

Лазеры. Измерения. Информация

Том 1, №1 / 2021



Новороссийск
2021

Лазеры. Измерения. Информация
Научный журнал
Издаётся с марта 2021 года
Выходит один раз в три месяца

Том 1, № 1 (1)
Март-май 2021 г.

Главный редактор: В. Е. Привалов
Ответственный редактор: В. Г. Шеманин

Редакционная коллегия: А. Н. Власов, В. Н. Дёмкин, Г. С. Евтушенко, И. Г. Иванов,
М. М. Кугейко, Г. П. Михайлов, Л. А. Русинов, А. Л. Соколов, В. А. Степанов, А. А. Тихомиров,
С. А. Филист, А. Э. Фотиади, Е. Г. Чуляева

Учредитель: ФГБОУ ВО БГТУ им. В. Г. Шухова
Издатель: Филиал БГТУ им. В. Г. Шухова в г. Новороссийске
Адрес редакции:
353919, Россия, Новороссийск, Мысхакское шоссе 75
Тел. +78617221333
<https://lasers-measurement-information.ru>
e-mail: editor-laser@nb-bstu.ru

Свидетельство о регистрации:

Опубликовано 02.03.21

© Филиал БГТУ им. В. Г. Шухова в г. Новороссийске, 2021

Содержание:

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

Привалов В. Е.

Лазеры. Измерения. Информация. От редакторастр. 4

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

Мкртычев О. В.

Методика определения лучевой прочности материалов при однократном облучении.....стр. 7

ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

Шеманин В. Г.

Лидар комбинационного рассеяния света для зондирования молекул оксидов в атмосферестр. 14

ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Кальчихин В. В., Кобзев А. А., Тихомиров А. А., Филатов Д. Е.

Лазерный измеритель интегральных и микроструктурных характеристик атмосферных осадков ОПТИОС.....стр. 23

Дьяченко В. В., Веденин Е. И.

Исследование влияния воздушного переноса на состояние окружающей среды лазерными методами.....стр. 33

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Корсунский Н. А, Мирошников А. В., Шаталова О.В., Протасова З.У., Серебровский А. В., Крикунова Е. В., Сафонов Р. И.

Программно-аппаратный комплекс для формирования дескрипторов в системе поддержки принятия решений по диагностике медицинских рисков.....стр. 43

Трифонов А. А., Кузьмин А. А., Петрунина Е. В., Кадырова С.

Средства оценки мышечной нагрузки и мышечного утомления для управления экзоскелетом в комбинированном режиме.....стр. 55

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

Лазеры. Измерения. Информация От редактора

Привалов В. Е.

Россия, Санкт-Петербург, СПбПУ им. Петра Великого

email: editor-laser@nb-bstu.ru

В прошедшем 2020 году исполнилось 60 лет со дня рождения первого оптического квантового генератора (ОКГ). Наряду с указанной аббревиатурой весьма распространена аббревиатура ЛАЗЕР (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). А в наступившем 2021 году исполнится 30 лет со дня организации первой конференции «Лазеры. Измерения. Информация», которая быстро стала международной. В продолжение традиций, мы представляем Вам журнал «Лазеры. Измерения. Информация».

Ключевые слова: лазер, оптический квантовый генератор, квантовая электроника, измерения, информация, лазерные измерения

В нынешнем году исполняется 60 лет первому отечественному ОКГ.

Квантовая электроника зародилась в микроволновом диапазоне длин волн в 1950-е годы. Квантовые генераторы микроволнового диапазона – мазеры. Авторами первого мазера стали А. М. Прохоров и его ученик Н. Г. Басов. За успехи в этой области они были удостоены Ленинской премии в 1958 году. Далее их успешная деятельность распространилась и на оптический диапазон. В 1964 году академики А. М. Прохоров и Н. Г. Басов вместе с Ч. Таунсом были удостоены Нобелевской премии за создание квантовой электроники. Фундаментальная научная работа в квантовой электронике сопровождалась развертыванием промышленного производства. В 1960-годы появились промышленные образцы лазеров. Лазеры начали широко применяться в научных исследованиях и производстве. Высокая плотность энергии лазерного луча позволила совершить переворот в ряде технологий: резка, сварка, обработка поверхностей, маркировка и т.п. Основное отличие лазера от других источников света – когерентность излучения, в первую очередь, временная. Оно открыло новую эру в метрологии, измерительной технике, передаче информации.

Начнем с измерений. Точность измерений, как и знание, не бывает избыточной. Рост точности измерений открывает новые возможности. Появляются новые научные открытия, новые приборы, расширяются диапазоны измерений. Линейно-угловые измерения на нашей планете по объему превосходят все остальные виды измерений. Именно сюда, в первую очередь, устремились разработчики лазерной измерительной техники: появились лазерные интерферометры, гетеродинные измерители длин волн, лазерные дальнометры, лазерные гониометры, лидары.

Долгое время в линейных измерениях господствовали штриховые и концевые меры. Погрешность измерения составляла ($10^{-6} \dots 10^{-7}$) м. В конце XIX века длину стали измерять в длинах волн наиболее монохроматичных в то время газоразрядных источников спонтанного излучения. Точность измерений выросла. В 1960 году в качестве эталонного источника излучения стали применять газоразрядную лампу, наполненную криптоном–86 (длина волны – 0,60578 мкм). Погрешность снизилась до ($4 \cdot 10^{-9}$) м. В 1984 году планета перешла на новое определение метра. Эталонными источниками стали He-Ne лазеры, стабилизированные по насыщенному поглощению в йоде (0,6329 мкм) и метане (3,39 мкм). Погрешность измерений в видимом диапазоне снизилась до ($10^{-9} \dots 10^{-10}$) м. Через несколько лет она снизилась до ($10^{-11} \dots 10^{-12}$) м. Рекордные результаты получены с He-Ne лазерами, стабилизированными по насыщенному поглощению в метане – погрешность снизилась до ($10^{-13} \dots 10^{-14}$) м, – в Институте лазерной физики СО РАН (В. П. Чеботаев, С. Н. Багаев), во ВНИИФТРИ (В. М. Татаренков). Результатом разработки и

исследований He-Ne лазеров, стабилизированных по насыщенному поглощению в йоде, во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева стало появление указанных лазеров в 1970-1980 годы в составе трёх государственных первичных эталонов (единицы длины – метра, единицы температуры – Кельвина, единицы емкости - Фарады). Это радикально изменило обстановку в данных видах измерений. Указанные лазеры появились не только в первичных эталонах, но и на других ступенях соответствующих поверочных схем. Появились образцовые средства измерений с указанными лазерами, в том числе и отраслевые.

Краткое сообщение, конечно, не может претендовать на всесторонний охват темы «Лазеры и измерения», тем более освещения других тем, посвященным лазерным приложениям. И все же несколько слов следует сказать и роли лазеров в передаче информации. Известно, что объем информации, передаваемой излучением, пропорционален квадрату несущей частоты. Т. е. объем информации, передаваемой радиоволнами (например, в миллиметровом диапазоне) меньше объема информации, передаваемой волнами в ближнем ИК и видимом диапазонах примерно в миллион раз. Поэтому с появлением лазеров встал вопрос об их применении в связи и др. информационных системах. Вопрос успешно разрабатывается и результаты нашли практическое применение.

С 1991 года мы ежегодно проводим конференцию «Лазеры. Измерения. Информация». Она быстро стала международной. Ежегодно к началу конференции издаются тезисы докладов. Несколько лет выпускались трехтомники докладов конференции. Некоторые представления об обсуждаемой тематике можно получить в монографиях организаторов конференции, изданных в XX и XXI веках (напр. [1–5]). Были случаи, когда журналы делали отдельные выпуски, авторами статей которых были участники конференции. Но они не могли быть регулярными. Поэтому и появилась идея издания журнала «Лазеры. Измерения. Информация».

Список литературы

1. В. Е. Привалов. «Газоразрядные лазеры в измерительных комплексах». 1989, Ленинград, Судостроение, 260 с.
2. В. А. Иванов, В. Е. Привалов. «Применение лазеров в приборах точной механики». 1993, Санкт-Петербург, Политехника, 217 с.
3. Г. И. Долгих, В. Е. Привалов. «Лазеры. Лазерные системы». 2009, Владивосток, Дальнаука, 202 с.
4. В. Е. Привалов, А. Э. Фотиади, В. Г. Шеманин. «Лазеры и экологический мониторинг атмосферы». 2013, Санкт-Петербург, Лань, 288 с.
5. Г. И. Долгих, В. Е. Привалов. «Лазеры. Фундаментальные и прикладные исследования». 2016, Владивосток, Рея, 352 с.

Lasers. Measurements. Information From the editor

Privalov V. E.

Russia, St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnical University

email: editor-laser@nb-bstu.ru

Last year, 2020 marked the 60th anniversary of the birth of the first optical quantum generator (OCG). Along with this abbreviation, the abbreviation LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) is very common. And in the coming year 2021, it will be 30 years since the organization of the first conference «Lasers. Measurements. Information», which quickly became international. In continuation of the tradition, we present you the journal «Lasers. Measurements. Information».

Keyword: laser, optical quantum generator, quantum electronics, measurements, information, laser measurements

References

1. V. E. Privalov. «Gas-discharge lasers in measuring complexes». 1989, Leningrad, Sudostroenie, 260 p.
2. V. A. Ivanov, V. E. Privalov. «Application of lasers in precision mechanics devices». 1993, Saint-Petersburg, Politekhnik, 217 p.
3. G. I. Dolgikh, V. E. Privalov. «Lasers. Laser systems». 2009, Vladivostok, Dal'nauka, 202 p.
4. V. E. Privalov, A. E. Fotiadi, V. G. Shemanin. «Lasers and environmental monitoring of the atmosphere». 2013, Saint-Petersburg, Lan', 288 p.
5. G. I. Dolgikh, V. E. Privalov. «Lasers. Basic and applied research». 2016, Vladivostok, Reya, 352 p.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 53.08, 514.862, 531.01
ГРНТИ 59.41.00, 29.31.27, 29.33.47
ВАК 01.04.01, 05.11.01

Методика определения лучевой прочности материалов при однократном облучении

Мкртычев О. В.

353919, Россия, г. Новороссийск, Мыхакское шоссе 75, Новороссийский филиал БГТУ им. В. Г. Шухова

email: mkrtychev-o-v@nb-bstu.ru

В данной статье рассматривается вопрос, относящийся к области силовой оптики, который сводится к определению лучевой прочности поверхности, подвергающейся облучению мощным лазерным импульсом. Поверхность материала, подвергающегося в разных точках такому облучению импульсом лазерного излучения, ввиду стохастической природы явления, в каждом случае либо разрушается, либо нет. Это явление часто называют лазерным абляционным разрушением/ деструкцией или просто лазерной абляцией. Знание динамики лазерного абляционного разрушения поверхности материала, индуцированного лазерным излучением, имеет важное техническое и технологическое значение. В данной работе рассматривается метод прогнозирования динамики лазерного абляционного разрушения с помощью определения лучевой прочности поверхности статистическими методами. Для каждого значения плотности энергии проводится облучение поверхности, фиксируется наличие или отсутствие инициированного этим импульсом разрушения, после чего определяется вероятность p разрушения образца. По полученным экспериментальным данным строится кривая вероятности данного события. Далее применяется распределение Вейбулла–Гнеденко и определяется лучевая прочность поверхности материала при однократном облучении материала.

Ключевые слова: лучевая прочность, лазерная абляция, статистика Вейбулла–Гнеденко, статистические методы исследования

Введение

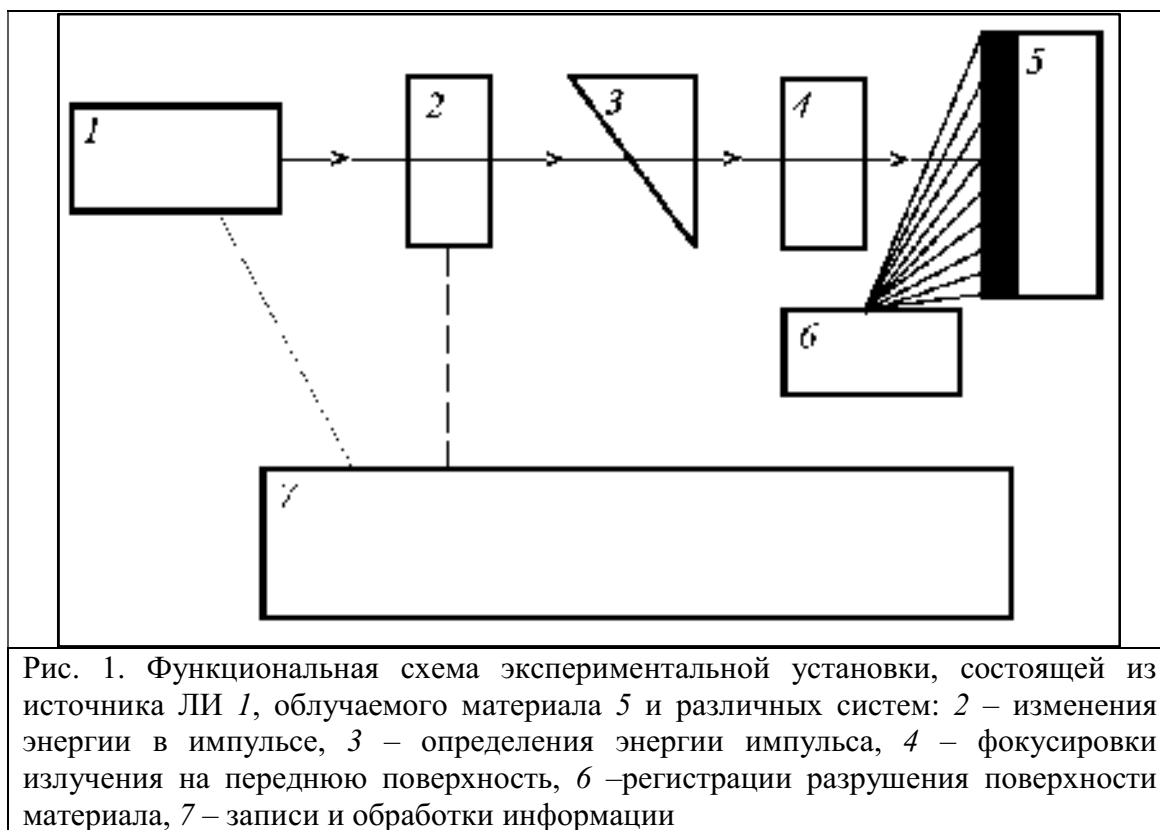
Развитие силовой оптики во второй половине прошлого века поставило перед создателями такой аппаратуры специфическую проблему. При больших мощностях падающего излучения оптические элементы разрушались на поверхности или по всему объёму взаимодействия вещества с излучением. Таким образом, проблема определения лучевой прочности материала встала в ряд актуальных задач для теоретиков и экспериментаторов в связи с тем, что работа оптических элементов в условиях их облучения мощным излучением часто приводит к механическому разрушению. Данное явление по своей природе имеет существенно случайный характер [1–6]. Многие авторы рассматривали способы определения лучевой прочности материала [7–9]. Авторы [7] рассматривают метод определения лучевой прочности при многократном облучении поверхности материала. В этом методе строят зависимость $\lg \tau = f(E)$, где E – напряжённость электрического поля, τ – время от начала каждого воздействия до электрического пробоя образца. По этой зависимости определяется искомый предел лучевой прочности материала. Авторы [8] предлагают метод контроля лучевой прочности поверхности по измерению энергетического распределения электронов, эмитируемых поверхностью в заданном интервале температур с поверхности облучаемого материала. Следующая группа авторов [9] предлагает определять лучевую прочность поверхности путём получения зависимости между распределением

интенсивности излучения в пятне облучения и областями разрушения поверхности в этом пятне облучения. Каждому из этих методов присущи свои достоинства и недостатки. Например, в первом методе образец подвергается многократному облучению вплоть до возникновения электрического пробоя образца, а при вычислениях делаются ряд дополнительных допущений. Во втором методе к недостаткам можно отнести ограничение температуры диапазоном 130...150 °С, и существенную зависимость эмиссии электронов от условий измерения. Третий метод также имеет ряд недостатков. К их числу можно отнести ряд дополнительных измерений для изучения профиля распределения интенсивности в пучке, применение специальной аппаратуры, большое число исследуемых образцов и большое количество измерений для получения статистически значимых результатов.

Автор данной статьи вместе с соавторами в течение ряда лет изучал проблемы определения лучевой прочности различных материалов [10–14]. При этом ставилась задача получить значение этой величины с хорошей точностью, используя простое стандартное оборудование. Для этого модель взаимодействия лазерного излучения с веществом упрощается и учитывает только плотность энергии импульса.

Экспериментальная часть

Для экспериментальной части работы была построена лабораторная установка, функциональные элементы которой показаны на рис. 1. Она состоит из источника 1 лазерного излучения (ЛИ), и различных систем, назначение которых указано в подрисуночной надписи рис. 1.



Экспериментальная часть работы ставит целью получение зависимости вероятности $p_{\text{эксп}}$ разрушения от плотности энергии F импульсного падающего ЛИ. Далее полученная кривая вероятности $p_{\text{эксп}}(F)$ моделируется статистическим распределением Вейбулла–Гнеденко $p(Y)$ по формуле

$$p(Y) = 1 - e^{-Y},$$

где Y – риск разрушения, определяемый для объема/поверхности V как

$$Y = \begin{cases} \int_V \left(\frac{y - y_{np}}{y_{норм}} \right)^m dV, & y > y_{np}, \\ 0, & y < y_{np}, \end{cases}$$

где y – нагрузка, приложенная к элементу dV ; y_{np} – предел прочности, т.е. минимальное напряжение, которое может вызвать разрушение; $y_{норм}$ – нормировочный параметр, имеющий размерность (ед.напряжения·ед.объёма^{1/m}); m – модуль Вейбулла данного статистического распределения. В данном методе, при определённых допущениях, эти выражения представляют в виде интегральной функции распределения Вейбулла–Гнеденко $p_{ВГ}(F)$:

$$p_{ВГ}(F) = \begin{cases} 1 - \exp \left\{ -\ln 2 \left[\sum_{j=1}^k \left(\frac{F}{F_{0,5}} \right)^{m_j} \right] \right\}, & F > 0, \\ 0, & F \leq 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $F_{0,5}$ – пробойная плотность энергии, для которой вероятность пробоя равна $p_{экс}(F) = 0,5$; m_j – модуль Вейбулла для данного j -го типа дефекта, если дефектов более одного типа.

При выполнении экспериментальной части точки поверхности подвергают однократному облучению импульсом ЛИ с заданной плотностью энергии F_i и регистрируют разрушение поверхности материала, индуцированного ЛИ. После проведения цикла измерения из N_i облучений, среди которых произошло $N_{разр,i}$ разрушений, вычисляют экспериментальное значение вероятности $p_{экс}(F_i)$ разрушения поверхности

$$p_{экс}(F_i) = \frac{N_{разр,i}}{N_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

при заданной плотности энергии F_i . Далее по этим точкам строят график вероятности разрушения поверхности материала, показанный на рис. 2. На рис. 2 экспериментальные значения отмечены точками. В качестве основного значения берут среднее арифметическое этих величин

$$p_{экс}(F) = \frac{p_{лин}(F) + p_{спл}(F)}{2}. \quad (2)$$

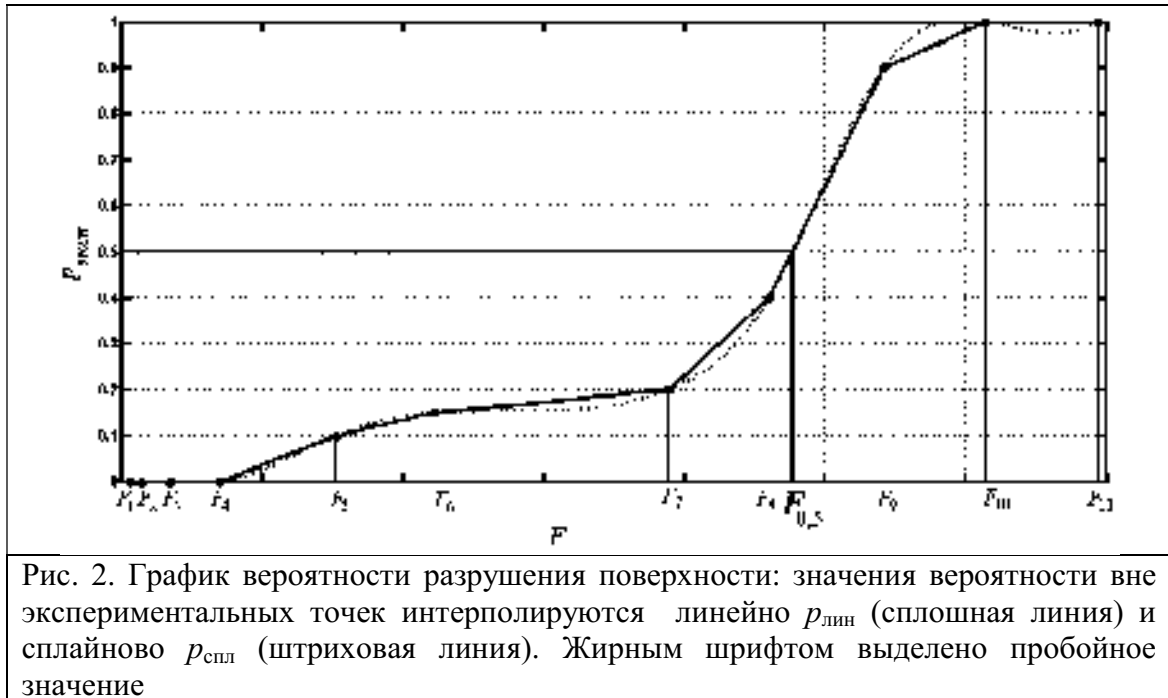


Рис. 2. График вероятности разрушения поверхности: значения вероятности вне экспериментальных точек интерполируются линейно $p_{лин}$ (сплошная линия) и сплайново $p_{спл}$ (штриховая линия). Жирным шрифтом выделено пробойное значение

Полученная график вероятности $p_{экс}(F)$ важен для последующей аналитической части предлагаемого метода. По этой кривой определяют две необходимые для вычислений величины. Первая – пороговое значение плотности энергии разрушения. Оно находится непосредственно на графике. Это значение $F_{0,5}$ плотности энергии при вероятности $p = 0,5$, которое необходимо при вычислениях согласно [15]. Вторая необходимая величина – модуль m Вейбулла, которая вычисляется уже во второй аналитической части предлагаемого метода.

