	1	1	1
Высота, мм	34	38	35	50
Диаметр, мм	32	31	32	32
Нижняя граничная частота, Гц	4.5, 8, 10, 14 ± 0.75	4.5	1 ± 0.05	1 ± 0.05
Коэффициент преобразования, В/м/с	32 ± 10%	31.3	250 ± 2%	250 ± 1%
Коэффициент нелинейных искажений, %, при сигнале 18 мм/с, измеряется на 12 Гц	< 0.2 – для версий 8 Гц, 10 Гц, 14 Гц (не специфицирован для версии 4.5 Гц)	<0.2	<0.1	<0.2
Требования к установке	Угол наклона <30°	Не указано	Работоспособен в любой ориентации	Работоспособен в любой ориентации

эффективность сейсморазведочных работ в части их ускорения, снижения стоимости, повышения разрешающей способности, увеличения глубины разведки. Сравнительные характеристики геофонов на основе МЭП с однокомпонентными магнитомеханическими геофонами и трехкомпонентными MEMC-геофонами приведены в табл. 2 и 3.

Серийно выпускаются также одно- и многокомпонентные регистраторы вращательных движений [72, 73], они имеют особое значение из-за растущего интереса к исследованиям вращательной составляющей сейсмического поля. В 2006 г. была создана международная организация International Working Group on Rotational Seismology (IWGoRS) [74] для исследования всех аспектов вращательных движений в области сейсмологии. В частности, регистрация с помощью шестикомпонентного сейсмоприемника отношения амплитуд линейных и угловых колебаний позволяет оценить размеры источника и более точно выделить поперечные волны, а при использовании сети шестикомпонентных сейсмометров возможно с высокой точностью определить координаты эпицентра [75]. Необходимость изучения вращательных колебаний земной поверхности и возможные направления исследований обсуждаются в работе [76].

Вращательные датчики также могут применяться в системах мониторинга состояния слож-

ных инженерных объектов, таких как мосты, плотины, дамбы, высотные здания. Сравнительные характеристики датчиков вращательных движений на основе МЭП и датчиков других типов представлены в табл. 4. Высокая точность электрохимических вращательных датчиков позволила разработать оригинальное навигационное устройство для определения направления на географический север [77] инерциальными методами. Показано, что, определяя амплитуду и фазу сигнала с помощью углового датчика, вращающегося в поле тяжести земли вокруг вертикальной оси вращения, можно найти значение проекции скорости вращения Земли на данной широте и направление на географический северный полюс, совпадающее с максимумом регистрируемой проекции скорости вращения Земли.

Возможность регистрировать постоянное линейное ускорение считалась ранее одним из существенных преимуществ МЭМС-акселерометров перед электрохимическими системами. Для решения этой проблемы была предложена новая конструкция электрохимического преобразователя с эффективной инерциальной массой, создаваемой электрохимическими методами, который способен измерять постоянное линейное ускорение [78]. Но пока эта конструкция отличается сравнительно высоким уровнем собственных шумов. Для сохранения уровня шума на приемлемом уровне были разработаны комбинированные МЭМС + МЭП низкошумящие сенсоры,

Таблица 3. Сравнительные характеристики трехкомпонентных геофонов на основе МЭП с некоторыми трехкомпонентными геофонами других известных производителей

Параметры геофона	Фирма-производитель и название геофона			
	Р-сенсор/ Сейсмотроника, Серийный MTSS-1033A	Сейсмотроника, Планарный STRA-1030/ STRA-1010	ION, сейсмоакселерометр, Colybrys Digital-3, используемый в системе Vectorseis	Shell + HP, Разработки выполняются совместно Shell и Hewlett- Packard
Диапазон измеряемых сигналов, м/с ²	±30 (при любом наклоне), перегрузка в условиях эксплуатации исключена	±30 (при любом наклоне), перегрузка в условиях эксплуатации исключена	±3.3 (при любом наклоне), время восстановления работоспособности при перегрузке ~ 1 с	Неизвестно
Шум, нг/√ Гц	~45	~20	~45	~10
Частотный диапазон, Гц	0.1...120	1...500	DC...1450	DC (0.1)...1000
Динамический диапазон, дБ, в полосе до 100 Гц	135	130	120	Неизвестно
Нелинейные искажения, %, при 12 Гц и размахе входного сигнала 18 мм/с	±0.05	±0.01	±0.002	Неизвестно