Аналитическая часть

Во время проведения аналитической части метода график вероятности из (2) аппроксимирую с помощью распределения Вейбулла–Гнеденко из (1). При этом на ЭВМ создают сетку шаблонов распределений Вейбулла–Гнеденко, используя наборы из разных значений параметров k и m , с заданными диапазонами изменений и заданным шагом. Все эти значения определяют из допущений модели и желаемой точности результата. Итак, получена сетка шаблонов:

$$p_{BG}(k, m, F) = \begin{cases} 1 - \exp \left\{ -\ln 2 \left[\sum_{j=1}^k \left(\frac{F}{F_{0,5}} \right)^{mj} \right] \right\}, & F > 0, \\ 0, & F \leq 0. \end{cases}$$

Достоверность модели оценивают, минимизируя среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma(k, m) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_F} \{p_{BG}(k, m, F_i) - p_{эксн}(F_i)\}^2}{N_F - 1}}.$$

Распределение с наименее отклоняющимся от экспериментального графика вероятности в указанном смысле, т.е. соответствующее минимуму функции $\sigma_{\min}(k, m) \equiv \sigma^*(k, m)$, и будет искомым. Таким образом предлагаемый метод получает функцию вероятности $p^*(k, m, F_{0,5}, F)$ разрушения поверхности материала вида

$$p^*(k, m, F_{0,5}, F) = \begin{cases} 1 - \exp \left\{ -\ln 2 \left[\sum_{j=1}^k \left(\frac{F}{F_{0,5}} \right)^{mj} \right] \right\}, & F > 0, \\ 0, & F \leq 0, \end{cases}$$

с найденными в ходе экспериментов и вычислений параметрами k , m , $F_{0,5}$ и абсциссой F .

После этого, согласно известным определениям и алгоритмам действий со статистическим распределением Вейбулла–Гнеденко остаётся только записать выражение для оптической прочности поверхности материала, которая будет иметь вид

$$Q(F) = 1 - p^*(k, m, F_{0,5}, F),$$

или подставляя это в предыдущее уравнение

$$Q(k, m, F_{0,5}, F) = \begin{cases} \exp \left\{ -\ln 2 \left[\sum_{j=1}^k \left(\frac{F}{F_{0,5}} \right)^{mj} \right] \right\}, & F > 0, \\ 1, & F \leq 0. \end{cases} \quad (3)$$

Специальными экспериментами показано, что погрешность вычислений, установленная на основании измерений для минимума набора параметров из (3) с доверительной вероятностью 0,9 не превышает 18 %.

Заключение

В предложенном методе решается задача определения лучевой прочности облучаемого материала с точностью 18 % при доверительной вероятности на уровне 0,9. При этом используется стандартное оборудование. Поэтому описанный в данной статье метод может найти широкое применение в тех областях науки и техники, где необходима определение значений лучевой прочности и прогноз динамики этих значений при взаимодействии материала с импульсным ЛИ. Это поможет контролировать работу элементов силовой оптики и нанофотоники и определять оптимальные параметры работы таких элементов. К преимуществам описываемого метода можно отнести и возможность прогноза пороговых значений плотности энергии, которую можно пропустить через данный силовой элемент без разрушения его поверхности или объёма, а также прогнозирование срока службы таких элементов. По данному методу получен патент РФ на изобретение [16].

Конфликт интересов

Автор статьи заявляет, что у него нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и ему ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Благодарности

Автор благодарит своих более опытных коллег и старших товарищей за ценные замечания, сделанные во время исследования. Особую благодарность автор высказывает своему научному руководителю, Шеманину Валерию Геннадьевичу, за многолетний труд наставника и многотрудные лета учителя.

Список литературы

1. Анисимов С. И., Лукьянчук Б. С. Избранные задачи теории лазерной абляции // УФН. 2002. Т. 172, №3. С. 301–333.
2. Колдунов М. Ф., Маненков А. А., Покотило И. Л. Механическое разрушение прозрачных твёрдых тел лазерными импульсами разной длительности // Квантовая электроника. 2002. Т. 32, № 4. С. 335–340.
3. Бессараб А. В., Кормер С. Б., Павлов Д. В., Фунтиков А. И. Статистические закономерности поверхностного разрушения оптического стекла под действием широких пучков лазерного излучения // Квантовая электроника. 1977. Т. 4, № 2. С. 328–334.
4. Алешин И. В. и др. Оптический пробой прозрачных сред, содержащих неоднородности // ЖЭТФ. 1976. Т. 70, вып.4. с.12–14.
5. Кортон В. С., Перлов Д. И., Шифрин В. П. О взаимосвязи параметров экзоэмиссии с лучевой стойкостью элементов ОКГ // Квантовая электроника. 1976. Т. 3, № 5. С. 1143–1145.
6. O. Connel. Single and multip.-shot laser damage properties of commercial grade PMMA // Appl. Optics. 1984. V. 23, N 5. p. 682–688.
7. Патент № 2034245, Российская Федерация, G01J 5/50. Способ определения предела оптической прочности материала / В. А. Петров, А. Е. Чмель, А. М. Кондырев; патентообладатель Петров А. В. Заявл. 26.11.1991; опубл. 30.04.1995.
8. Патент № 2034245, Российская Федерация, G01B 7/34 G01N 23/22. Способ контроля лучевой прочности поверхности оптических материалов / Л. Б. Глебов, А. Ф. Зацепин, В. С. Кортон, Н. В. Никоноров, В. В. Тюков, В. И. Ушкова; патентообладатель Уральский государственный технический университет. Заявл. 26.12.1990; опубл. 30.04.1995.
9. Патент № 2430352, Российская Федерация, G01N 17/00. Способ определения лучевой прочности поверхности оптической детали / Д. И. Дмитриев, И. В. Иванова, В. Н. Пасункин, В. С. Сиразетдинов; патентообладатель федеральное государственное унитарное предприятие Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем (ФГУП НИИКИ ОЭП) (RU). Заявл. 28.11.2010; опубл. 27.09.2011.
10. Аткарская А. Б., Шеманин В. Г., Мкртычев О. В. Изменение показателя преломления наноразмерных плёнок при модифицировании стеклянных подложек // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. № 8/2. С. 238–239.
11. Atkarskaya A. B., Privalov V. E., Shemanin V. G., Mkrtychev O. V. Laser ablation of the glass nanocomposites studies // Optical Memory and Neural Networks. 2014. V.23, Issue 4. p. 265–270.
12. Привалов В. Е., Фотиади А. Э., Шеманин В. Г., Мкртычев О. В. Лазерная абляция нанокompозитов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2015. № 1 (213). С. 128-135.
13. Шеманин В. Г., Привалов В. Е., Мкртычев О. В. Метод оценки оптической прочности облучаемой поверхности при лазерной абляции // Измерительная техника. 2018. № 7. С. 34–37.
URL: http://izmt.ru/note.php?type=TAMI_izmt¬es_id=281
14. Mkrtychev O. V., Privalov V. E., Shemanin V. G., Shevtsov Yu. V. Study of Laser Ablative Destruction of Composites with Nanoscale Coatings of Hafnium and Zirconium Dioxides // Opt. Mem. Neural Networks. 2020. V. 29. P. 142–146.
URL: <https://doi.org/10.3103/S1060992X20020095>
15. Маненков А. А., Прохоров А. М. Лазерное разрушение прозрачных твёрдых тел // УФН. 1986. Т. 148, вып. 1. С. 179–211.
16. Патент № 2694073, Российская Федерация, G01N 17/00 G01M 11/02. Способ определения предела оптической прочности материала при однократном облучении / О. В. Мкртычев,

В. Г. Шеманин; патентообладатель Мкртычев О. В. Заявл. 26.03.2018; опубл. 09.07.2019. Бюл. № 19.

Method for determining the radiation resistance of materials with a single irradiation

Mkrtychev O. V.

*Novorossiysk Branch of Belgorod V G Shukhov State Technology University, 353919, Russia,
Novorossiysk, Myskhakskoe shosse 75*

email: mkrtychev-o-v@nb-bstu.ru

This article discusses an issue related to the field of power optics, which boils down to determining the radiation strength of a surface exposed to a powerful laser pulse. Due to the stochastic nature of the phenomenon, the surface of a material exposed at different points to such irradiation by a laser pulse, in each case either collapses or not. This phenomenon is often referred to as laser ablative destruction or simply laser ablation. Knowledge of the dynamics of laser ablative destruction of a material surface induced by laser radiation is of great technical and technological importance. This paper discusses a method for predicting the dynamics of laser ablation damage by determining the radiation strength of the surface by statistical methods. For each value of the energy density, the surface is irradiated, the presence or absence of destruction initiated by this pulse is recorded, after which the probability p of destruction of the sample is determined. Based on the experimental data obtained, the probability curve of this event is plotted. Further, the Weibull–Gnedenko distribution is applied and the radiation strength of the material surface is determined with a single irradiation of the material.

Keywords: radiation resistance, laser ablation, Weibull–Gnedenko statistics, statistical research methods

References

1. Anisimov S. I., Luk'yanchuk B. S. Selected problems of laser ablation theory // *Phys. Usp.* 2002. V. 45. p. 293–324.
2. Koldunov M. F., Manenkov A. A., Pokotilo I. L. Mechanical damage in transparent solids caused by laser pulses of different durations // *Kvantovaya Elektronika*. 2002. V. 32, N 4. p. 335–340 (in Russian).
3. Bessarab A. V., Kormer S. B., Pavlov D. V., Funtikov A. I. Statistical relationship governing the surface damage of optical glass by wide laser radiation beams // *Kvantovaya Elektronika*. 1977. V. 4, N 2. p. 328–334 (in Russian).
4. Alyoshin I. V. and others. Optical breakdown of transparent media containing inhomogeneities // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1976. V. 70, Iss. 4. p. 12–14 (in Russian).
5. Kortov V. S., Perlov D. I., Shifrin V. P. Relationship between exoemission parameters and optical strength of laser elements // *Kvantovaya Elektronika*. 1976. V. 3, N 5. p. 1143–1145 (in Russian).
6. O. Connel. Single and multip.-shot laser damage properties of commercial grade PMMA // *Appl. Optics*. 1984. V. 23, N 5. p. 682–688.
7. Patent № 2034245, Russian Federation, G01J 5/50. Method for determining the optical strength limit of a material / V. A. Petrov, A. E. Chmel, A. M. Kondyrev; patentee Petrov A. V. 26.11.1991; 30.04.1995 (in Russian).
8. Patent № 2034245, Russian Federation, G01B 7/34 G01N 23/22. Method for controlling the radiation resistance of the surface of optical materials / L. B. Glebov, A. F. Zatsepin, V. S. Kortov, N. B. Nikonorov, V. V. Tyukov, V. I. Ushkova; patentee Ural State Technical University. 26.12.1990; 30.04.1995 (in Russian).
9. Patent № 2430352, Russian Federation, G01N 17/00. Method for determining the radiation resistance of the surface of an optical part / D. I. Dmitriev, I. V. Ivanova, V. N. Pasunkin, V. S. Sirazetdinov; patentee Federal State Unitary Enterprise Research Institute for Comprehensive Testing of Optoelectronic Devices and Systems (FGUP NIIKI OEP) (RU). 28.11.2010; 27.09.2011 (in Russian).

10. Atkarskaya A. B., Shemanin V. G., Mkrtychev O. V. Change in the refractive index of nanoscale films upon modification of glass substrates // Proceedings of higher educational institutions. Physics. 2012. N 8/2. p. 238–239 (in Russian).
11. Atkarskaya A. B., Privalov V. E., Shemanin V. G., Mkrtychev O. V. Laser ablation of the glass nanocomposites studies // Optical Memory and Neural Networks. 2014. V.23, Issue 4. p. 265–270.
12. Privalov V. E., Fotiadi A. E., Shemanin V. G., Mkrtychev O. V. Laser ablation studies of nanocomposites // St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics (SPJPM). 2015. P. 1–5. [URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.spjpm.2015.03.007>].
13. Privalov V. E., Shemanin V. G., Mkrtychev O. V. Method of Assessing the Optical Resistance of an Irradiated Surface Under Laser Ablation // Meas Tech. 2018. N. 61: p. 694.
URL: <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1486-2>
14. Mkrtychev O. V., Privalov V. E., Shemanin V. G., Shevtsov Yu. V. Study of Laser Ablative Destruction of Composites with Nanoscale Coatings of Hafnium and Zirconium Dioxides // Opt. Mem. Neural Networks. 2020. V. 29. P. 142–146.
URL: <https://doi.org/10.3103/S1060992X20020095>
15. Manenkov A. A., Prokhorov A. M. Laser-induced damage in solids // Sov. Phys. Usp. 1986. V. 29. p. 104–122.
16. Patent № 2694073, Russian Federation, G01N 17/00 G01M 11/02. Method for determining the optical strength limit of a material with a single irradiation / O. V. Mkrtychev, V. G. Shemanin; patentee Mkrtychev O. V. 26.03.2018; 09.07.2019. Bull. No 19 (in Russian).

ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 535.621(075.8)

Лидар комбинационного рассеяния света для зондирования молекул оксидов в атмосфере

Шеманин В. Г.

*Новороссийский филиал Белгородского государственного технологического университета
имени В. Г. Шухова, 353919, Россия, Новороссийск, Мысхакское шоссе, 75*

email: shemanin-v-g@nb-bstu.ru

Выполнено численное решение лидарного уравнения для измерения концентрации молекул оксидов азота, серы и углерода на уровне ПДК и выше (в диапазоне от $2,6 \cdot 10^{18}$ до $1,1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$) лидаром комбинационного рассеяния света в атмосфере на расстоянии зондирования до 500 м в режиме синхронного счёта фотонов и выбора оптимальных параметров такого варианта лидара. Показано, что при зондировании лидаром комбинационного рассеяния света всех исследованных молекул в атмосфере с использованием лазерного излучения на длине волны 532 нм можно зарегистрировать концентрацию на уровне ПДК для диоксида серы за время измерения 616 с на расстоянии зондирования до 500 м, для диоксида и оксида углерода 21 и 25 с соответственно на том же расстоянии, для диоксида азота – во всём диапазоне расстояний за времена до 50 с, а для оксида азота только за время измерения до 5000 с.

Ключевые слова: лидар комбинационного рассеяния света, молекула, концентрация, расстояние зондирования, длина волны лазерного излучения

Введение

Загрязнение атмосферы молекулами оксидов азота, серы и углерода представляет большую проблему в связи с их широким распространением в большом числе технологий современных производств [1]. Разработка новых лазерных методов измерения концентрации молекул оксидов с уровнем концентраций порядка предельно-допустимой (ПДК) [1, 2] и выше в атмосфере на базе лидара комбинационного рассеяния света требует выбора оптической схемы и оптимальных параметров такого лидара. Ранее, в работах [1, 3–6] в результате анализа методов лазерного зондирования газовых молекул атмосфере было получено, что лидар комбинационного рассеяния света может использоваться для дистанционного измерения концентрации молекул на уровне десятков и сотен ПДК. А в работах [4, 7, 8] было предложено лидарное уравнение для комбинационного рассеяния света газовыми молекулами в атмосфере с учётом конечной ширины линии генерации. Оказалось, что учёт конечной ширины линии генерации реального лазера, соотношение ширин полос комбинационного рассеяния света и аппаратной функции лидара позволяет уточнить решение такого лидарного уравнения [7, 8]. Поэтому целью настоящей работы является оценка возможности измерений таким лидаром комбинационного рассеяния света концентрации молекул оксидов на уровне ПДК и выше в атмосфере на расстояниях зондирования до 500 м в режиме синхронного счёта фотонов и выбор оптимальных параметров такого лидара.

1. Лидар комбинационного рассеяния света

Оптическая схема такого варианта лидара комбинационного рассеяния света построена по биаксиальной схеме как и в [1, 3, 4] и приведена на рис. 1. В качестве зондирующего излучения используется излучение третьей и второй гармоники YAG Nd-лазера с накачкой полупроводниковым лазером с длинами волн 355 и 532 нм и полупроводникового лазера с длиной волны 650 нм с длительностью импульсов 10 нс и энергиями в импульсе до 10 мкДж при частоте следования лазерных импульсов f до 100 кГц [9, 10]. Излучение лазера I направлялось

параллельно оси приёмного телескопа на расстоянии 250 мм, как и в [1, 10], а излучение комбинационного рассеяния молекулами оксидов в атмосфере в направлении назад собиралось приёмным телескопом типа Ньютона со сферическим зеркалом 9 диаметром 400 мм и фокусировалось линзовым объективом 8 в волоконный ввод 6 микроспектрометра 7 типа FSD-8, работающего на линии с ПК.

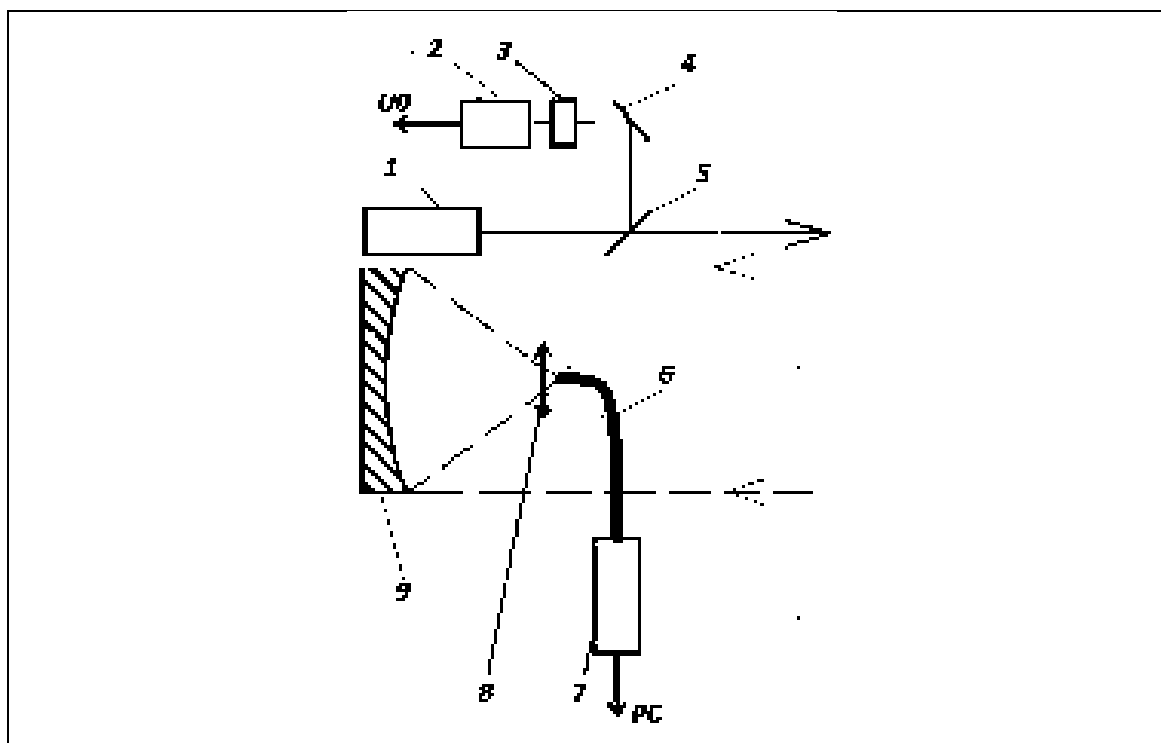


Рис. 1. Оптическая схема лидара комбинационного рассеяния света: 1 – лазер; 2 – фотоприёмник; 3 – интерференционный светофильтр; 4 – глухое зеркало; 5 – стеклянная пластина; 6 – волоконный ввод; 7 – микро спектрометр; 8 – линзовый объектив. 9 – сферическое зеркало приёмного телескопа

Часть лазерного излучения направлялось стеклянной пластиной 5 и глухим зеркалом 4 через интерференционный светофильтр 3 на фотоприёмник 2, напряжение U_0 с которого записывалось платой сбора данных в ПК, для контроля энергии лазерного импульса и формирования начала отсчёта времени измерения.

2. Лидарное уравнение для комбинационного рассеяния света

Лазер лидара будем характеризовать числом фотонов n_0 в импульсе посылаемого в атмосферу лазерного излучения длительностью τ_0 , а линию генерации лазера будем считать Гауссовой с максимумом на частоте ν_0 и полушириной Γ_0 . Тогда число фотонов $n(\nu, z)$ излучения комбинационного рассеяния света исследуемыми молекулами оксидов с концентрацией $N(z)$ на фотоприёмнике лидара можно получить из лидарного уравнения в направлении назад в режиме счёта фотонов в виде [4, 7] как интеграл в интервале от $(\nu_0 - \Gamma_0)$ до $(\nu_R - \Gamma_R)$ [7]:

$$n(\nu, z) = n_0 c \tau_1 G(z) f t S_0 N(z) \frac{d\sigma}{d\Omega} \int_{\nu_0 - \Gamma_0}^{\nu_R + \Gamma_R} T_0(\nu_0, z) \cdot T(\nu_R, z) \cdot \Phi(\nu) A(\nu) \frac{d\nu}{2z^2} \quad (1)$$

где $n(\nu, z)$ – число фотонов, зарегистрированное фотоприёмником лидара на частоте ν_R комбинационного рассеяния света с расстояния зондирования z ; n_0 – число фотонов на частоте ν_0 лазерного излучения. Кроме того, обозначены S_0 – площадь приёмной апертуры телескопа; $G(z)$ – геометрическая функция лидара [1, 7, 10]. Эта функция определяется параметрами оптической схемы лидара [10] и лежит в пределах $0 < G(z) < 1$. Следующие величины: $N(z)$ – концентрация исследуемых молекул; t – время измерения или накопления сигнала и $(d\sigma/d\Omega)$ – дифференциальное сечение комбинационного рассеяния света исследуемыми молекулами. А два множителя –

пропускание атмосферы – как и в [1, 10] равны $T_0(\nu_0, z) = \exp\left[-\int_0^z \alpha(\nu_0, r) dr\right]$ и

$T(\nu_R, z) = \exp\left[-\int_0^z \alpha(\nu_R, r) dr\right]$, соответственно, где $\alpha(\nu_0, r)$ и $\alpha(\nu_R, r)$ – коэффициенты ослабления на

частотах лазерного излучения и комбинационного рассеяния света молекулами оксидов. Учитывая эти выражения, предположим, что функция распределения фотонов лазерного излучения в линии генерации $\Phi(\nu)$ в нашем случае гауссова [7–9]. Кроме того, будем считать, что аппаратная функция или спектральный коэффициент пропускания приёмной системы лидара $A(\nu)$ [1, 8, 10] так же имеет гауссову форму и настроена точно на частоту ν_R полосы комбинационного рассеяния света молекулами оксидов с полушириной Γ_a , которая больше чем Γ_R и Γ_0 , K_l – лидарная константа на частоте ν_0 лазерного излучения, измеренная экспериментально в [11], а $\xi(\nu_R)$ – относительная спектральная чувствительность фотоприёмника на частоте ν_R излучения комбинационного рассеяния света. Тогда перепишем уравнение (1) в виде

$$n(\nu, z) = \frac{B}{z^2} N(z) t I(\nu, z) \quad (2)$$

в этом выражении обозначена константа B как

$$B = \frac{c \tau_1}{2} S_0 f \quad (3)$$

и функция $I(\nu, z)$, которую, используя интеграл ошибок [7, 8], можно представить в виде

$$I(\nu, z) = G(z) n_0 \frac{d\sigma}{d\Omega} 0.34 K_l \xi(\nu) T_0(\nu_0, z) \cdot T(\nu_R, z), \quad (4)$$

при условии, что $\Phi(\nu) = 1$, когда полуширина линии генерации много меньше, чем полуширина аппаратной функции лидара. Также считаем, что дифференциальное сечение комбинационного рассеяния света можно считать постоянным внутри интервала интегрирования по частоте, как и коэффициенты ослабления на частотах лазерного излучения и комбинационного рассеяния света молекулами оксидов [12].

$$t = \frac{n(\nu, z) z^2}{B I(\nu, z) N(z)}. \quad (5)$$

Далее будем рассматривать однократное комбинационное рассеяние света и однородную атмосферу [1, 10, 12]. Значения максимумов полос валентных NO, SO и CO колебаний молекул оксидов собраны из [1, 10, 11, 13, 14] в табл. 1 и для этих полос валентных колебаний всех молекул значения дифференциального сечения колебательного комбинационного рассеяния света на длине волны лазерного излучения 337,1 нм взяты из [12, 13].

Таблица 1

Параметры молекул оксидов азота, серы и углерода

Наименование ЗВ	ПДК*, мг/м ³	ПДК, м ⁻³	Частота собственных колебаний молекул, $\tilde{\nu}^{**}$, см ⁻¹	Дифференциальное сечение колебатель- ного КРС молекул, ($d\sigma/d\Omega$)·10 ³⁰ см ² ***
Оксид азота (NO)	0,4	8·10 ¹⁸	1877	1,5
Диоксид азота (NO ₂)	0,2	2,6·10 ¹⁸	1320	51
Диоксид серы (SO ₂)	0,5	4,7·10 ¹⁸	1151,5	17,0
Оксид углерода (CO)	5,0	107,5 10 ¹⁸	2145	3,6
Диоксид углерода (CO ₂)	-	-	1388	4,2
* ПДК (максимально разовые) взяты из [2]				
** Значения частот собственных колебаний молекул взяты из [1, 10]				
*** Значения дифференциальных сечений колебательного комбинационного рассеяния света молекул взяты из [10, 13]				

Значения дифференциальных сечений комбинационного рассеяния света для всех молекул ($d\sigma/d\Omega$) и выбранных длин волн лазерного излучения 355, 532 и 650 нм были определены по данным, экспериментально измеренным в [10, 13] при комнатной температуре и нормальном давлении на длине волны излучения азотного лазера 337 нм и рассчитанные с учётом зависимости $1/\lambda^4$ для интересующих нас длин волн [11]. Все эти значения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Длины волн и частоты лазерного излучения и полос комбинационного рассеяния света молекул оксидов, дифференциальные сечения колебательного комбинационного рассеяния света (КРС) для этих полос, коэффициенты ослабления в атмосфере на этих длинах волн и относительная спектральная чувствительность фотоприёмника

Длина волны, λ , нм	Частота, ν , ГГц	Дифференциальное сечение КРС ($d\sigma/d\Omega$) 10^{30} см^2	Коэффициент ослабления $\alpha(\nu_0, r)$, км^{-1}	Коэффициент ослабления $\alpha(\nu_R, r)$, км^{-1}	Относительная спектральная чувствительность фотоприёмника $\xi(\nu)$
Оксид азота (NO)		$\nu = 1877 \text{ см}^{-1}$		ПДК = 0.4 мг/м^3 ($8 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$)	
355	845,1	1,2	0,31		
370,6	809,5			0,29	0,3
532	563,9	0,3	0,16		
567,9	528,3			0,25	0,96
650	461,5	0,1	0,14		
704,3	426,0			0,24	0,83
337	890,2	1,5			
Диоксид азота (NO ₂)		$\nu = 1320 \text{ см}^{-1}$		ПДК = 0.2 мг/м^3 ($2.6 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$)	
355	845,1	41,5	0,31		
372,5	805,4			0,28	0,35
532	563,9	10,1	0,16		
572,2	524,3			0,15	0,97
650	461,5	3,7	0,14		
711,0	421,9			0,13	0,76
337	890,2	51,0			
Диоксид серы (SO ₂)		$\nu = 1151,5 \text{ см}^{-1}$		ПДК = 0,5 мг/м^3 ($4,7 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$)	
355	845,1	13,8	0,31		
370,1	819,6			0,28	0,3
532	563,9	2,7	0,16		
566,7	529,4			0,15	0,85
650	461,5	1,2	0,14		
702,6	427,0			0,13	0,83
337	890,2	17,0			
Оксид углерода (CO)		$\nu = 2145 \text{ см}^{-1}$		ПДК = 5,0 мг/м^3 ($107,5 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$)	
355	845,1	2,9	0,31		
384,3	780,6			0,25	0,36
532	563,9	0,6	0,16		
626,7	478,7			0,15	1,00
650	461,5	0,3	0,14		
755,3	397,2			0,13	0,68
337	890,2	3,6			
Диоксид углерода (CO ₂)		$\nu = 1388 \text{ см}^{-1}$			
355	845,1	3,4	0,316		
373,4	803,4			0,28	0,38
532	563,9	0,7	0,16		
573,4	523,2			0,14	0,98

650	461,5	0,3	0,14		
714,5	419,9			0,13	0,78
337	890,2	4,2			

Значения коэффициентов ослабления для этих частот $\alpha(\nu_0, z)$ и $\alpha(\nu, z)$ из [15] также собраны в табл. 2. Поперечное сечение зеркала приемного телескопа лидара было 0.12 м^2 . а шаг по расстоянию $-7,5 \text{ м}$ для времени одного измерения 50 нс , за которое может быть зарегистрировано 200 фотонов [9].

3. Решение лидарного уравнения и обсуждение результатов

Рассмотрим численное решение уравнения (5), полагая, что $G(z)$ в нашем случае равно 1, и концентрация молекул диоксида азота равна $N(z) = 10^{18} \text{ м}^{-3}$. Для такого случая выполним решение уравнения (5) для трёх значений длин волн лазерного излучения 355, 532 и 650 нм с частотой следования лазерных импульсов 100 кГц, энергии в импульсе 1 мДж и диапазона расстояния зондирования от 50 м до 500 м. Результаты решения уравнения (5) для этого случая представлены на рис. 2, как зависимость времени измерения t для нашей экспериментальной ситуации от расстояния зондирования z .

На графиках рис. 2 видно увеличение времени измерения t в ряду длин волн лазерного излучения 532–355–650 нм за счёт спектральной зависимости величин, входящих в уравнение (5), при этом величина времени измерения резко нарастает за первые 200 м примерно на порядок.

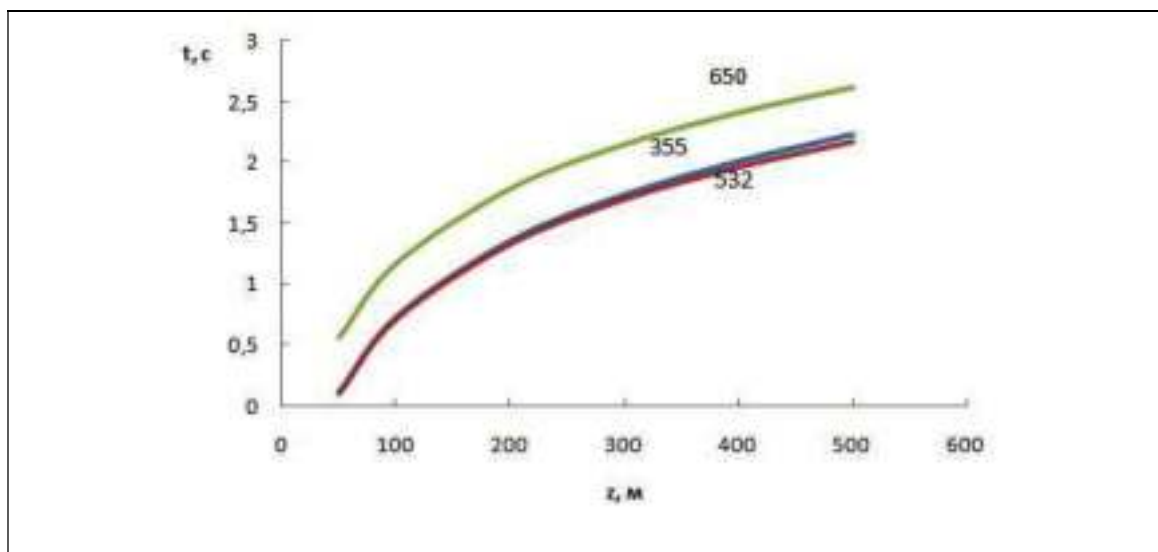


Рис.2. Графики рассчитанной по уравнению (5) зависимости времени измерения t для молекул диоксида азота в логарифмическом масштабе от расстояния зондирования z для длин волн лазерного излучения 532, 355 и 650 нм при зондировании атмосферы лидаром комбинационного рассеяния света. Числа у линий показывают длину волны лазерного излучения

Далее рассмотрим численное решение уравнения (5) для диапазона концентрации молекул диоксида азота $N(z) 10^{16} \dots 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Для этого выполним решение уравнения (5) для длины волн лазерного излучения 532 нм как наилучший вариант по данным рис. 2. Результаты решения уравнения (5) представлены на рис. 3.

Как показывает зависимость времени измерения t для нашей экспериментальной ситуации от концентрации молекул диоксида азота $N(z)$, оно убывает обратно пропорционально концентрации, как и следует из уравнения (5), и растёт примерно на порядок с увеличением расстояния зондирования z .

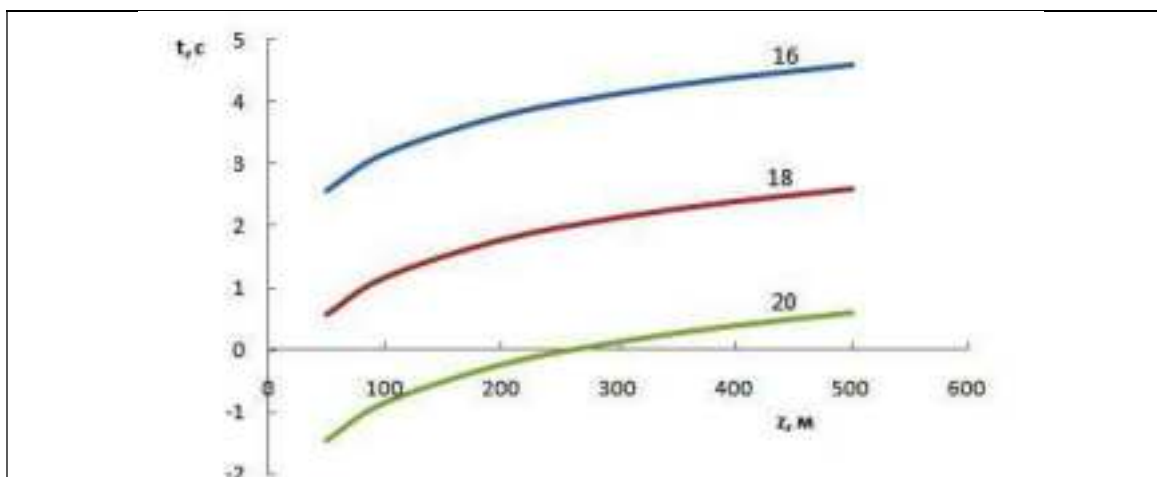


Рис. 3. Графики рассчитанной по уравнению (5) зависимости времени измерения t для молекул диоксида азота в логарифмическом масштабе от расстояния зондирования z для длины волны лазерного излучения 532 нм для той же экспериментальной ситуации. Числа у линий обозначают показатель степени значения концентрации молекул диоксида азота $N(z) 10^{16}, 10^{18}, 10^{20} \text{ м}^{-3}$

Более наглядно эта зависимость для молекулы СО представлена на рис. 4 для расстояний зондирования 50, 100 и 200 м. Логарифмические зависимости времени измерения t от концентрации $N(z)$ показывают, что диапазон значений времени измерения для концентраций порядка ПДК для 50 м составляет 21,5 с, а для 200 м – уже 360 с.

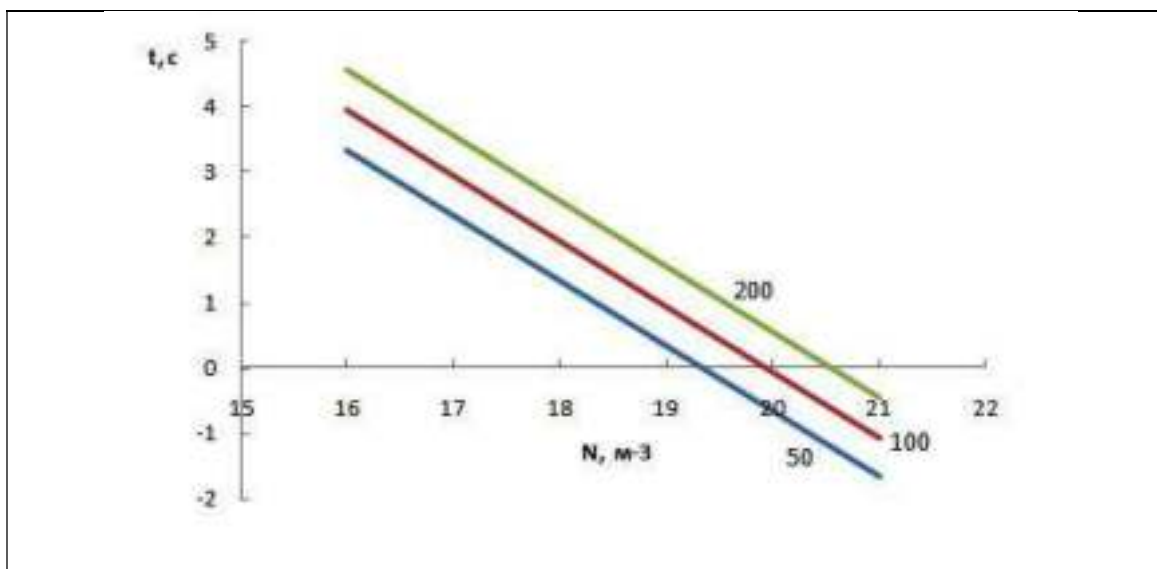


Рис. 4. Графики рассчитанной по уравнению (5) зависимости времени измерения t для молекул диоксида азота в логарифмическом масштабе от расстояния зондирования z для длины волны лазерного излучения 532 нм для той же экспериментальной ситуации. Числа у линий показывают расстояния зондирования 50, 100, 200 м

Теперь оценим время измерения t для всех молекул оксидов с концентрацией порядка ПДК (рис. 5). Для молекулы CO_2 ПДК не определено, а для молекулы СО на два порядка больше чем у остальных трех молекул. Поэтому сведём их к величине концентрации $N(z) = 10^{18} \text{ м}^{-3}$. Это значит, что для оксидов углерода реальная концентрация будет на два порядка больше, а время измерения примерно на два порядка меньше – 0,2 с на 50 м, тогда как для NO_2 – 3,6 с, SO_2 – 5,4 с и NO – 43,7 с на том же расстоянии зондирования 50 м.

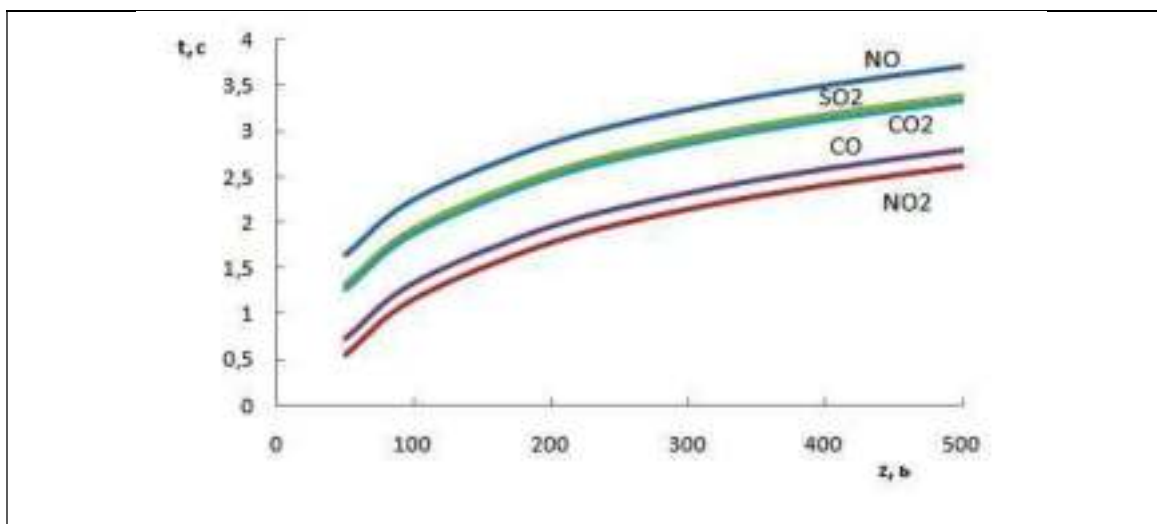


Рис. 4. Графики рассчитанной по уравнению (5) зависимости времени измерения t для всех молекул оксидов в логарифмическом масштабе от расстояния зондирования z для длины волны лазерного излучения 532 нм для той же экспериментальной ситуации

Это связано со спектральной зависимостью дифференциальных сечений колебательного комбинационного рассеяния света для полос этих молекул, коэффициентов ослабления в атмосфере на этих длинах волн и относительной спектральной чувствительности фотоприёмника. Всюду в расчётах частота следования лазерных импульсов составляла 100 кГц и время одного измерения 50 нс или шага по расстоянию $\Delta z = 7,5$ м. Очевидно, что дальнейшее уменьшение величины концентрации исследуемых молекул возможно за счёт увеличения времени измерения t и частоты следования лазерных импульсов f или увеличения их энергии E_0 .