Таблица 4. Сравнительная таблица угловых датчиков движения различных типов

Параметры датчиков	Фирма-производитель, название датчика				
	Sensorog, STIM210	Columbia Research Laboratories, SR100FR	Emcore, EMP-1.2K	Физоптика, VG 910	Р-сенсор, МЕТР-03
Принцип действия	Смещение вибрирующей инерциальной массы под действием силы Кориолиса. МЭМС-технология	Тороидальный канал, заполненный жидкостью, и пьезоэлектрический преобразователь перепада давления и жидкости	Волоконно-оптический гироскоп	Волоконно-оптический гироскоп	Преобразователь на основе МЭП
Уровень собственного шума, рад/с/√Гц	5×10^{-5}	3×10^{-5}	5×10^{-7}	1.5×10^{-5}	3×10^{-8}
Цена за компоненту, долларов США	>1000	>1000	>10000	>2000	~500

в которых удалось объединить преимущества технологий МЭМС и МЭП [79, 80]. Для этого использовано сложение сигналов от датчиков обоих типов, причем частотная полоса каждого датчика ограничена таким образом, чтобы амплитудная характеристика после суммирования имела частотно независимый вид. В этом случае МЭМС-акселерометр, уровень шума которого значитель-

но выше уровня шума МЭП-акселерометра на средних и высоких частотах, дает информацию о сигнале лишь в узком частотном диапазоне от 0 до сотых долей герца, а весь остальной частотный диапазон перекрывается сигналом МЭП-акселерометра. Благодаря добавлению узкополосного сигнала МЭМС акселерометра комбинированное устройство становится способным регистриро-

вать постоянную составляющую ускорения, а поскольку полоса сигнала от МЭМС является узкой в сравнении с частотной полосой комбинированного прибора, шумовая добавка от него является незначительной и результирующие шумовые параметры комбинированного прибора остаются практически такими же, как у единичного МЭП.

На сегодняшний день на Факультете физической и квантовой электроники МФТИ в Центре молекулярной электроники на базе МЭП-технологии разработано несколько десятков оригинальных экспериментальных приборов и систем, предназначенных для решения самых разных задач, среди которых можно отметить, например, систему персональной инерциальной навигации пешехода [81], систему мониторинга колебаний высотных зданий [82, 83], сейсмическую охранную систему рубежного типа, позволяющую регистрировать траекторию движения “нарушителя” [84] и измеритель вращательных колебаний земной поверхности для дистанционного контроля процесса бурения [85].