Заключение

Таким образом, полученные результаты позволяют выбрать оптимальные параметры лазера и лидара комбинационного рассеяния света для зондирования молекул оксидов в атмосфере на расстояниях зондирования до 500 м. Причём, если диоксид азота с концентрацией порядка ПДК можно зондировать во всем диапазоне расстояний за времена до 50 с то оксид азота только за время измерения 5000 с. Чтобы зондировать оксиды углерода с концентрацией на уровне ПДК достаточно времени измерения порядка 21 с для CO_2 и до 25 с – для CO одинаковой концентрации, равной ПДК CO , что возможно реализовать в одном лидаре в конкретных экспериментальных условиях [1, 4, 16]. А поэтому, подбирая время измерения, можно увеличить расстояние зондирования концентраций молекул оксидов порядка ПДК для того же варианта лидара комбинационного рассеяния света.

Конфликт интересов

Автор статьи заявляет, что у него нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и ему ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ, проекты № 19-42-230004 и № 19-45-230009.

Список литературы

1. Привалов В. Е., Фотиади А. Э., Шеманин В. Г. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы. СПб.: Лань, 2013. 288 с.
2. Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.3492-17 (с изменениями на 31 мая 2018 года). Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений. 51 с.
3. Privalov V. E., Shemanin V. G. Hydrogen Sulfide Molecules Lidar Sensing in the Atmosphere // Optical Memory and Neural Networks. 2018. V. 27(2). P. 120–131. DOI: 10.3103/S1060992X18020091
4. Privalov V. E., Shemanin V. G. Accuracy of lidar measurements of the concentration of hydrofluoride molecules in the atmospheric boundary layer // Measurement Techniques. 2020. V. 63. No. 7. P. 543–548. DOI 10.1007/s11018-020-01821-0
5. Самохвалов И. В., Копытин Ю. Д., Ипполитов И. И. и др. Лазерное зондирование тропосферы и подстилающей поверхности. Новосибирск: Наука, 1987. 262 с.
6. Зуев В. Е., Зуев В. В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. СПб: Гидрометеоиздат, 1992. 231 с.
7. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Лидарное уравнение с учётом конечной ширины лазерной линии // Известия РАН. Серия Физическая. 2015. Т. 79. № 2. С. 170–180
8. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Учёт ширины линии лазерного излучения в лидарном уравнении для комбинационного рассеяния света // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 9. С. 11–15
9. Глазов Г. Н. Статистические вопросы лидарного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 308 с.
10. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
11. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Параметры лидаров для дистанционного зондирования газовых молекул и аэрозоля в атмосфере. СПб.: Балт. ГТУ, 2001. 56 с.
12. Донченко В. А., Кабанов М. В., Кауль Б. В., Самохвалов И. В. Атмосферная электрооптика. Томск: Изд. НТЛ, 2010. 220 с.
13. Лазерный контроль атмосферы. Под ред. Э. Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. 416 с.
14. Свердлов Л. М., Ковнер М. А., Крайнов Е. П. Колебательные спектры многоатомных молекул. М.: Наука, 1970. 560 с.
15. Справочник по лазерам. Под ред. А. М. Прохорова Т. I. М.: Советское Радио, 1978. 591 с.
16. Dyachenko V. V., Chertiy P. V., Shemanin V. G. Laser Systems for the Pollutants Control in the Oil and Gas Industry // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 272. P. 032003. IOP Publishing doi: 10.1088/1755-1315/272/3/032003.

Raman lidar for probing oxide molecules in the atmosphere

Shemanin V. G.

*Novorossiysk Branch of Belgorod V G Shukhov State Technology University, 353919, Russia,
Novorossiysk, Myskhakskoe shosse 75*

email: shemanin-v-g@nb-bstu.ru

A numerical solution of the lidar equation for measuring the concentration of molecules of nitrogen, sulfur and carbon oxides at the MPC level and above (in the range from $2.6 \cdot 10^{18}$ to $1.1 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$) by a Raman lidar in the atmosphere at a sensing distance of up to 500 m in the mode of synchronous photon counting and selection of the optimal parameters of this lidar variant. It has been shown that when a lidar probes the Raman scattering of light of all studied molecules in the atmosphere using laser radiation at a wavelength of 532 nm, it is possible to register the concentration at the MPC level for sulfur dioxide during a measurement time of 616 s at a sensing distance of up to 500 m, for carbon dioxide and carbon monoxide 21 and 25 s, respectively, at the same distance, for nitrogen dioxide – in the entire range of distances for times up to 50 s, and for nitrogen oxide only for a measurement time of up to 5000 s.

Keywords: Raman lidar, molecule, concentration, sensing distance, laser wavelength

Funding

This work was carried out with partial financial support from the RFBR grants, projects No. 19-42-230004 and No. 19-45-230009.

References

1. Privalov V. E., Fotiadi A. E., Shemanin V. G. Lasers and environmental monitoring of the atmosphere. SPb.: Lan, 2013. 288 p. (in Russian).
2. Hygienic standards HS 2.1.6.3492-17 (as amended on May 31, 2018). Maximum permissible concentration (MPC) of pollutants in the air of urban and rural settlements. 51 p. (in Russian).
3. Privalov V. E., Shemanin V. G. Hydrogen Sulfide Molecules Lidar Sensing in the Atmosphere // Optical Memory and Neural Networks. 2018. V. 27(2). P. 120–131. DOI: 10.3103/S1060992X18020091.
4. Privalov V. E., Shemanin V. G. Accuracy of lidar measurements of the concentration of hydrofluoride molecules in the atmospheric boundary layer // Measurement Techniques. 2020. V. 63. No. 7. P. 543–548. DOI 10.1007/s11018-020-01821-0.
5. Samokhvalov I. V., Kopytin Yu. D., Ippolitov I. I. and others. Laser sounding of the troposphere and underlying surface. Novosibirsk: Nauka, 1987. 262 p. (in Russian).
6. Zuev V. E., Zuev V. V. Remote optical sensing of the atmosphere. SPb: Gidrometeoizdat, 1992. 231 p. (in Russian).
7. Privalov V. E., Shemanin V. G. Lidar equation taking into account the finite width of the laser line // Izvestiya RAN. Seriya Fizicheskaya. 2015. V. 79. N 2. P. 170–180 (in Russian).
8. Privalov V. E., Shemanin V. G. Taking into account the linewidth of laser radiation in the lidar equation for Raman scattering of light // Optical Journal. 2015. V. 82. N 9. P. 11–15 (in Russian).
9. Glazov G. N. Statistical issues of lidar sensing of the atmosphere. Novosibirsk: Nauka, 1987. 308 p. (in Russian).
10. Mezheris R. Laser remote sensing. Moscow: Mir, 1987. 550 p. (in Russian).
11. Privalov V. E., Shemanin V. G. Lidar parameters for remote sensing of gas molecules and aerosols in the atmosphere. SPb.: Balt. GTU, 2001. 56 p. (in Russian).
12. Donchenko V. A., Kabanov M. V., Kaul B. V., Samokhvalov I. V. Atmospheric electrooptics. Tomsk: NTL, 2010. 220 p. (in Russian).
13. Laser control of the atmosphere. Ed. E. D. Hinkli. Moscow: Mir, 1979. 416 p. (in Russian).
14. Sverdlov L. M., Kovner M. A., Kraynov E. P. Vibrational spectra of polyatomic molecules. Moscow: Nauka, 1970. 560 p. (in Russian).
15. Laser Handbook. Ed. A. M. Prokhorov V. I. Moscow: Sovetskoe Radio, 1978. 591 p. (in Russian).
16. Dyachenko V. V., Chertiy P. V., Shemanin V. G. Laser Systems for the Pollutants Control in the Oil and Gas Industry // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 272. P. 032003. IOP Publishing doi: 10.1088/1755-1315/272/3/032003.

ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 535.311, 551.508.77, 621.317.79

ГРНТИ 29.31.29, 37.21.03

ВАК 05.11.07, 05.11.13

Лазерный измеритель интегральных и микроструктурных характеристик атмосферных осадков ОПТИОС

Кальчихин В. В., Кобзев А. А., Тихомиров А. А., * Филатов Д. Е.

*Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения
Российской академии наук*

email: vvk@imces.ru, alexey-kobzev@mail.ru, tikhomirov@imces.ru, * dmitrii.04101995@gmail.com

Представлено описание особенностей измерительной схемы, результаты лабораторных и натуральных испытаний опытного образца лазерного измерителя атмосферных осадков ОПТИОС, в котором использован метод получения и последующего анализа теневых изображений падающих частиц атмосферных осадков. Приведены схемные и программные решения, обеспечивающие автономность работы прибора и снижающие погрешность измерений параметров осадков. Показана эффективность применения ОПТИОС для измерения интегральных и микроструктурных характеристик дождя, снега и града на примере анализа результатов сравнительных натуральных испытаний со стандартным осадкомером О-1 и измерителем осадков челночного типа Davis Rain Collector. Диапазон размеров измеряемых частиц осадков: от 0,5 до 10 мм; чувствительность по количеству выпавших осадков не хуже 0,0001 мм; диапазон измеряемой интенсивности дождя – от 0 до 2000 мм/час; диапазон оцениваемых скоростей падения частиц осадков – от 0,2 до 20 м/с.

Ключевые слова: лазерный измеритель, получение и анализ теневых изображений, атмосферные осадки, интегральные и микроструктурные характеристики

Введение

Информация о количестве выпадающих атмосферных осадков и их интенсивности имеет существенное значение для ряда отраслей экономики, а также для климатических исследований [1]. В некоторых задачах прикладных исследований [2–4] также необходимы данные о микроструктурных характеристиках осадков – размерах, форме и скоростях падения отдельных частиц. Среди средств измерений, предназначенных для определения характеристик атмосферных осадков, наиболее перспективными являются приборы, основанные на оптических методах [5, 6]. Они обеспечивают возможность автоматического получения наиболее полной информации о характеристиках атмосферных осадков: времени начала и продолжительности выпадения, их виде (дождь, снег, град), интенсивности и количестве, а также об их микроструктуре. Кроме того, такие приборы должны легко интегрироваться в состав автоматических метеорологических комплексов для расширения их измерительных возможностей. В статье представлено описание созданного опытного образца лазерного осадкомера ОПТИОС, принцип действия которого основан на получении и последующем анализе теневых изображений отдельных частиц осадков; приведены результаты лабораторных испытаний созданного прибора и натуральных измерений характеристик дождевых и снеговых осадков в сравнении с традиционными осадкомерами.

Получение и анализ теневых изображений падающих частиц

Поскольку традиционные осадкомеры, широко применяемые для метеорологических наблюдений,

не позволяют получать информацию о микроструктурных характеристиках осадков, для определения этих характеристик используются специальные приборы – дисдрометры (disdrometer – *distribution of drop meter*) [5, 6]. Среди оптических дисдрометров выделяется группа приборов [7–9], в основе работы которых лежит метод получения и анализа теневых изображений частиц осадков. Данный метод, предложенный Нолленбергом [10], основан на том, что падающие частицы осадков пересекают световой поток, формируя при этом тень. Многоэлементный приемник оптического излучения регистрирует изменение освещенности отдельных светочувствительных элементов. Обработка и анализ полученных сигналов позволяет восстановить форму частиц, определить их размеры и скорости падения. Высокая точность измерения микроструктурных характеристик осадков обеспечивает возможность вычисления интегральных характеристик жидких осадков – их интенсивности и количества [6]. Подход, основанный на получении функции распределения частиц осадков по эквивалентным диаметрам, обеспечивает определение и других характеристик осадков: концентрации частиц, м^{-3} , водности $\text{г}\cdot\text{м}^{-3}$, удельной энергии, $\text{Дж}\cdot\text{м}^{-2}$, удельного сечения, км^{-1} , радиолокационной отражаемости, $\text{мм}^6\cdot\text{м}^{-3}$, [11].

Следует отметить, что рассмотренный метод, предоставляя информацию о размерах и скоростях падения частиц осадков, позволяет определять вид осадков путем сравнения этих параметров с величинами, характерными для данного вида. Известно, что размеры и скорости падения капель дождя имеют взаимно-однозначное соответствие [11], тогда как размеры снежинок и снежных хлопьев варьируются в широких пределах при скоростях падения до 1,5 м/с. Для идентификации града можно воспользоваться функцией распределения частиц по размерам. Несмотря на довольно большой диапазон возможных размеров градин (от одного до нескольких десятков миллиметров), в большинстве случаев распределение градин по размерам может быть описано одновершинной кривой с максимумом в диапазоне диаметров 5...10 мм [11]. Кроме того, градовые частицы, как правило, имеют существенно большую по сравнению с каплями и снежинками терминальную скорость падения, что также учитывается при определении вида осадков с помощью метода получения и анализа теневых изображений частиц.

Анализ работ [7–10] и собственных разработок двухканального осадкомера [12–14] позволил создать опытный образец одноканального лазерного осадкомера ОПТИОС, схема которого представлена на рис. 1. Для реализации используемого метода плоский горизонтальный световой поток (толщиной ~ 1 мм) от лазерного источника излучения 1, коллимированный с помощью цилиндрической линзы 2, направляется на приемник 5 (линейный оптический сенсор, содержащий 768 светочувствительных элементов размером $63,5\times 63,5$ мкм каждый). При этом формируется измерительная площадка прибора. Размеры последней определяются длиной линейного сенсора и размером открытой части измерительного канала, через которую проходят частицы осадков. Пересекая световой поток от источника излучения, падающие частицы вызывают затенение элементов линейного сенсора.

Высокая частота считывания информации (порядка 20 кГц) о количестве затененных элементов обеспечивает возможность многократного измерения горизонтальных сечений тени каждой падающей частицы по мере ее прохождения через измерительную площадку. Сигнал с выходов линейного сенсора поступает в блок формирования измерительной информации 6, работающий под управлением встроенного микроконтроллера. После предварительной обработки измерительная информация через выходной интерфейс 7 поступает во внешнее обрабатывающее устройство (персональный компьютер – ПК) для дальнейшей обработки, визуализации и хранения. Число измеренных сечений каждой частицы зависит от скорости ее падения, вертикального размера и частоты сканирования линейного сенсора. На основании анализа размеров сечений каждой частицы восстанавливаются её эквивалентный диаметр и высота, форма, скорость падения, содержащийся в ней объём жидкости и другие параметры. Прибор точно определяет количество частиц, прошедших через измерительную площадку в единицу времени, что позволяет оценивать интенсивность осадков любого вида.

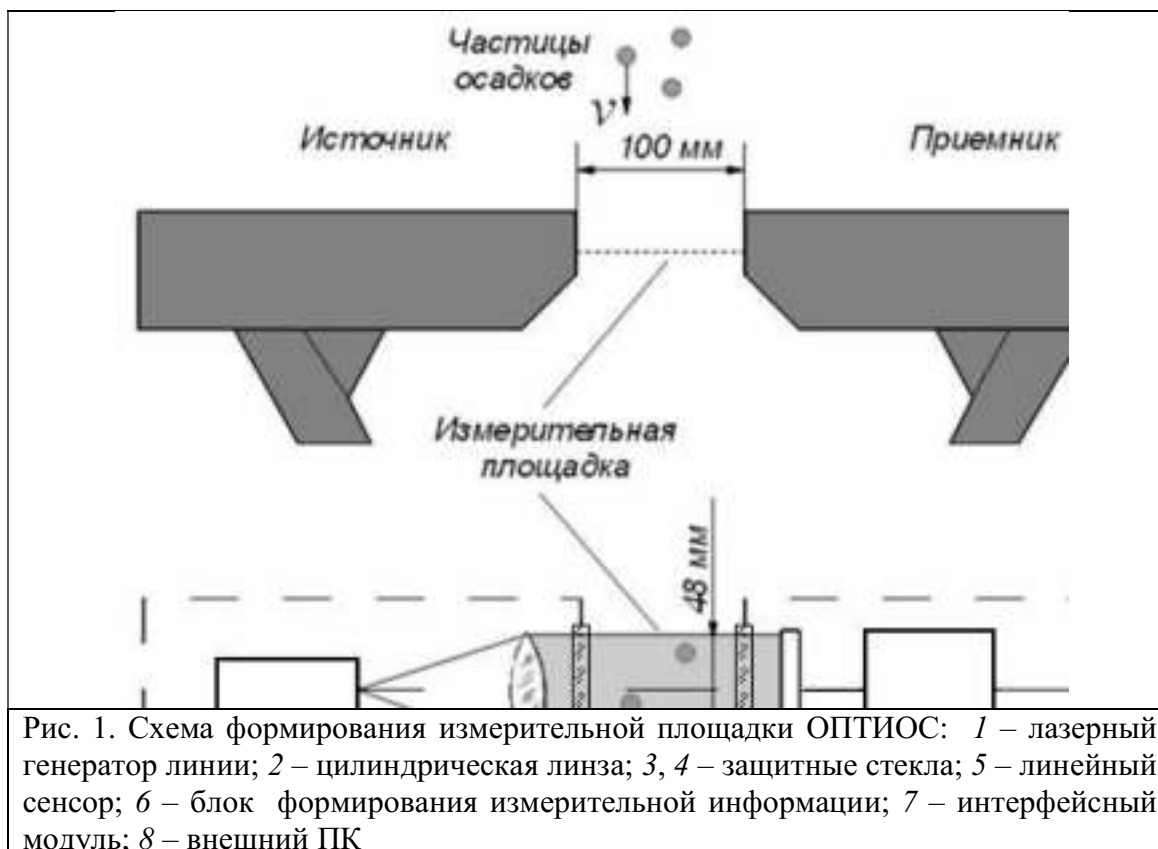


Рис. 1. Схема формирования измерительной площадки ОПТИОС: 1 – лазерный генератор линии; 2 – цилиндрическая линза; 3, 4 – защитные стекла; 5 – линейный сенсор; 6 – блок формирования измерительной информации; 7 – интерфейсный модуль; 8 – внешний ПК

Уменьшение числа измерительных каналов в ОПТИОС с двух до одного позволило в значительной степени упростить систему обработки измеряемых сигналов, процедуру настройки и калибровки, а также повысить надежность работы прибора без существенного снижения точности измерений.

Погрешность измерений, производимых с помощью ОПТИОС, практически не зависит от количества, продолжительности и интенсивности зарегистрированных осадков, а чувствительность по количеству выпавших осадков у него существенно выше, чем у традиционных осадкомеров. Поэтому измерительная площадка такого прибора может иметь меньший размер, чем приемное отверстие стандартного осадкомера. Основными критериями выбора этой величины, определяющими эффективность измерения, являются чувствительность прибора и объем формируемой измерительной информации. Результаты проведенных оценок [13] показали приемлемость выбранного размера площадки – 48 см².

Заметное влияние на точность измерений параметров атмосферных осадков оказывает ветровой недоучет осадков (эффект Джевонса), проявляющийся в том, что при ветре количество собранной традиционным осадкомером влаги оказывается заниженным. Это происходит вследствие увеличения скорости воздушного потока непосредственно над приемным отверстием, поскольку при наличии ветра массивный корпус осадкомера существенно влияет на поток воздуха вблизи него. Оптимальным решением проблемы ветрового недоучета является применение конструкции прибора, обеспечивающей формирование виртуальной измерительной площадки на определенном расстоянии от основных элементов конструкции прибора [13, 14]. Результаты численного моделирования показали [15], что конструкция ОПТИОС и пропорции ее элементов обеспечивают ветровую прозрачность, достаточную для уменьшения погрешности, связанной с ветровым недоучетом.

При эксплуатации прибора может происходить регистрация объектов, не являющихся падающими частицами осадков: брызги осадков, запотевание и изморозь на защитных стеклах, а также насекомые, листья и т.д. Эти помехи приводят к ошибочным результатам, а в некоторых случаях – к сбоям в работе прибора.

Созданная система устранения внешних помех [16], использующая ряд технических и программных решений, обеспечивает повышение автономности работы прибора и увеличение временного интервала между его техническим обслуживанием. Для устранения помех, вызванных погодными явлениями с образованием влаги и ледяного покрытия на поверхности защитных стекол, примене-

на система обогрева. Она включается и отключается автоматически при получении соответствующей информации. Программные решения исключают из анализа объекты, не относящиеся к падающим частицам осадков, путем применения фильтрации. Основными критериями для этого являются размеры объектов и время их нахождения в пределах измерительной площадки [16].

Разработанное программное обеспечение (ПО), кроме фильтрации измерительных данных, обеспечивает решение ряда других задач, направленных на автоматизацию процесса измерений. ПО состоит из двух программ. Первая программа выполняется в блоке формирования измерительной информации ОПТИОС и осуществляет преобразование сигналов с выходов линейного сенсора в измерительную информацию, первичную фильтрацию данных и их передачу в выходной интерфейс. Вторая программа работает на ПК и осуществляет обработку, корректировку и фильтрацию данных, вычисление параметров отдельных частиц (диаметр, объем, скорость), расчет интегральных характеристик осадков на основе разработанных алгоритмов, визуализацию, а также выдачу измерительной информации и формирование файлов данных.

Калибровка и лабораторные испытания ОПТИОС

Важным этапом создания любого средства измерения является установление зависимости между его показаниями и реальным значением измеряемой физической величины. Калибровка ОПТИОС заключалась в проведении процедуры получения значений поправочных коэффициентов, которые вводились в алгоритм расчета суммарного объема жидкости, прошедшей через измерительную площадку.

На первом этапе проведения лабораторных испытаний ОПТИОС [17] измерялись диаметры падающих калиброванных стальных шаров (приборных подшипников), выполненных с высокой точностью, в диапазоне диаметров 1...7 мм. Определение зависимости измеренного размера от местоположения шара в пределах измерительной площадки осуществлялось посредством сравнения измеренных и реальных диаметров шаров. Было выявлено, что погрешность измерения зависит от местоположения шара в поперечном сечении площадки и что существенный вклад в эту погрешность вносится несовершенством оптической системы прибора. Предложенная методика калибровки [17] позволила определить значения поправочных коэффициентов, применение которых обеспечивает относительную однородность результатов измерения диаметров эталонных шаров в разных местах поперечного сечения измерительной площадки. Использование такой процедуры позволяет достичь погрешности измерения размеров частиц, не превышающей 0,1 мм. В дальнейшем была предложена процедура калибровки, усовершенствованная за счет использования вместо шаров непрозрачного стержня, который в вертикальном положении вносится в измерительную площадку и перемещается в горизонтальной плоскости перпендикулярно к направлению светового потока, при этом значения поправочных коэффициентов рассчитываются автоматически с помощью специально разработанного алгоритма [18].

Кроме того, была оценена погрешность определения количества осадков путем измерения суммарных объемов серий капель, выпускаемых из шприца объемом 1 мл и проходящих через измерительную площадку [17]. Капли, получаемые непосредственно над измерительной плоскостью, имели форму, близкую к шарообразной, поэтому их объем достаточно точно вычислялся по формуле для объема шара. Погрешность измерения суммарного объема всех капель рассчитывалась с учетом абсолютной погрешности первоначального объема шприца. На основании анализа полученных результатов обработки данных, установлено, что погрешность измерения объема выпускаемой жидкости в лабораторных условиях не превышала 5 %.

Таким образом, проведенные лабораторные испытания ОПТИОС позволили уточнить систематические погрешности опытного образца прибора и ввести соответствующие поправочные коэффициенты в программу обработки результатов измерений.

По результатам расчетов и испытаний получены следующие технические характеристики ОПТИОС: диапазон размеров регистрируемых частиц 0,5...10 мм; погрешность измерения размеров (D , мм) частиц не более $0,033(10 + D)$; диапазон оцениваемых скоростей падения гидрометеоров 0,2...20 м/с; погрешность измерения количества осадков (без учета пространственных вариаций и погрешности, создаваемой ветром) – не более 5 %; диапазон измеряемой интенсивности дождя 0...2000 мм/ч; чувствительность по количеству выпавших осадков - не хуже 0,0001 мм; измери-

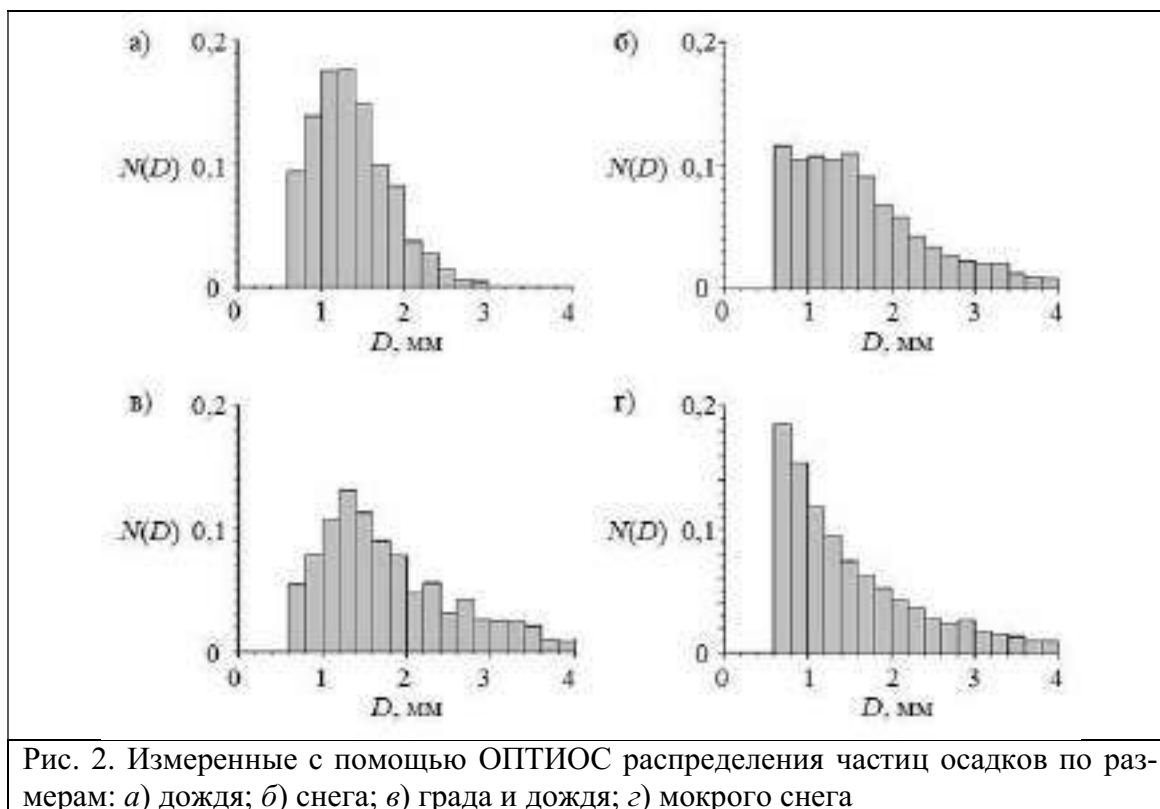
тельная площадка – 48 см²; масса прибора 8 кг; потребляемая мощность (без системы обогрева) – 0,5 Вт; рабочий диапазон температур от –20 до +60 °С; регистрация дождя, снега, града и смешанных осадков.

Некоторые результаты натуральных испытаний

Натурные испытания опытного образца ОПТИОС выполнялись в течение летне-осеннего сезона 2016 г. на метеорологической площадке ИМКЭС СО РАН (восточная окраина г. Томска). В летний период проводились также сравнительные испытания ОПТИОС со стандартным осадкомером О-1 (с ветровой защитой Третьякова) и челночным осадкомером Davis Rain Collector (RC). Все три прибора были установлены в непосредственной близости друг относительно друга (2...3 м), чтобы уменьшить погрешность, связанную с пространственными вариациями распределения осадков.

Ниже представлены наиболее характерные результаты измерений микроструктурных характеристик (распределение частиц по размерам $N(D)$) осадков различных видов, полученные в летне-осенний период 2016 г. и показывающие возможности ОПТИОС. Рис. 2а иллюстрирует распределение $N(D)$ капель ливневого дождя, выпавшего 15 июня в период 18:45-19:20 местного времени, когда было зарегистрировано 6612 капель, прошедших через измерительную площадку прибора. Среднее значение интенсивности дождя составляло 20 мм/ч при максимальной интенсивности порядка 50 мм/ч. Данное распределение описывается одновершинной кривой с максимумом в области размера частиц 1...1,5 мм.

На рис. 2б показано распределение $N(D)$ для снега, выпавшего 11 октября 2016 г. в период 17:10-19:16 (3637 снежинок). Особенностью данного распределения является большое количество снежных частиц в области до 2 мм. Более подробно результаты измерения характеристик снеговых осадков с помощью ОПТИОС описаны в [19].



На рис. 2в представлено распределение $N(D)$ при осадках в виде дождя, сопровождающегося градом. Данные получены 9 июля 2016 г. в период 18:49-18:52 (зарегистрировано 1267 частиц). Кривая распределения частиц сохранила форму, характерную для крупных капель дождя с максимумом в области 1,5 мм, при этом она имеет пологое продолжение в область более крупных частиц и не ограничивается диапазоном размеров частиц жидких осадков. Таким образом, ОПТИОС успешно регистрирует осадки, выпадающие в виде града, что хорошо согласуется с оценками, вы-

полненными ранее [20].

На рис. 2г представлено распределение $N(D)$ для явления (так называемого мокрого снега), которое считается наиболее сложным для автоматического распознавания. Этот вид осадков наблюдается при положительной и близкой к нулевой температуре окружающего воздуха и характеризуется одновременным выпадением снежинок и капель дождя. Результаты получены 10 октября 2016 г. в период 10:00-12:10 (11534 частицы). Гистограмма представляет собой типичное экспоненциальное распределение с большим количеством мелких частиц и относительно малым – крупных. Распределение $N(D)$ для мокрого снега трудноотлично от некоторых случаев выпадения ледяных кристаллов и снежных хлопьев. Для повышения достоверности определения вида выпадающих атмосферных осадков необходимо учитывать скорость падения частиц и температуру воздуха. Подробно вопросы, касающиеся оценки скоростей падения частиц осадков рассмотрены в [21].

Пример сравнительного синхронного измерения интенсивности осадков I с помощью осадкомеров ОПТИОС и РС представлен на рис. 3. Результаты получены 15 июня 2016 г. в период 18:45-19:20. Видно, что временная динамика I у измерителей показывает хорошее совпадение. Отклонение значений, полученных ОПТИОС и РС в различных временных интервалах, может быть объяснено меньшим разрешением челночного осадкомера по количеству осадков (0,22 мм), что не позволяет производить с помощью РС точные измерения интенсивности осадков. Поэтому результаты измерений значений I для РС и ОПТИОС могут различаться на 25 процентов и более, в зависимости от выбранного временного интервала. Некоторое несовпадение моментов резкого изменения значений I объясняется особенностями алгоритмов осреднения данных, получаемых ОПТИОС, что может приводить к временному сдвигу результатов измерения на величину порядка 10 с.

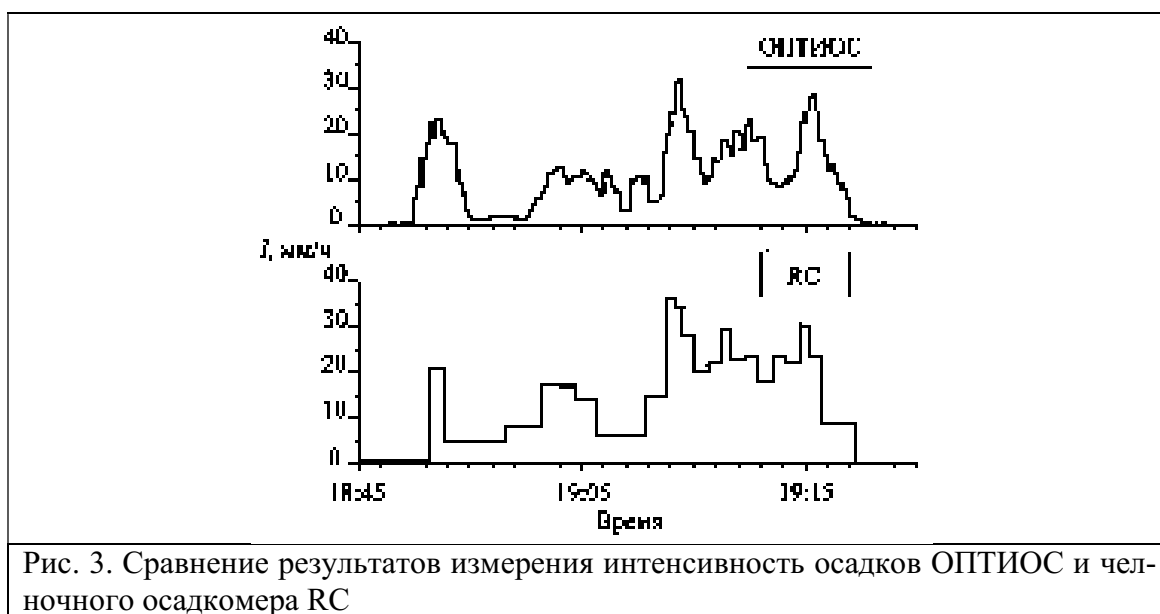
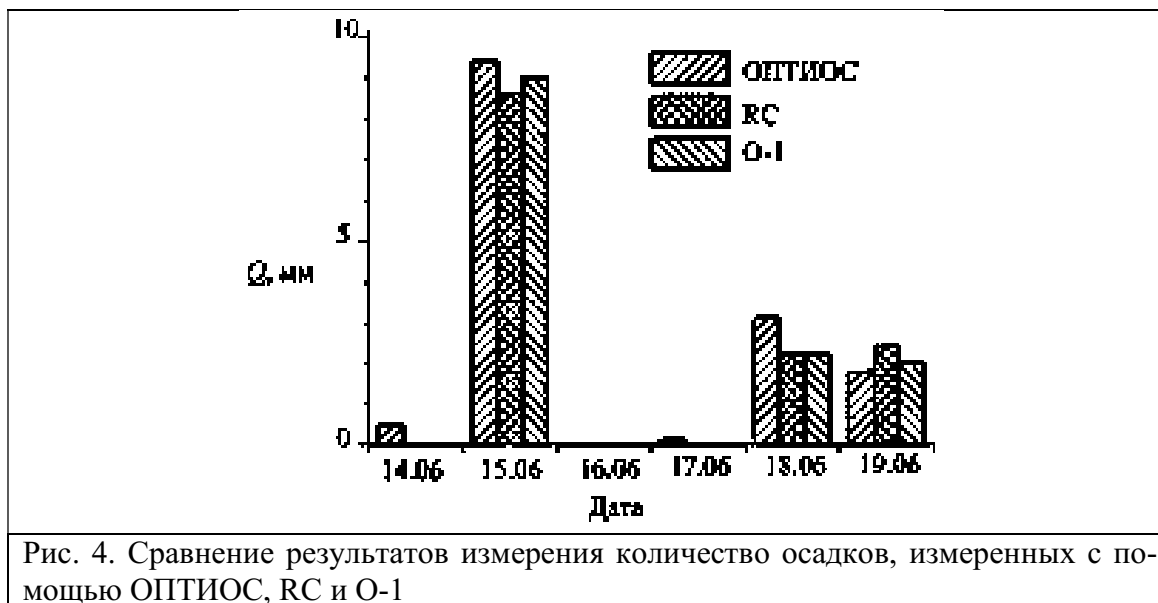


Рис. 3. Сравнение результатов измерения интенсивность осадков ОПТИОС и челночного осадкомера РС

Проведено также синхронное измерение количества собранных за сутки осадков Q с помощью ОПТИОС, РС и О-1 (рис. 4). Показания О-1 снимались 2 раза в сутки (10:00 и 19:00 местного времени), показания РС и ОПТИОС снимались автоматически при регистрации выпадения осадков. За начало измерений в каждых сутках выбрано время 10:00.

Данные измерений ОПТИОС в целом хорошо согласуются с данными РС и О-1. Анализ данных измерений за 14 июня показал, что за эти сутки осадкомеры РС и О-1 не зарегистрировали осадков. В то же время количество выпавших осадков по данным ОПТИОС составило величину порядка 0,5 мм, что превышает заявленный порог чувствительности стандартных приборов. Возможно, такое малое количество осадков не было зафиксировано из-за погрешностей, связанных со смачиванием и испарением жидкости, поскольку 14 июня температура воздуха установилась в области 25 °С. С помощью ОПТИОС были зарегистрированы также совсем незначительные осадки 17 июня. За весь выбранный период количество измеренных осадкомером ОПТИОС осадков составило 14,46 мм, челночным осадкомером РС – 13,86 мм, а стандартным О-1 с ветровой защитой Третьякова – 13,2 мм.



Измеритель ОПТИОС (под названием блок измерения осадков) был включен в состав экспериментального образца автоматической метеостанции АрктикМетео, которая предназначена для работы на удаленных и труднодоступных территориях со сложными климатическими условиями [22]. Некоторые результаты измерений метеорологических величин, в т. ч, интенсивности жидких осадков, выполненных с помощью этой метеостанции, проведенные в 2020 г. представлены в [23].

Заключение

Разработанный опытный образец ОПТИОС обеспечивает выполнение долговременных автоматических измерений микроструктурных и интегральных характеристик атмосферных осадков, которые необходимы для решения различных научных и прикладных задач. Применение новых алгоритмов существенно упрощает процедуру калибровки прибора и создает возможность ее автоматизации.

Анализ результатов сравнительных натурных испытаний ОПТИОС совместно с традиционными измерителями О-1 и РС показал их достаточно хорошее совпадение. Полученная погрешность измерения количества жидких осадков, не превышающая 10 % по сравнению со стандартными приборами, и совпадение хода измеренной интенсивности выпадения дождя показывают, что разработанный подход обеспечивает минимизацию случайных ошибок измерений. Вместе с тем, принципиальные различия в применяемых методах измерения не дают возможности для корректного сравнения целого ряда измеряемых параметров (например, для снеговых осадков), что требует применения дополнительных средств измерения.

Проверена работоспособность ОПТИОС в составе автоматизированной метеорологической станции.

Созданный лазерный измеритель типа атмосферных осадков, а также их микрофизических и интегральных характеристик может представлять интерес в качестве замены дорогостоящих импортных аналогов при решении научных и прикладных задач.

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Список литературы

1. Безрукова Н.А., Чернокульский А.В. Российские исследования облаков и осадков в 2011-2014 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 5. С. 577–589. doi: 10.7868/S0002351516050023.
2. Воеводина Л.А. Структура почвы и факторы, изменяющие ее при орошении // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2016. № 1 (21). С. 134–154.
3. Киселев В.Н., Кузенов А.Д. Методы зондирования окружающей среды (атмосферы). СПб.: Изд-во РГГМУ, 2004. 429 с.
4. Pustovalov K.N., Kobzev A.A., Nagorskiy P.M. Study of atmospheric surface layer electrical processes in case of varying intensity rain // Proc. SPIE. 2015 V. 9680. P. 96806L-1. doi: 10.1117/12.2205719.
5. Michaelides S.C. Precipitation: Advances in Measurement, Estimation and Prediction. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg. 2008. 552 p.
6. Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. Приборное обеспечение измерения параметров атмосферных осадков. Современное состояние // Изв. вузов. Физика. 2009. № 12. С. 92 (деп. в ВИНТИ 16.12.09, № 802-B2009).
7. Солдаткин Н.П. Оптические приборы и методы контроля микрофизических параметров атмосферных осадков // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений. Томск: ИОА СО РАН. 1997. С. 217–232.
8. Barthazy E., Goke S., Schefold R., Hognl D. An Optical Array Instrument for Shape and Fall Velocity Measurements of Hydrometeors // J. Atmos. Oceanic Technol. 2004. V. 21. P. 1400–1416.
9. Schönhuber M., Lammer G., Randeu W.L. Ch. 1. The 2D-Video-Disdrometer // Precipitation: Advances in Measurement, Estimation and Prediction / Ed. by Silas Michaelides. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008, p. 3–32.
10. Knollenberg R. G. The optical array and alternative to scattering or extinction for airborne particle size determination // J. Appl. Meteor. 1970. V. 9. No. 2. P. 86–103.
11. Литвинов И.В. Структура атмосферных осадков. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 154 с.
12. Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. Оптико-электронный двухканальный измеритель осадков // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 11. С. 990–996.
13. Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. К выбору размеров измерительной площади двухканального оптического осадкомера // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 2. С. 155–159.
14. Азбукин А.А., Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. Оптико-электронный блок измерения параметров осадков // ПТЭ. 2013. № 4. С. 140–141. doi: 10.7868/S0032816213040186.
15. Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Тельминов А.Е. Решение проблемы ветрового недоучета с помощью оптического осадкомера // Высокие технологии в современной науке и технике: сб. научн. тр. II Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием. (г. Томск, 27-29 марта 2013 г.). Томск, ТПУ. 2013. Т. 1. С. 328–332.
16. Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Краснолобов И.М., Тихомиров А.А. Система устранения внешних естественных помех в измерительном канале оптического осадкомера // Доклады ТУСУР. 2016. Т. 19. № 2. С. 45–47. doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-2-35-37.
17. Azbukin A.A., Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Korolkov V.A., Tikhomirov A.A. Determination of Calibration Parameters of an Optoelectronic Precipitation Gauge // Atmospheric and Oceanic Optics. 2014. V. 27. No. 5. P. 432–437. doi: 10.1134/S1024856014050066.
18. Пат. 2617033 РФ. МПК G 01 W 1/14. Способ калибровки оптического измерителя осадков / А.А. Азбукин, В.В. Кальчихин, А.А. Кобзев, В.А. Корольков, А.А. Тихомиров; заявитель и патентообладатель ИМКЭС СО РАН и ООО «Сибаналитприбор». Заявл. 09.03.2016; опубл. 19.04.2017. Бюл. № 11.
19. Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Korolkov V.A., Tikhomirov A.A. Measurement of snow characteristics using optical precipitation gauge // Proc. SPIE. 2016. V. 10035. P. 100352W-1. doi: 10.1117/12.2243139.
20. Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Korolkov V.A., Tikhomirov A.A. Specifics of the hail parameter measurements using the optical precipitation gauge // Proc. SPIE. 2015. V. 9680. P. 968038-1; doi 10.1117/12.2205285.