Измерители параметров движения на основе молекулярно-электронного переноса в МЭП, при условии их невысокой себестоимости при массовом производстве с использованием современных микроэлектронных технологий и качественном повышении технических параметров, имеют весьма широкую сферу применения. Сюда входят: сейсморазведка (2D и 3D, в том числе и векторная), системы навигации (в том числе портативные персональные и предназначенные для малых автономно действующих аппаратов), системы виброконтроля и сейсмического мониторинга состояния зданий и сооружений, некоторые медицинские приложения (носимые системы кардиомониторинга, ортопедия и спортивная медицина), автомобильные системы безопасности, робототехника. Объединение преимуществ электрохимической регистрации сигналов и микроэлектронных технологий способно привести к созданию нового класса микроэлектронных приборов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-07-01162, 18-07-00966).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Введение в молекулярную электронику /Под ред. Н.С. Лидоренко М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Боровков В.С., Графов Б.М., Добрынин Е.М. и др. / Под ред. Е.М. Добрынина, П.Д. Луковцева. Электрохимические преобразователи первичной информации. М.: Машиностроение, 1969.
3. *Newman J., Thomas-Alyea K. E.* Electrochemical Systems. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2004.
4. *Larkam C.W.* // J. Acoust. Soc. Amer. 1965. V. 37. № 4. P. 664.
5. *Агафонов В. М., Криштон В. Г., Сафонов М. В.* // Нано- и микросистемная техника. 2010. Т.5. № 6. С. 47.
6. *Бугаев А.С., Агафонов В.М., Криштон В.Г. и др.* // Нефтегазопромысловый инжиниринг. 2013. Спецвыпуск №3: итоги 2012. С. 46.
7. *Агафонов В.М., Криштон В.Г., Егоров И.В.* // Приборы и системы разведочной геофизики. 2013. Т. 43. № 1. С. 39.
8. *Криштон В.Г., Агафонов В.М., Бугаев А.С.* // Электрохимия. 2012. Т. 48. № 7. С. 820.
9. *Захаров И. С., Козлов В. А., Сафонов М. В.* // Известия вузов. Электроника. 2003. № 2. С. 40.
10. *Захаров И.С., Козлов В.А.* // Электрохимия. 2003. Т. 39. № 4. С. 447.
11. *Агафонов В.М., Криштон В.Г.* // Микросистемная техника. 2004. № 9. С. 40.
12. *Агафонов В.М., Криштон В.Г.* // Электрохимия 2004. Т. 40. № 5. С. 606.
13. *Козлов В.А., Тугаев П.А.* // Электрохимия. 1996. Т. 32. № 12. С. 1436.
14. *Бабанин А.В., Козлов В.А., Петькин Н.В.* // Электрохимия. Т. 26. № 5. С. 601.
15. *Козлов В.А., Коршак А.С., Петькин Н.В.* // Электрохимия 1991. Т. 27. № 1. С. 20.
16. *Козлов В.А., Терентьев Д.А.* // Микросистемная техника. 2004. № 10. С. 41.
17. *Козлов В.А., Терентьев Д.А.* // Электрохимия. 2003. Т. 39. № 4. С. 443.
18. *Козлов В.А., Терентьев Д.А.* // Электрохимия, 2002. Т. 38. № 9. С. 1104.
19. *Козлов В.А., Сафонов М.В.* // Электрохимия. 2004. Т. 40. № 4. С. 460.
20. *Захаров И.С.* // Автономная энергетика. 2003. № 15. С. 36.
21. *Захаров И.С.* // Автономная энергетика. 2002. № 13. С. 23.
22. *Агафонов В.М., Орел А.А.* // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 5. С.50.
23. *Агафонов В.М., Бугаев А.С., Орел А.А.* // Нано- и микросистемная техника, 2009. № 5. С.32.
24. *Волгин В.М., Давыдов А.Д.* // Электрохимия. 2012. Т. 48. № 6. С. 627.
25. *Вяслев М.Р., Мифтахов А.Г., Султанов Э.И.* // Электрохимия. 2002. Т. 38. № 2. С. 239.
26. *Сафонов М.В.* // Электронный журнал “Исследовано в России”. 2004. С. 2433. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/228.pdf>
27. *Vograchev D.A., Davydov A.D.* // Electrochimica Acta. 2002. V. 47. № 20. P. 3277.
28. *Графов Б.М.* // Электрохимия. 1967. Т.3. № 8. С. 935.
29. *Лидоренко Н.С.* // Электротехника. 1965. № 3. С. 13.
30. *Мартемьянов С.А., Воротынецов М.А., Графов Б.М.* // Электрохимия. 1979. Т. 15. № 8. С. 1256.
31. *Григин А.П., Ильин Б.И., Петькин Н.В.* // Электрохимия. 1980. Т. 16. № 5. С. 714.
32. *Козлов В.А., Терентьев Д.А.* // Микросистемная техника. 2004. № 10. С. 41.