21. Kal'chikhin V.V., Kobzev A.A., Korol'kov V.A., Tikhomirov A.A. Determination of the Rate of Fall of Rain Drops in Measurements of Their Parameters by an Optical Rain Gauge // *Measurement Techniques*. 2017. V. 59. No. 11. P. 1175–1180. doi: 10.1007/s11018-017-1111-9.
22. Korolkov V.A., Bogushevich A.Ya., Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Kurakov S.A., Pustovalov K.N., Telminov A.E., Tikhomirov A.A., Petrov D.V.. Experimental prototype of automatic weather station ArcticMeteo // *Proc. of SPIE*. 2020. V. 11560. P. 1156058. doi: 10.1117/12.2575822.
23. Korolkov V.A., Kobzev A.A., Tikhomirov A.A., Telminov A.E., Pustovalov K.N., Bogushevich A.Ya., Kalchikhin V.V. and Kurakov S.A. Automatic weather station ArcticMeteo – the first field test results // *ENVIROMIS2020 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020. V. 611 P. 012053. doi: 10.1088/1755-1315/611/1/012053.

Laser Meter for Integral and Microstructural Characteristics of Atmospheric Precipitation OPTIOS

Kalchikhin V. V., Kobzev A. A., Tikhomirov A. A., Filatov D. E.*

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
10/3, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634055, Russia

email: vvk@imces.ru, alexey-kobzev@mail.ru, tikhomirov@imces.ru, dmi-trii.04101995@gmail.com*

A description of the measuring scheme features, the results of laboratory and field tests of the prototype of atmospheric precipitation laser meter OPTIOS based on the method of obtaining and analyzing of shadow images of falling precipitation particles are presented. Schematic and software solutions are presented that ensure the autonomy of the device and reduce the error in measuring precipitation parameters. The efficiency of using OPTIOS for measuring the integral and microstructural characteristics of rain, snow and hail is shown on the example of analyzing the results of comparative field tests with a standard O-1 rain gauge and a tipping-bucket rain gauge Davis Rain Collector. Size range of measured precipitation particles – from 0.5 to 10 mm, sensitivity to the amount of precipitation – not worse than 0.0001 mm, range of measured rain intensity – from 0 to 2000 mm/h, particle fall velocity range of – from 0.2 to 20 m/s.

Keywords: laser meter, obtaining and analyzing of shadow images, atmospheric precipitation, integral and microstructural characteristics

References

1. Bezrukova N.A., Chernokulsky A.V. Russian studies on clouds and precipitation in in 2011-2014 // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. V. 52. No 5. P. 512–523.
2. Voevodina L.A. Soil structure and the factors changing it irrigation // *Russian Research Institute of Land Improvement Problems*. 2016. No 1 (21). P. 134–154 (in Russian).
3. Kiselev V.N., Kuznetzova A.D. Sounding methods of the environment (of the atmosphere). A textbook. St. Petersburg Publishers. 2004. 429 p. (in Russian).
4. Pustovalov K.N., Kobzev A.A., Nagorskiy P.M. Study of atmospheric surface layer electrical processes in case of varying intensity rain // *Proc. SPIE*. 2015 V. 9680. P. 96806L-1.
5. Michaelides S.C. *Precipitation: Advances in Measurement, Estimation and Prediction*. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg. 2008. 552 p.
6. Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Korolkov V.A., Tikhomirov A.A. Instrumentation for measurement of the parameters of atmospheric precipitation. Current state // *Russian Physics Journal*. 2009. V. 52. No 12. P. 92 (dep. In VINITI. 16.12.09, № 802-B2009) (in Russian).

7. Soldatkin N.P. Optical devices and control methods of precipitation microphysical characteristics // Regional atmospheric monitoring. Part 2. New devices and methods' measurements. Tomsk. IAO SB RAS. 1997. P. 217–232 (in Russian).
8. Barthazy E., Goke S., Schefold R., Hognl D. An Optical Array Instrument for Shape and Fall Velocity Measurements of Hydrometeors // J. Atmos. Oceanic Technol. 2004. V. 21. P. 1400–1416.
9. Schönhuber M., Lammer G., Randeu W.L. Ch. 1. The 2D-Video-Disdrometer // Precipitation: Advances in Measurement, Estimation and Prediction / Ed. by Silas Michaelides. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008, p. 3–32.
10. Knollenberg R. G. The optical array and alternative to scattering or extinction for airborne particle size determination // J. Appl. Meteor. 1970. V. 9. No. 2. P. 86–103.
11. Litvinov I.V. Atmospheric precipitation structure. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1974. 154 p. (in Russian).
12. Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Korolkov V.A., Tikhomirov A.A. Optoelectronic dual-channel precipitation gauge // Opt. Atm. Okeana. 2011. V. 24. No 11. P. 990–996 (in Russian).
13. Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Korolkov V.A., Tikhomirov A.A. On the choice of the measuring area for dual-channel optical rain gauge // Opt. Atm. Okeana. 2013. V. 26. No 2. P. 155–159 (in Russian).
14. Azbukin A.A., Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Korolkov V.A., Tikhomirov A.A. Optoelectronic unit for precipitation measurement // Prib. Tech. Exp. 2013. No 4. P. 140–141 (in Russian).
15. Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Telminov A.E. The solution to the problem of underestimation of the wind through optical rain gauge // Vy`sokie tekhnologii v sovremennoi` nauke i tekhnike: sb. nauchn. tr. II Vseros. nauch.-tekhn. konf. molody`kh ucheny`kh, aspirantov i studentov s mezhdunarodny`m uchastiem. (g. Tomsk, 27-29 marta 2013 g.). Tomsk, TPU. 2013. V. 1. P. 328–332 (in Russian).
16. Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Krasnolobov I.M. Краснолобов И.М., Тихомиров А.А. System for elimination of external natural noise in the measuring channel of the optical precipitation gauge // Doctady` TUSUR. 2016. V. 19. No 2. P. 45–47 (in Russian).
17. Azbukin A.A., Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Korolkov V.A., Tikhomirov A.A. Determination of Calibration Parameters of an Optoelectronic Precipitation Gage // Atmospheric and Oceanic Optics. 2014. V. 27. No 5. P. 432–437.
18. Pat. 2617033 RF. MPK G 01 W 1/14. Method of calibration of the optical precipitation gauge / A.A. Azbukin, V.V. Kal`chihin, A.A. Kobzev, V.A. Korol`kov, A.A. Tihomirov; zaiavitel` i patentoobladatel` IMKE`S SO RAN i OOO «Sibanalitpribor». Zaiavl. 09.03.2016; opubl. 19.04.2017. Biul. № 11. [in Russian].
19. Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Korolkov V.A., Tikhomirov A.A. Measurement of snow characteristics using optical precipitation gauge // Proc. SPIE. 2016. V. 10035. P. 100352W-1.
20. Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Korolkov V.A., Tikhomirov A.A. Specifics of the hail parameter measurements using the optical precipitation gauge // Proc. SPIE. 2015. V. 9680.
21. Kal`chikhin V.V., Kobzev A.A., Korol`kov V.A., Tikhomirov A.A. Determination of the Rate of Fall of Rain Drops in Measurements of Their Parameters by an Optical Rain Gauge // Measurement Techniques. 2017. V. 59. No. 11. P. 1175–1180.
22. Korolkov V.A., Bogushevich A.Ya., Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Kurakov S.A., Pustovalov K.N., Telminov A.E., Tikhomirov A.A., Petrov D.V.. Experimental prototype of automatic weather station ArcticMeteo // Proc. of SPIE. 2020. V. 11560. P. 1156058.
23. Korolkov V.A., Kobzev A.A., Tikhomirov A.A., Telminov A.E., Pustovalov K.N., Bogushevich A.Ya., Kalchikhin V.V. and Kurakov S.A. Automatic weather station ArcticMeteo – the first field test results // ENVIROMIS2020 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 611 P. 012053.

ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 535.3
ГРНТИ 29.33
ВАК 01.04.21

Исследование влияния воздушного переноса на состояние окружающей среды лазерными методами

* Дьяченко В. В., Веденин Е. И.

Новороссийский политехнический институт (филиал) Кубанского государственного технологического университета, 353900, Россия, Новороссийск, ул. Карла Маркса 20

* email: v-v-d@mail.ru

В статье произведена оценка механизмов формирования и распространения загрязнения воздушным путем. Рассмотрены лазерные методы реализации Федерального закона «Об охране атмосферного воздуха» и Постановления Правительства РФ от 13.03.2019 (№ 262 и № 263) об оснащении стационарных источников автоматическими средствами измерения и передачи информации о выбросах загрязняющих веществ в Госреестр. Обосновано решение поставленных задач лазерными технологиями и созданными на основе их использования приборами – лидарами. Разнообразие источников лазерного излучения и схемы их применения, позволяет построить систему под самые различные условия, объекты, химические соединения, аэрозоли или сделать многофункциональный лидар, использующий несколько длин волн, что позволяет одновременно определять несколько загрязняющих веществ и микрофизические параметры аэрозолей (концентрацию, размер, форму частиц).

Ключевые слова: лазерные методы, загрязнение, дисперсный состав, аэрозоли, метод модифицированной спектральной прозрачности, лидар

Введение: общие требования

Эмиссия загрязняющих веществ в атмосферу является основным фактором глобального загрязнения окружающей среды. Безусловно, в районах концентрации предприятий, при разнообразных факторах влияния на окружающую среду (через сбросы в водные объекты, загрязнение почв, илов, организацию свалок и т. д.) уровень импактного загрязнения выше, но именно воздушный перенос делает его наиболее опасным, широкомасштабным и всепроникающим.

По данным Лисицына [1] обломки размером 0,1...0,01 мм могут переноситься на сотни и тысячи км, а частицы величиной 1...10 мкм до 10 000 км. Масштабы аэрального загрязнения таковы, что оно приводит к загрязнению почв, формированию аномалий [2] и повышению кларков многих химических элементов. Существует масса примеров иллюстрирующих это положение, как в мире, так и на юге РФ [3, 4]. Химический и дисперсный состав загрязнения зависят от его источника. Например, на юге России (ввиду высокой доли распаханной земель – более 70 %) на 95 % определяется дефляцией почв, в районе Новороссийска – деятельностью цементных заводов и перегрузкой нефтепродуктов и т. д. В наиболее индустриально нагруженных районах в атмосфере доминируют выбросы теплоэлектростанций и производства строительных материалов. Долговременный характер выпадения частиц и различных химических соединений из атмосферы приводит к повышению заболеваемости населения, изменению химического и гранулометрического состава почв, а также деградации биогеоценозов [4–7].

Механизм и источники аэрального загрязнения

В части загрязнения ландшафтов микроэлементами основную роль играют аэрозоли. На большей части территории доля техногенного аэрозоля в атмосфере меньше природного, но техногенный, по химическому составу значительно разнообразней и может быть опасен для биосферы. С точки зрения аэрозольного загрязнения очень важен дисперсный состав его частиц. Тонкодисперсные аэрозольные частицы являются носителями рассеянных элементов, как изначально, так и сорбируя на своей поверхности химические элементы, находящиеся в рассеянном виде, парогазовой форме. Концентрация одних, особенно велика во фракции менее 0,5 мкм (например, Zn, Cu, Pb и др.), другие элементы (Al, Fe, Sc, Ba, La, Y и др.) концентрируются в относительно крупных частицах [8]. В среднем 80...90 % тяжелых металлов в аэрозолях содержатся в тонкой фракции, с размером частиц менее 1 мкм [9]. Таким образом, от размера частиц аэрозоля зависит не только дальность переноса, «время жизни аэрозолей» [8], но и их геохимическая специфика.

Выявление путей и источников формирования аэрозолей поможет защитить окружающую среду и человека от крайне опасного вида и способа доставки загрязнения в организм людей. Недаром были введены новые экологические нормативы по содержанию в воздухе частиц различного размера – PM10, PM2,5, а сейчас готовятся нормативы PM1,0.

Точные объемы природного и техногенного аэрозоля в атмосфере не известны [8]. К тому же сведения о масштабах эмиссии загрязняющих веществ в атмосферу опираются на обобщение статистических материалов, предоставленных самими предприятиями и определенных расчетным путем. Все это вызывает необходимость определения реальных объемов загрязнения атмосферы, ее состояния над конкретными объектами и районами, изучения геохимии и масштабов массопереноса в атмосферном пограничном слое (АПС), разработки передовых интеллектуальных технологий и лазерных роботизированных систем, позволяющих вести непрерывный мониторинг технологических процессов и состояния окружающей среды. На это направлено постановления Правительства РФ № 262 и № 263 от 13.03.2019 об оснащении предприятий-объектов неблагоприятного воздействия на окружающую среду первой категории (НВОС) автоматическими системами непрерывного контроля выбросов (СНКВ) и передачи информации в государственный реестр.

Определение особенностей атмосферного переноса, геохимической специфики различных по составу и дисперсности аэрозолей поможет определить и генезис многих зон повышенной концентрации химических элементов в окружающей среде. Дело в том, что в районах подверженных техногенному воздействию, при общем увеличении загрязнения, количество пыли выше, чем растворенных компонентов.

Таким образом, кроме задачи оценки глобального, трансграничного массопереноса возникает задача оценки региональных, бассейновых, локальных особенностей для индикации техногенного геохимического воздействия, определения фоновых показателей состояния атмосферы источников сверхнормативного, аварийного загрязнения. Анализ работ, выполненных в этой области [10–12], свидетельствует о высокой пространственно-временной вариабельности и трудоемкости определения параметров аэрозолей, что затрудняет исследование и интерпретацию результатов с помощью традиционных ловушек и методов выделения аэрозолей из растворов или фильтров. На юге России использование данных методов затруднено ограниченностью периода снежного покрова и интенсивной ветровой эрозией. Использование в этих целях методов лазерного дистанционного зондирования позволит оперативно сформировать обширную массу фактического материала для оценки фоновых и аномальных особенностей, а также установить региональные источники аэрозолей в различное время суток и года, с учетом не только концентрации, но и дисперсности аэрозоля.

Поэтому целью настоящей работы является обоснование системы лазерного зондирования аэрозольных потоков, которая позволит измерять распределение концентрации частиц по высоте в режиме реального времени с одновременным определением скорости переноса и дисперсности. Это требует экспериментального исследования обработки сигналов аэрозольного лидара для заданного уровня концентрации частиц и их распределения по размерам [13–15].

Лазерные технологии автоматических средств измерения и передачи информации о выбросах загрязняющих веществ в Госреестр

До окончания времени, отведенного предприятиям на их выполнение упомянутых постановлений правительства осталась пара лет, а реальных надежных технологий, с хорошим метрологическим обеспечением, невысокой стоимостью и низкими эксплуатационными затратами, во многих отраслях практически нет. Вторая проблема – необходимость внешнего контроля выбросов предприятий и деятельности оборудования производящего их учет, на основе которого определяется экологический ущерб и плата за негативное воздействие на окружающую среду.

Было бы наивным полагать, что все предприятия будут добровольно и объективно отражать негативные с природоохранной точки зрения особенности их работы, происшествия, аварии на производстве, сопровождающиеся сверхнормативными выбросами, загрязнением или не захотят «оптимизировать» систему учета выбросов для снижения платы за негативное воздействие на окружающую среду (или, чтобы уложиться в нормативные ПДВ). Поэтому, кроме стационарного оборудования, располагающегося непосредственно на источнике эмиссии (в газоходе, на срезе трубы и т. д.) природоохранным органам необходимы мобильные компактные, переносные приборы для дистанционного мониторинга выбросов, позволяющие произвести замеры в любой момент без уведомления предприятия, а иногда и без необходимости работы на его территории.

Это очень важно в случае с особо опасными производствами, или объектами со строгой пропускной системой. Ведь получение разрешения на посещение предприятия, согласования могут занять много времени в течение которого ситуация может существенно измениться и актуальность замеров исчезнет. Это очень полезно и для развития муниципального экологического контроля. Поскольку в соответствии с законом об охране окружающей среды муниципальные экологи не имеют доступа на предприятия и могут лишь просить их руководство о предоставлении соответствующей информации. А ведь именно они ответственны (а с другой стороны совершенно бесправны) перед населением за безопасность жизнедеятельности. В связи с этим нами неоднократно [16, 17] предлагалось ввести в законодательство норму по которой, предприятия, ответственные за масштабное загрязнение окружающей среды, вместо увещаний населения и властей, что у них все в порядке, должны предоставить администрации населенного пункта оборудование, позволяющее производить независимый контроль профильного загрязнения и вести его непрерывный мониторинг, сделав доступными результаты (например, через Интернет).

И, здесь очень важно, что компактные аппараты для дистанционного мониторинга требуемых параметров, основанные на лазерах, могут использовать ту же технологию, что и стационарные на предприятии. Это существенно улучшает сходимость результатов замеров, упрощает метрологическое обеспечение и повышает достоверность выводов.

Следующий довод в пользу лазерных технологий состоит в том, что выбросы предприятий в атмосферу чаще включают несколько химических соединений. Да и Постановления Правительства РФ направлены на контроль не одного агента загрязнения. Это взвешенные вещества, серы диоксид, оксиды азота (сумма азота оксида и азота диоксида), углерода оксид, фтористый водород, хлористый водород, сероводород, аммиак. Для создания традиционных приборов, способных контролировать одновременно несколько веществ нужны несколько разных газоанализаторов, зачастую основанных на различных физических принципах и имеющих свои особенности размещения, эксплуатации, обслуживания. А использование лазерных технологий лишено этих недостатков. В зависимости от контролируемого набора веществ нужно просто смонтировать в одной установке несколько лазеров с различной длиной волны излучения.

Как отмечено выше определение микрофизических параметров аэрозолей осуществляется благодаря одновременному использованию в лидаре не менее трех длин волн. Такой вариант лидара можно создать, используя рассеяние Ми частицами аэрозоля, в которых рассеянное назад излучение собирается приемным телескопом и через спектроанализатор подается на фотоприемник для регистрации сигнала [12] и далее, передается в персональный компьютер (ПК) для обработки и интерпретации данных. Рассмотрим один из вариантов применения лидаров.

Лидар дифференциального ослабления и рассеяния для контроля аэрозольного загрязнения воздуха

Дисперсный состав взвешенных частиц является одним из основных параметров аэрозольных потоков, контроль которых позволяет оценивать эффективность работы пылегазоочистного оборудования и рассчитывать рассеивание частиц в атмосфере. Дисперсный состав обычно выражается в виде таблицы, кривой или функции распределения аэрозольных частиц по размерам (ФРЧ). ФРЧ представляет из себя функцию распределения массы материала по диаметрам частиц и равна, выраженному в процентах отношению массы всех частиц, диаметр которых меньше определенной величины d , к общей массе пылевидного материала [18].

В случае выражения ФРЧ в виде кривой распределения, по оси абсцисс откладывают значения диаметров частиц d в микрометрах, а на оси ординат процентное содержание частиц, диаметр которых меньше диаметра d . Распределение частиц по размерам лучше всего описывается логарифмически-нормальным законом распределения, которое получается, если откладывать на оси абсцисс логарифмы диаметров частиц. Теоретически применимость логарифмически-нормального распределения к любым твердым частицам, полученным в результате измельчения, доказана в работах [18], а практически подтверждена во многих экспериментальных исследованиях [12, 19] и в случае с частицами на цементном производстве, по нашим данным [15, 18, 20], имеет следующий вид (рис. 1).

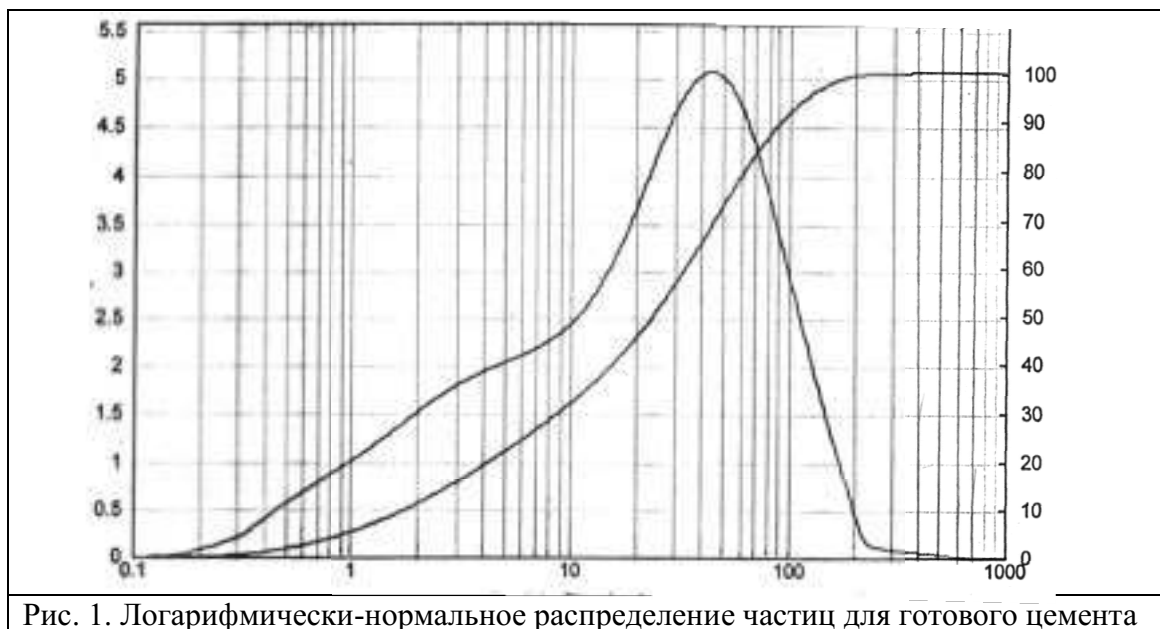


Рис. 1. Логарифмически-нормальное распределение частиц для готового цемента

Однако, проходя несколько технологических ступеней на пути к конечной продукции, ФРЧ клинкера претерпевает существенные трансформации. Для характеристики ФРЧ дисперсных материалов пользуются понятием средний объемно-поверхностный диаметр d_{32} , определяемый формулой из [19]:

$$d_{32} = \frac{\int_0^{\infty} x^3 F(x) dx}{\int_0^{\infty} x^2 F(x) dx}, \quad (1)$$

где x – диаметр части; $F(x)$ – функция распределения частиц по размерам.

При этом коэффициент детерминации между рассчитанными и измеренными функциями превышает 0,74 [18]. Таким образом, ФРЧ является одним из основных параметров, контроль которого позволяет оценивать дисперсный состав аэрозоля в промышленных плотных потоках или в АПС.

Средний объемно-поверхностный диаметр аэрозольных частиц в потоке определяется путем измерения оптической плотности исследуемого аэрозоля на нескольких длинах волн и вычисления усредненных факторов эффективности ослабления для этих длин волн. Отношение измеренных оптических плотностей на двух длинах волн равно отношению рассчитанных усредненных

факторов эффективности ослабления и является функцией среднего объемно-поверхностного диаметра частиц:

$$\frac{\tau_{\lambda_i}}{\tau_{\lambda_j}} = \frac{\bar{Q}(x, \lambda_i, m)}{Q(x, \lambda_j, m)} = F_{ij}(d_{32}). \quad (2)$$

Метод дифференциального ослабления основан на решении обратной задачи [6], которое можно представить в виде уравнения:

$$\tau_{\lambda} = \frac{\pi C_n l}{4} \int_0^{\infty} x^2 \bar{Q}(x, \lambda, m) f(x) dx, \quad (3)$$

где τ_{λ} – оптическая плотность; C_n – счетная концентрация частиц; λ – длина волны зондирующего излучения; Q – фактор эффективности ослабления для одиночных частиц; l – оптическая длина зондирования; x – диаметр частиц; m – комплексный показатель преломления материала частиц.

Усредненный фактор эффективности ослабления в выражении (2) вычисляется по формуле:

$$\bar{Q}(x, \lambda, m) = \frac{\int_0^{\infty} x^2 Q(x, \lambda, m) f(x) dx}{\int_0^{\infty} x^2 f(x) dx}. \quad (4)$$

Тогда экспериментально измеренная оптическая плотность и рассчитанное значение среднего объемно-поверхностного диаметра частиц позволяют рассчитать массовую концентрацию по формуле:

$$c_m = \frac{\tau_{\lambda} \rho_p d_{32}}{1,5l \cdot \bar{Q}(x, \lambda, m)}, \quad (5)$$

где ρ_p – плотность материала частиц.

Для измерения параметров аэрозольных потоков нами разработана лазерная система на основе метода дифференциального ослабления, позволяющая измерять сигналы ослабления на трех длинах волн. Сигналы ослабления представляют собой электрические сигналы фотоприемника прямо пропорциональные интенсивности ослабленного излучения.

Оптическая схема такой лазерной системы имеет следующее устройство и принцип действия. Источники лазерного излучения генерируют импульсно-модулированное излучение на трёх длинах волн: 405, 650 и 1064 нм. На пути прохождения лазерных лучей установлены светофильтры, светоделительные стекла, пластинка с диафрагмой. На противоположной от источников излучения стороне газохода с аэрозольным потоком установлен фотоприемник ослабленного излучения. Излучение, не прошедшее через измерительный объем аэрозольного потока, светоделительными стеклами направляется на опорный фотоприемник. Кроме того, установка включает в себя блок формирования, регистрации и обработки сигналов фотоприемников, состоящий из измерительных и опорных синхронных детекторов, усилителя мощности и генератора импульсов [18, 20]. Экспериментальное исследование зависимости лидарных сигналов ослабления от массовой концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра частиц на разработанном нами экспериментальном стенде осуществляется одновременной записью сигналов ослабления и рассеяния Ми синхронно в реальном времени с последующей обработкой записанных сигналов в ПК.

Таким образом, разработана лазерная система, которая может измерять сигналы ослабления излучения методом дифференциального ослабления на трех длинах волн. Измеренные сигналы ослабления лазерного излучения позволяют рассчитать значения массовой концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра аэрозольных частиц цемента. Относительная погрешность измеренных значений среднего объемно-поверхностного диаметра на каждой длине волны для разных серий измерений и всех рассчитанных значений среднего объемно-поверхностного диаметра рассчитывалась последовательно по формулам, приведенным выше и представлены в табл. 1.

Таблица 1

Погрешности средних объемно-поверхностных диаметров

Оцененные параметры	$\frac{\tau_{\lambda_{650}}}{\tau_{\lambda_{405}}}$	$\frac{\tau_{\lambda_{1064}}}{\tau_{\lambda_{405}}}$	$\frac{\tau_{\lambda_{1064}}}{\tau_{\lambda_{650}}}$	Все значения среднего объемно-поверхностного диаметра
	d_{32} , мкм	0,44	0,60	
Δd_{32} , мкм	0,027	0,021	0,036	0,036
δ , %	6,2	3,6	4,5	11,2

Относительная погрешность массовой концентрации частиц равна относительной погрешности массы цементного порошка. Относительная погрешность измеренных значений массы на каждой длине волны для разных серий измерений и всех значений массы, которые задавались равными, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Погрешности масс

Оцененные параметры	Погрешности масс			Все значения масс
	650 нм	1064 нм	405 нм	
$m_{пр}$, г	0,51	0,51	0,51	0,51
Δm_{32} , мкм	0,027	0,036	0,033	0,015
δ , %	5,2	7,0	6,5	2,9

Можно заключить, что инструментальные погрешности, погрешности применяемого метода дифференциального ослабления и погрешности определения массы используемого в эксперименте материала не оказывают существенного влияния на измеренные сигналы ослабления. Относительные погрешности рассчитанных по экспериментально измеренным сигналам ослабления значений среднего объемно-поверхностного диаметра и массовой концентрации аэрозольных частиц цемента являются допустимыми и согласуются с данными [18, 19].

Таким образом, наш экспериментальный лидар ДОР позволяет измерять в реальном времени сигналы ослабления лазерного излучения и рассчитывать по измеренным сигналам ослабления достоверные значения массовой концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра частиц. Установленные корреляционные зависимости между средним объемно-поверхностным диаметром и параметрами логарифмически-нормального закона распределения частиц по размерам в [18] подтверждены хорошим совпадением с экспериментальными данными (рис. 2).

Один из вариантов реализации рассмотренной лазерной технологии применим для контроля деятельности пылегазоочистного оборудования предприятия, например рукавного фильтра. Данный лидар ДОР будет вести наблюдение за дисперсным составом и количеством вещества, прошедшего пылегазоочистные установки. Ключевым моментом является использование нескольких лазеров с различными длинами волн, что дает возможность контролировать качество очистки, выявлять отказ оборудования (например, возникновение прорыва фильтровальных элементов рукавного фильтра) на ранней стадии по фиксации увеличения размера частиц, проходящих рукавный фильтр, а не просто массы выбросов (что может быть результатом простого увеличения производительности). Это позволяет своевременно выключить систему или переключить аэродисперсный поток на другую установку и таким образом предотвратить сверхнормативное загрязнение и потерю сырья.

На предприятиях с механической активацией вещества и получения дисперсных материалов, например, при производстве цемента, гипса, муки и тд использование предложенного аэрозольного лидара дифференциального ослабления и рассеяния позволяет решить сразу несколько проблем:

- создание автоматической системы непрерывного контроля выбросов и передачи информации о них в Госреестр;
- автоматизированная корректировка параметров работы технологического оборудования в случае превышения нормативных выбросов предприятия;
- непрерывный контроль и корректировка дисперсного состава продукции, за счет ее насыщения определенными фракциями материала, улавливаемого на различных технологических этапах (например, фильтрах) для поддержания ФРЧ на необходимом уровне;
- мониторинг установок по обеспыливанию техногенных аэродисперсных потоков (например, рукавных фильтров), для предотвращения или раннего обнаружения сверхнормативных выбросов при выходе их из строя;
- контроль состояния атмосферного воздуха на рабочем месте или в цеху в целом.

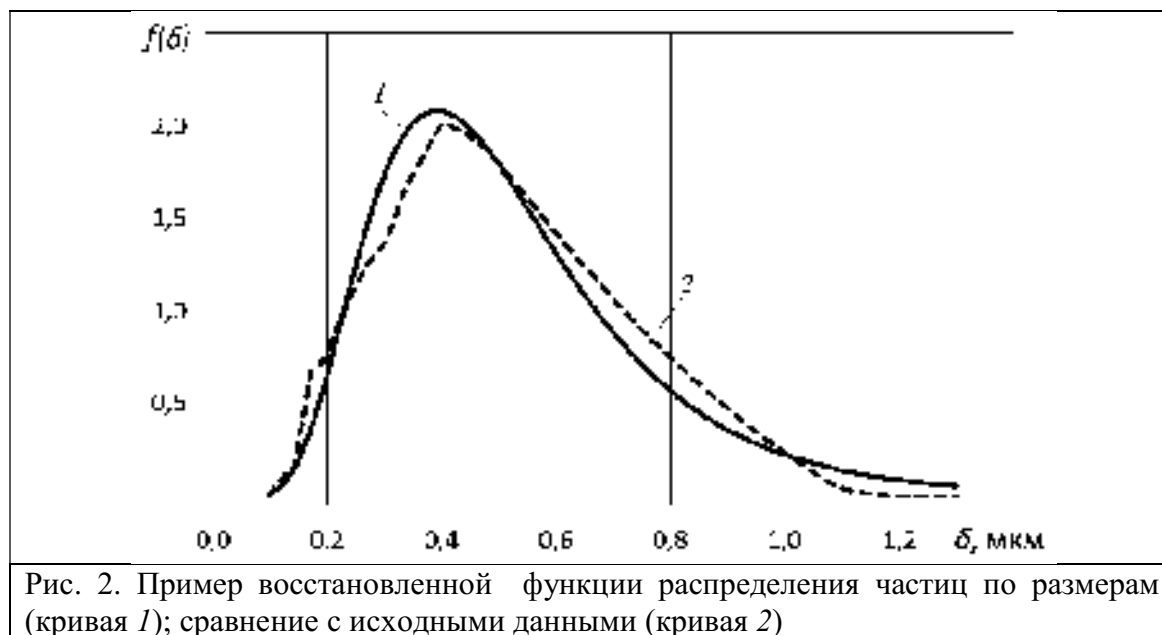


Рис. 2. Пример восстановленной функции распределения частиц по размерам (кривая 1); сравнение с исходными данными (кривая 2)

Решение перечисленных проблем позволяет существенно повысить как экологическую безопасность предприятия, так и его экономическую эффективность.

Заключение

На рынке высокотехнологичного оборудования существуют предложения для решения задач поставленных Правительством РФ. Стоимость оборудования для контроля одной точки эмиссии колеблется около 10 млн. руб. и предполагает размещение нескольких датчиков на участках отвода плотных аэродисперсных потоков (например, трубы), с использованием различных методов для различных загрязняющих веществ. Соответственно, на крупных производствах, имеющих не один источник масштабной эмиссии их может быть несколько, а может и несколько десятков.

В отличие от существующих, предлагаемая технология зондирования ЗВ обладает несколькими преимуществами. Во-первых, ее можно реализовать, как в стационарном, так и мобильном варианте. Во-вторых, дистанционное определения параметров аэродисперсных потоков исключает необходимость монтажа на труднодоступных участках отвода загрязняющих веществ и упрощает их контроль, обслуживание, ремонт и т. д. В-третьих, благодаря очень высокой скорости замеров (доли секунды) позволяет использовать одну установку для мониторинга сразу нескольких источников выбросов, в результате быстрого разворота платформы на запланированные точки прицеливания. В-четвертых, возможно включение результатов замеров в технологическую цепь предприятия для корректировки параметров работы технологического оборудования, что может принести еще более высокий экономический и экологический эффект. Это может иметь большой экономический и экологический эффект в случае превышения нормативных выбросов предприятием; для управления степенью очистки отходящих газов

(например, управляя электроэнергией, подаваемой на электрофильтры); при контроле и корректировке дисперсного состава продукции, за счет ее насыщения определенными фракциями материала, улавливаемого на различных технологических этапах (например, фильтрах) с целью поддержания ФРЧ на определенном уровне; мониторинге установок по обеспыливанию техногенных аэродисперсных потоков (рукавных фильтров), для предотвращения или раннего обнаружения сверхнормативных выбросов при выходе из строя; для контроля состояния атмосферного воздуха на предприятии и тд.

Таким образом, может быть создана комплексная система управления качеством окружающей среды и технологической деятельностью предприятия на основе лазерных технологий.

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц (при наличии конфликта интересов, авторы указывают его суть и круг физических и юридических лиц, с которыми возник этот конфликт).

Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: № 19-42-230004 и № 19-45-230009.

Список литературы

1. Лисицын А. П. Процессы океанской седиментации, М.; Наука. 1978. 392 с.
2. Дьяченко В. В. Формирование аномалий тяжелых металлов на геохимических барьерах в почвах под воздействием интенсивной ветровой эрозии // Геохимические барьеры в зоне гипергенеза. Тезисы докладов. 1999. С. 163–166.
3. Дьяченко В. В. Геохимия и оценка состояния ландшафтов Северного Кавказа // Диссертация на соискание ученой степени доктора географических наук / Южный федеральный университет. Ростов-на-Дону, 2004. 326 с.
4. Дьяченко В. В., Дьяченко Л. Г., Малыхин Ю. А. Проблемы загрязнения ландшафтов Краснодарского края и здоровье населения // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. Краснодар: КубГАУ, 2014. № 07 (101). IDA [article ID]: 1011407080.
5. Дьяченко В. В. Основные закономерности формирования геохимического спектра почв Северного Кавказа // Изв. вузов. Сев. - Кавк. регион. Естеств. науки. 2001. № 3. С. 86–88.
6. Vladimir Dyachenko, Irina Matasova, Olga Ponomareva The Trace Elements Concentrations Dynamics in the Soil Landscapes of the Southern Russia // Universal Journal of Geoscience. 2014. Vol. 2 (1), p. 28–34 DOI: 10.13189/ujg.2014.020104.
7. V. Diyachenko, Y. Malykhin and L. Diyachenko The Problems of the North Caucasus Landscape's Pollution and Population's Health, Journal of Environmental Protection, Vol. 5 No. 2, 2014, p. 81–86. DOI: 10.4236/jep.2014.52011.
8. Добровольский В. В. Основы биогеохимии: Учебное пособие. М.: Высш. шк., 1998. 413 с.
9. Глазовский Н. Ф., Учватов В. П. Химический состав атмосферной пыли некоторых районов ЕТС. 1981. Препринт. Пущино. ОНТИ НЦБН. 33 с.
10. Дьяченко В. В., Чартий П. В., Чартий Р. П., Шеманин В. Г. Контроль аэрозолей в приземном слое атмосферы в реальном времени // Безопасность в техносфере, Москва, № 3, 2008. С. 36–43.
11. Дьяченко В. В., Шеманин В. Г. 50 лет лазерной эры: лидары для мониторинга атмосферы // Безопасность в техносфере, Москва, № 6, 2010. С. 28–36.
12. Привалов В. Е., Фотиади А. Э., Шеманин В. Г. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы. Санкт-Петербург, 2013.
13. Дьяченко В. В., Чартий П. В., Шеманин В. Г. Исследование дисперсного состава приземного атмосферного аэрозоля оптическими методами // ЛАЗЕР-ИНФОРМ, № 18, 2005.

14. Веденин Е. И., Дьяченко В. В., Чартий П. В., Шеманин В. Г. Лазерный контроль среднего объемно-поверхностного диаметра частиц для оценки параметров аэрозольного загрязнения атмосферы // *Безопасность в техносфере*. 2017. Т. 6. № 6. С. 3–11.
15. Дьяченко В. В., Половченко С. В., Роговский В. В., Чартий П. В. Экологический мониторинг аэрозолей с цементной дисперсной фазой // *Научный диалог. Естествознание и экология*. 2012. № 7. С. 6–17.
16. Дьяченко В. В., Малыхин Ю. А. Здоровье населения в условиях высокой техногенной нагрузки // *Материалы XVI Международной конференции «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр»*. Москва – Донецк. 18–22 сентября. 2017. М.: Издательство «Спутник». С. 229–232.
17. Дьяченко В. В., Дьяченко Л. Г., Девисилов В. А. *Науки о Земле: Уч.* / Под ред. Девисилова В. А. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2019. 345 с.
18. Половченко С. В. Восстановление функции распределения частиц по размерам на основе данных многоволнового лазерного зондирования [Текст] / С. В. Половченко, В. Е. Привалов, П. В. Чартий, В. Г. Шеманин // *Оптический журнал*. 2016. Т. 83. № 5. С. 43–49.
19. Шигапов А. Б. Индикатриса рассеяния полидисперсными частицами аэрозолей [Текст] / А. Б. Шигапов, Р. Н. Шайдуллин, Р. Р. Ганеев, М. Д. Садыков, А. В. Калимуллин // *Известия ВУЗов. Проблемы энергетики*. 2008. № 5–6. С. 21–27.
20. Privalov V. E. Laser ranging of the atmospheric aerosol and determination of its disperse composition [Текст] / V. E. Privalov, V. V. Dyachenko, V. G. Shemanin // *IEEE Xplore Digital Library*, 2019 doi: 10.1109/EEEx Polytech.2019.8906882.

Investigation of the influence of air transport on the state of the environment by laser methods

* Dyachenko V. V., Vedenin E. I.

Novorossiysk Polytechnic University, Branch of the Kuban State Technological University, Novorossiysk, Russia

* email: v-v-d@mail.ru

The mechanisms of air pollution generation and propagation have been assessed in this paper. Laser sensing methods implementation of the Federal Law "On air protection" and the Decree of the Russian Federation Government dated 13.03.2019 (Nos. 262 and 263) about the stationary sources equipment by the automatic instruments for the measuring and transmitting information about the pollutants emissions to the State Register. It has reasoned the decision tasks set by the laser technologies and created on the basis of their using devices – lidars. Variety of the laser radiation sources and their application systems allows to create such a system for a wide range of conditions, objects, chemical compounds, aerosols or make multifunctional lidar with multiple wavelengths laser radiation, which allows to identify simultaneously and to measure some pollutants and aerosol microphysical parameters (concentration, size, particle shape).