33. Клименков Е.Я., Графов Б.М., Левич В.Г., Стрижевский И.В. // Электрохимия, 1969. Т. 5. № 2. С. 202.
34. Криштон В. Г., Шабалина А. С. // Тр. XLVI науч. конф. Московского физико-технического института. Часть V. Долгопрудный: МФТИ, 2003. С. 43.
35. Козлов В.А., Сахаров К.А. Физические основы жидкостных и твердотельных измерительных систем и устройств обработки информации. М.: МФТИ, 1994. С. 37.
36. Сафонов М.В. Конвективная диффузия и шумы в молекулярно-электронных структурах. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Долгопрудный: МФТИ, 2007. 127 с.
37. Козлов В.А., Сафонов М.В. // ЖТФ. 2003. Т. 73. № 12. С. 81.
38. Зайцев Д.Л., Дудкин П.В., Агафонов В.М. // Изв. вузов. Электроника. 2006. № 5. С. 61.
39. Зайцев Д.Л., Дудкин П.В. // Автономная энергетика. 2005. № 19. С. 62.
40. Козлов В.А., Агафонов В.М., Зайцев Д.Л., Сафонов М.В. Способ изготовления электродного узла молекулярно-электронного измерителя линейных и угловых движений с низким уровнем собственных шумов. Патент РФ № 2394246. Оpubл. офиц. бюл. "Изобретения. Полезные модели" № 19 от 10.07.2008.
41. Клюс Ю.В., Сафонов М.В. // Тр. XLIX науч. конф МФТИ "Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук". Москва—Долгопрудный: МФТИ, 2006. С. 100.
42. Egorov E.V., Egorov I.V., Agafonov V.M. // J. Sensors. 2015. V. 2015. P. ID 512645.
43. Агафонов В.М., Зайцев Д.Л. // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 1. С. 130.
44. www.r-sensors.ru.
45. Агафонов В.М., Егоров И.В., Шабалина А.С. // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49. № 1. С. 5.
46. Son E., Agafonov V., Bugaev A., Krishtop V. // CROM Proc. 2nd ASME Micro/Nanoscale Heat & Mass Transfer Int. Conf. (MNHMT 2009). Shanghai. Dec. 18–21. N.Y.: Amer. Soc. Mechanical Engineers, 2009. P. MNHMT2009-18557.
47. Касперович И.П., Криштон В.Г. // Тр. первой российско-белорусской науч.-техн. конф. "Элементная база отечественной радиоэлектроники". Нижний Новгород. 11–14 сент. 2013. М.: НТОРЭС им А.С. Попова, 2013. Т. 1. С. 28.
48. Бугаев А.С., Агафонов В.М., Хайретдинов М.С., Ковалевский В.В. // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. "Нигматуллинские чтения-2013". Казань. 19–21 нояб. Казань: Изд-во Казан. гос.техн. ун-та, 2013. С. 213.
49. Agafonov V.M., Bugaev A.S., Krishtop V.G. et al. // Proc. Russian-Polish Workshop "Actual Problems in Geosciences". Oct 15–16. 2008. М.: O.Y. Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS. 2008. P. 15
50. Шабалина А.С., Криштон В.Г. // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. "Нигматуллинские чтения-2013". Казань. 19–21 нояб. Казань: Изд-во Казан. гос.техн. ун-та, 2013, С. 183.
51. Peterson J. Observation and Modeling of Seismic Background Noise. Open file report 93-322. Albuquerque: US Dept. of Interior Geological Survey, 1993. 95 p. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr93322>
52. Wielandt E. The New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2)/Ed. by Bormann P. Potsdam: Deutsches GeoForschung Centrum GZF, 2012. Ch5. http://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/escidoc:56076:4/component/escidoc:61055/Chapter_5_rev1.pdf
53. Programm for Array Seismic Studies of the Continental Lithosphere (PASSCAL). N.Y.: Incorporate Research Institution for Seismology (IRIS). 2008. https://www.iris.edu/hq/files/publications/passcal_review.pdf
54. Templeton M.E. IRIS Library of Nominal Response for Seismic Instruments. Incorporated Research Institutions for Seismology. Dataset. Washington: IRIS, 2017. <https://doi.org/10.17611/S7159Q>
55. Koulakov I., Jaxybulatov K., Shapiro N. M. et al. // J. Volcanology and Geothermal Research. 2014. V. 285. P. 36.
56. Колос А.Ф., Крюковский Д.В. // Изв. Петербургского гос. ун-та путей сообщения 2013. № 2. С. 120.
57. Akris J.M., Papoulia J., Sambas A.T. // Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata 2014. V. 55. № 2. P. 561.
58. Papoulia J., Makris J., Ilinski D. et al. // Proc. 9 th Hellenic Symp. of Oceanography and Fisheries., Patra. 13–16 May 2009. Athens: Hellenic Center for Marine Research, 2009. V. 1 P. 21.
59. Papoulia J., Nicolich R., Makris J. et al. // Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata 2014. V. 55. № 2. P. 405.
60. Левченко Д.Г. // Сейсмические приборы. 2009. Т. 45. № 4. С. 5.
61. Левченко Д.Г. Регистрация широкополосных сейсмических сигналов и возможных предвестников сильных землетрясений на морском дне. М.: Научный мир, 2005.
62. <http://eqru.gsras.ru/stations/index.php?inc=netlist>
63. Коростелев В.Г., Саватюгин Л.М., Смирнов В.Н. // Проблемы Арктики и Антарктики, 2014. № 3 (101). С. 69.
64. Козлов В.А. // Успехи современ. радиоэлектрон. 2004. № 5–6. С. 138.
65. Шабалина А.С., Зайцев Д.Л., Егоров Е.В. и др. // Успехи современ. радиоэлектрон. 2014. № 9. С. 33.
66. www.seismotronics.ru
67. www.nordlab.com
68. Агафонов В.М., Егоров Е.В., Зайцев Д.Л. // Гирескопия и навигация. 2010. № 1. С. 72.
69. Егоров Е.В., Козлов В.А., Яшкин А.В. // Электрохимия. 2007. Т. 43. № 12. С. 1436.
70. Козлов В.А., Сафонов М.В. // Электрохимия. 2004. Т.40. № 4. С. 460.
71. Агафонов В.М., Нестеров А.С. // Электрохимия. 2005. Т. 41. № 8. С. 987.
72. Криштон В.Г. // Электрохимия. 2014. Т. 50. № 4. С.392.
73. Агафонов В.М., Афанасьев К.А., Николаев А.Н., Яшкин А.В. // Новые промышленные технологии. 2010. № 6. С. 68.

74. <http://www.rotational-seismology.org/>
75. Lee W.H.K., Igel H., Trifunac M.D. // Seismological Research Lett. 2009. V. 80. №3. P. 479.
76. Lee W.H.K., Evans J.R., Huang B.-S. et al. The New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2)/Ed. by Bormann P. Potsdam: Deutsches GeoForschung Centrum GZF, 2012. Information Sheet 5.3. http://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/escidoc:43316:3/component/escidoc:56116/IS_5.3_rev1.pdf
77. Агафонов А.М., Егоров Е.В., Зайцев Д.Л. и др. // Гироскопия и навигация. 2010. № 3(70). С. 14.
78. Агафонов А.М., Егоров Е.В., Зайцев Д.Л. // Гироскопия и навигация. 2010. № 1(68). С. 72.
79. Neeshrapa A., Antonov A., Agafonov V. // Sensors. 2015. V. 15. № 1. P. 365.
80. Антонов А.Н., Зайцев Д.Л. // Гироскопия и навигация № 2 (69), 2010, С. 63.
81. Зайцев Д.Л., Пантелеев А.М. // Гироскопия и навигация. 2009. № 2 (65). С. 103.
82. Kapustian N., Antonovskaya G., Agafonov V. et al. Seismic Behaviour and Design of Irregular and Complex Civil Structures / Eds. by O. Lavan, M. De Stefano. Dordrecht: Springer, 2013. P. 353.
83. Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Климов А.Н. // Жилищное строительство. 2013. № 11. С.6.
84. Агафонов В.М., Афанасьев К.А., Яшкин А.В. // Тр. МФТИ. 2013. Т. 5. № 2(18). С. 142.
85. Kozlov V.A., Agafonov V. M., Dudkin P.V. // Abstr. Int. Scientific and Technical Conf. "System Problem of Reliability, Quality, Information and Electronic Technologies", October 3–14, 2005. M.: Radio and Communication, 2005, P. 142.