Keyword: laser methods, pollutants, aerosols, disperse composition, modified spectral transparency method, lidar

Funding

This article is written with the support of the Russian Foundation for Basic Research, projects No. 19-42-230004 and 19-45-230009.

References

1. Lisitsyn A. P. *The processes of sedimentation in the ocean*, M.; Nauka. 1978. 392 p (in Russian).

2. Dyachenko V. V. Formation of heavy metal anomalies on geochemical barriers in soils under the influence of intense wind erosion // *Geochemical barriers in the hypergenesis zone. Abstracts.* 1999. P. 163–166 (in Russian).
3. Dyachenko V. V. *Geochemistry and assessment of the state of the landscapes of the North Caucasus* // Dissertation for the degree of Doctor of Geographical Sciences / Southern Federal University. Rostov-on-Don, 2004. 326 c. (in Russian).
4. Dyachenko V. V., Dyachenko L. G., Malykhin Yu. A. Problems of landscape pollution of the Krasnodar Territory and public health // *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University (Scientific journal KubGAU) [Electronic resource].* Krasnodar: KubGAU, 2014. No 07 (101). IDA [article ID]: 1011407080 (in Russian).
5. Dyachenko V. V. Basic regularities of the formation of the geochemical spectrum of the soils of the North Caucasus // *Izv. vuzov. Sev.-Kav. region. Natural sciences.* 2001. No 3. C. 86–88 (in Russian).
6. Vladimir Dyachenko, Irina Matasova, Olga Ponomareva *The Trace Elements Concentrations Dynamics in the Soil Landscapes of the Southern Russia* // *Universal Journal of Geoscience.* 2014. Vol. 2 (1), p. 28–34 DOI: 10.13189/ujg.2014.020104.
7. V. Diyachenko, Y. Malykhin and L. Diyachenko *The Problems of the North Caucasus Landscape's Pollution and Population's Health*, *Journal of Environmental Protection*, Vol. 5 No. 2, 2014, p. 81–86. DOI: 10.4236/jep.2014.52011.
8. Dobrovolskii V. V. *Fundamentals of Biogeochemistry: A textbook.* M.: Vyssh. shk., 1998. 413 p. (in Russian).
9. Glazovskii N. F., Uchvatov V. P. *Chemical composition of atmospheric dust in some areas of the ETC.* 1981. Preprint. Pushchino. ONTI NTsBN 33 p. (in Russian).
10. Dyachenko V. V., Chartii P. V., Chartii R.P., Shemanin V. G. *Monitoring aerosols in the surface layer of the atmosphere in real time* // *Safety in the technosphere*, M.: No 3, 2008. P. 36–43 (in Russian).
11. Dyachenko V. V., Shemanin V. G. *50 years of the laser era: lidars for atmospheric monitoring* // *Safety in the technosphere*, M.: No 6, 2010. P. 28–36 (in Russian).
12. Privalov V. E., Fotiadi A. E., Shemanin V. G. *Lasers and environmental monitoring of the atmosphere.* SPb.: 2013 (in Russian).
13. Dyachenko V. V., Chartii P. V., Shemanin V. G. *Investigation of the Disperse Composition of Surface Atmospheric Aerosol by Optical Methods* // *LASER-INFORM*, No 18, 2005 (in Russian).
14. Vedenin E. I., Dyachenko V. V., Chartii P. V., Shemanin V. G. *Laser control of the average volumetric surface diameter of particles to assess the parameters of aerosol pollution of the atmosphere* // *Safety in the technosphere.* 2017. V. 6. No 6. P. 3–11 (in Russian).
15. Dyachenko V. V., Polovchenko S. V., Rogovskii V. V., Chartii P. V. *Environmental monitoring of aerosols with a cement dispersed phase* // *Scientific dialogue. Natural science and ecology.* 2012. No 7. P. 6–17 (in Russian).
16. Dyachenko V. V., Malykhin Yu. A. *Health of the population in conditions of high technogenic load* // *Materials of the XVI International Conference "Resource-reproducing, low-waste and environmental technologies of subsoil development".* Moscow – Donetsk. 18–22 september. 2017. M.: «Sputnik». P. 229–232 (in Russian).
17. Dyachenko V. V., Dyachenko L. G., Devisilov V. A. *Earth sciences: Textbook.* / Ed. Devisilov V. A. M.: INFRA-M, 2019. 345 p. (in Russian).
18. Polovchenko S. V. *Reconstruction of the particle size distribution function based on multiwave laser sensing data [Text]* / S. V. Polovchenko, V. E. Privalov, P. V. Chartii, V. G. Shemanin // *Optical journal.* 2016. V. 83. No 5. P. 43–49 (in Russian).
19. Shigapov A. B. *Scattering indicatrix by polydisperse aerosol particles [Text]* / A. B. Shigapov, R. N. Shaidulin, R. R. Ganeev, M. D. Sadykov, A. V. Kalimullin // *Izvestiya VUZov. Energy problems.* 2008. No 5–6. P. 21–27 (in Russian).
20. Privalov V. E. *Laser ranging of the atmospheric aerosol and determination of its disperse composition [Текст]* / V. E. Privalov, V. V. Dyachenko, V. G. Shemanin // *IEEE Xplore Digital Library*, 2019 doi: 10.1109/EEx Polytech.2019.8906882.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 004.89
ВАК 05.11.17, 05.13.01

Программно-аппаратный комплекс для формирования дескрипторов в системе поддержки принятия решений по диагностике медицинских рисков

¹Корсунский Н. А., ¹Мирошников А. В., ^{1*}Шаталова О.В., ¹Протасова З.У., ¹Серебровский А. В.,
¹Крикунова Е. В., ²Сафонов Р. И.

¹ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия), 305004, г. Курск,
ул. Челюскинцев, 19, корп. Б

²ФГБОУ ВО Курская государственная сельскохозяйственная академия им. И. И. Иванова, 305021,
г. Курск, ул. Карла Маркса, д. 70

email: cor.nick2013@yandex.ru, miron_22_91@mail.ru, *Shatolg@mail.ru, zeinab.zeidan@yandex.ru,
grafjj@yandex.ru, Jlina-krikunova@yandex.ru, russafronov@yandex.ru

Данная статья описывает исследования, посвящённые разработке метода формирования дескрипторов для обучаемых классификаторов медицинских рисков, основанного на анализе переходных процессов в биоматериале в эксперименте *invivo*. Сущность предлагаемого метода состоит в формировании тестовых воздействий зондирующего тока на анатомические области с аномальной электропроводностью и получения амплитудно-фазочастотной характеристики импеданса биоматериала, на который осуществлялось тестовое воздействие. В качестве дескрипторов для классификаторов использовались координаты графика Коула биоматериала. График Коула получен на основе преобразования Карсона отсчетов переходной характеристики четырехполюсника, элементом которого является импеданс исследуемого биоматериала. На вход четырехполюсника подавалась последовательность однополярных прямоугольных импульсов. В результате, на основе системы сбора данных E20-10 производства ЗАО «L-Card», разработан программно-аппаратный комплекс для оцифровки переходных характеристик в четырехполюснике, элементом которого является импеданс биоматериала в анатомических областях с аномальной электропроводностью. Разработано программное обеспечение для формирования тестовых воздействий и оцифровки сигналов, являющихся реакцией биоматериала на данные тестовые воздействия. Предложена теоретическая модель перехода от отсчетов переходной характеристики четырехполюсника с элементом импеданса биоматериала к графику Коула биоматериала. Показано, что линейная модель импеданса биоматериала позволяет получить дескрипторы на основе его амплитудно-фазочастотной характеристики, которые учитывают диссипативные свойства биоматериала. Получение модели графика Коула с учетом его диссипативных свойств позволяет построить обучаемые классификаторы медицинского риска для социально значимых заболеваний.

Ключевые слова: медицинский риск, зоны аномальной электропроводности, переходная характеристика, дескрипторы, программно-аппаратный комплекс

Введение

Любой риск снижения продолжительности жизни, ухудшения здоровья человека является медицинским риском. Диагностика медицинского риска необходима для профилактики болезни и ее лечения. Самыми распространенными видами медицинского риска, которые требуют точной и обязательной диагностики, в наши дни, являются хирургические риски, сердечно-сосудистые риски, риски инфекционных заболеваний [1–4].

Для своевременной и качественной диагностики медицинского риска необходимо в составе медицинской информационной системы использовать системы поддержки принятия решений (СППР). Это обусловлено тем, что диагностика медицинского риска требует одновременного обследования большой массы населения в отдельных регионах, например, диагностика онкологических, сердечно-сосудистых заболеваний, вирусных инфекций, или сверхоперативного принятия решения в случае диагностики хирургических рисков [3, 5, 6].

Для достижения этих целей может быть использована методология биоимпедансных исследований, в частности, в аномальных зонах электропроводности – биоактивных точках (БАТ), как наиболее чувствительных к функциональным изменениям регуляторных систем организма [7–10]. Исследованиями, проведенными в [11–15], установлено, что БАТ изменяют свои физические свойства, в частности, биоимпеданс, в зависимости от состояния органов и систем организма, функционально связанных с определенной БАТ или группой БАТ. Поэтому исследуя изменения электропроводности БАТ или группы БАТ, появляется возможность контролировать не только текущее состояние биообъекта, но и прогнозировать его состояние в будущем.

В процессе измерения электропроводности БАТ на соответствующие анатомические объекты оказываются тестовые воздействия слабыми зондирующими токами. Наиболее эффективным методом импедансных исследований является метод, основанный на построения графика Коула, который является одним из способов представления амплитудно-фазочастотной характеристики (АФЧХ) двухполюсника, эквивалентного по импедансу биоматериалу, включенному в цепь источника зондирующего тока [11]. Однако при биоимпедансных исследованиях необходимо соблюдение требований морфологической однородности и интактности биоматериала. Так как диапазон частот зондирующего тока достаточно велик, а шаг продвижения по этому диапазону должен быть достаточно мал, чтобы учесть диссипативные свойства импеданса биоматериала, то процесс измерения требует длительного времени. Поэтому выполнить вышперечисленные требования становится проблематично.

Сохранение свойств морфологической однородности и интактности способствует снижению величины зондирующего тока и времени его воздействия на биоматериал, что требует перехода к импульсным тестовым посылкам. Если пренебречь нелинейными свойствами биоматериала, то его свойства как линейной системы будет определять импульсная характеристика $g(t)$, связанная с АФЧХ через прямое преобразование Фурье:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)e^{-j\omega t} dt. \quad (1)$$

В (1) $g(t)$ определяется как реакция системы на импульс Дирака. Импульс Дирака физически реализовать достаточно сложно, поэтому вместо $g(t)$ в (1) целесообразно использовать переходную характеристику линейной системы $h(t)$, определяемую как реакция системы на единичное воздействие (функцию Хэвисайда) $1(t)$. В этом случае АФЧХ системы связана с ее переходной характеристикой через преобразование Карсона

$$F(j\omega) = j\omega \cdot \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-j\omega t} dt. \quad (2)$$

Таким образом, для определения импеданса биоматериала $Z(j\omega)$ необходимо включить его в пассивный четырехполюсник (рис. 1), на вход которого подать последовательность импульсов $\text{rect}(t)$ (рис. 2)

$$U_{\text{вх}}(t) = \begin{cases} A, & \text{если } (n-1) \cdot T \leq t < (\tau + (n-1) \cdot T), \\ 0, & \text{если } (\tau + (n-1) \cdot T) \leq t < n \cdot T, \end{cases} \quad (3)$$

где A – амплитуда импульса $\text{rect}(t)$, τ – длительность импульса $\text{rect}(t)$, T – период импульсов $\text{rect}(t)$, n – номер импульса $\text{rect}(t)$ в последовательности, $n = 1, 2, \dots, N$.

Если длительность импульса $\text{rect}(t)$ больше времени переходного процесса в четырехполюснике рис. 1, то передний фронт импульса $\text{rect}(t)$ можем принять за функцию Хэвисайда $1(t)$, а переходные процессы, вызванные фронтами функции $\text{rect}(t)$ (рис. 2б), принимаем за переходные характеристики четырехполюсника рис. 1. Учитывая вышесказанное, формула (2) примет вид

$$F(j\omega) = j\omega \cdot \int_0^{\tau} h(t)e^{-j\omega t} dt \quad (4)$$

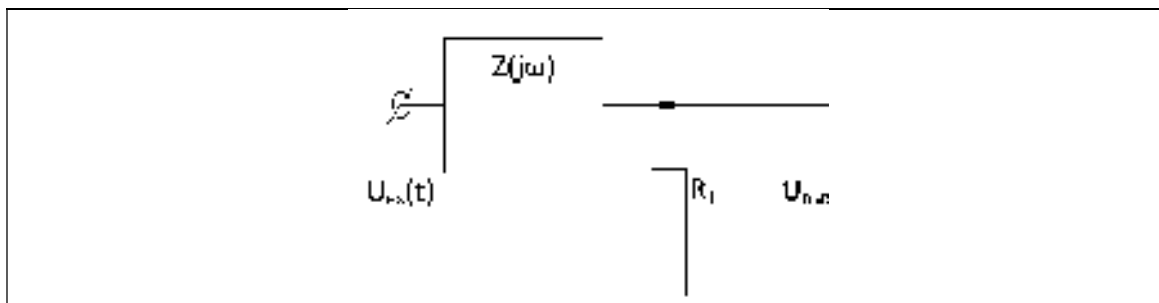


Рис. 1. Схема пассивного четырехполюсника для оцифровки переходной характеристики

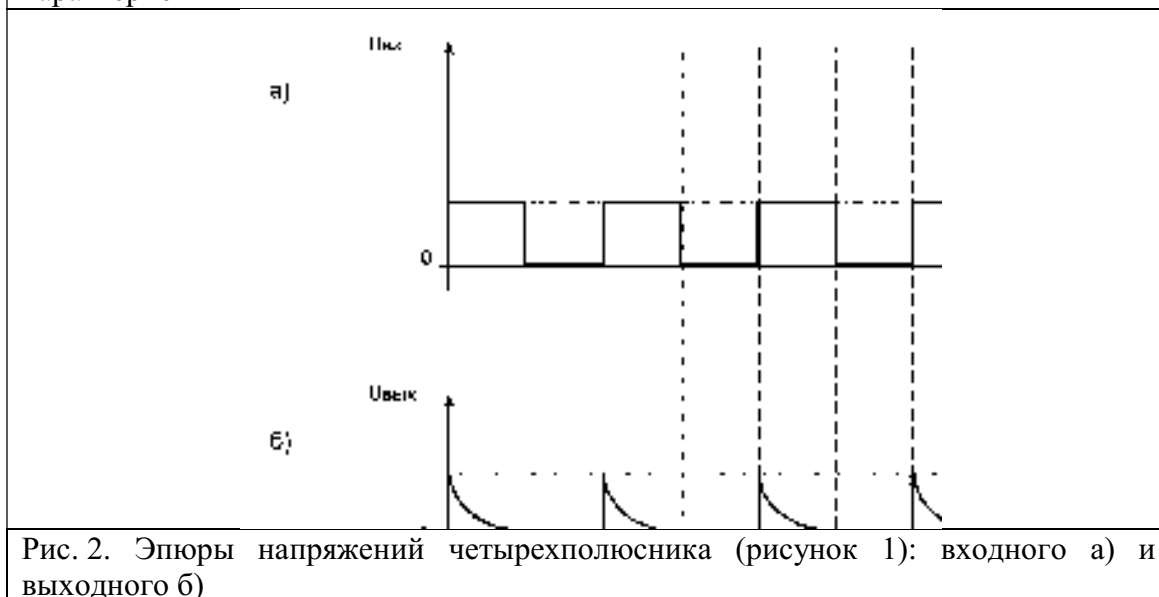


Рис. 2. Эпюры напряжений четырехполюсника (рисунок 1): входного а) и выходного б)

Таким образом, график Коула биоматериала может быть определен по одной переходной характеристике четырехполюсника или по совокупности переходных характеристик с усреднением их по времени или по частоте.

Материалы и методы

Для проведения биоимпедансных исследований на биологическом объекте с учетом проведенного анализа и результатов работ, полученных в [3, 16, 17], был разработан, сконструирован и протестирован программно-аппаратный комплекс (ПАК), который:

- 1) осуществляет поиск БАТ;
- 2) позволяет за контролируемый промежуток времени при однократном контакте активного электрода с биообъектом получить необходимый набор отсчетов переходного процесса в биоматериале;
- 3) дает возможность задавать количество импульсов $rect(t)$ для расчета переходной характеристики, и тем самым, контролировать время протекания эксперимента;
- 4) проводит анализ полученной переходной характеристики для последующей интерпретации результатов и формирования дескрипторов для обучаемых классификаторов медицинского риска.

Разработанный ПАК состоит из:

- устройства сбора данных (L-Card), подключенного к персональному компьютеру (ПК);
- устройства связи с объектом (УСО);
- соответствующего программного обеспечения.

ПАК включает в себя аппаратную и программную часть. Его структурная схема представлена на рис. 3.

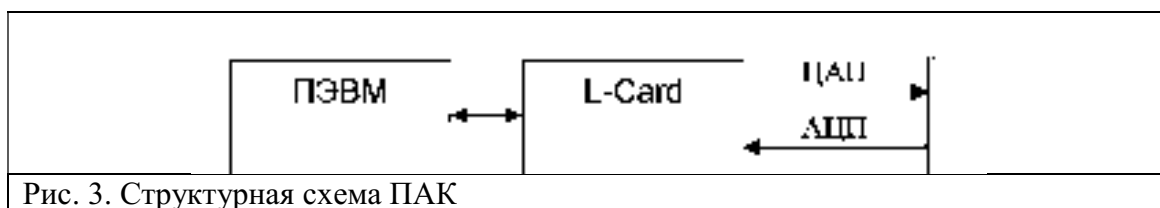


Рис. 3. Структурная схема ПАК

Связь с биообъектом осуществляется с помощью щупа, внешний вид которого представлен на рис. 4а, конструктивные особенности щупа показаны на рис. 4б.

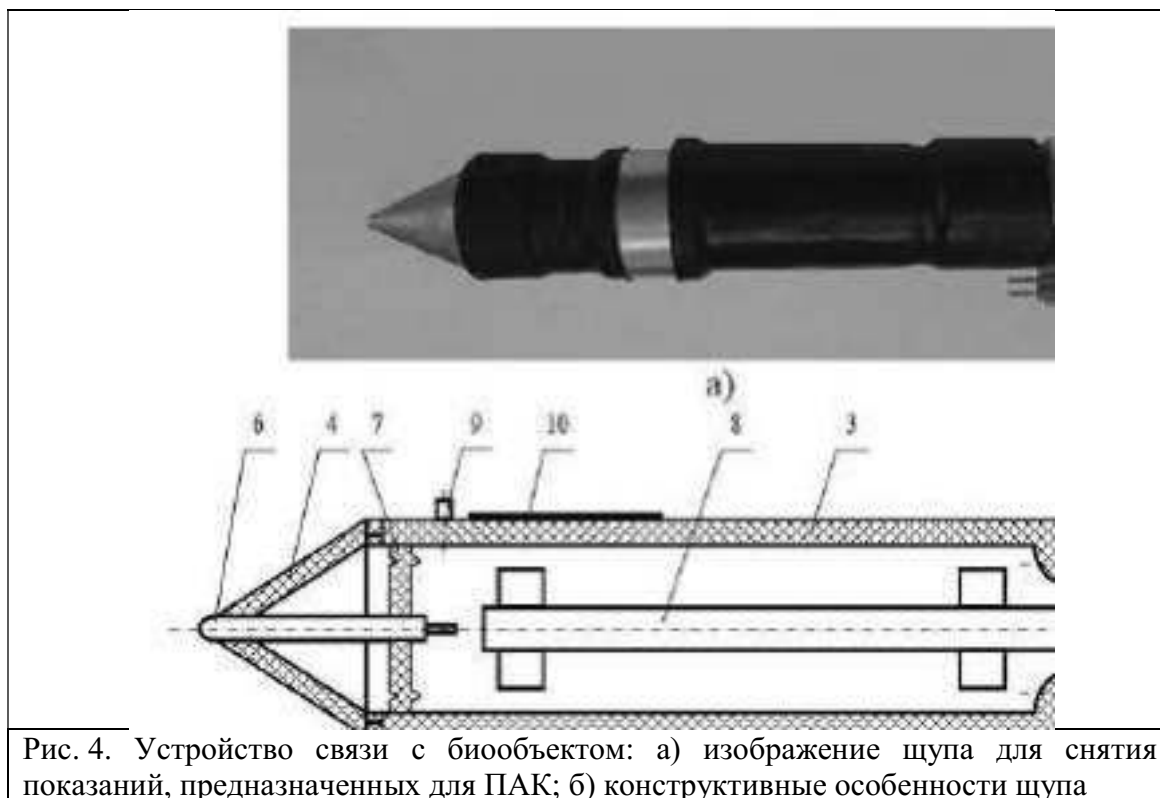


Рис. 4. Устройство связи с биообъектом: а) изображение щупа для снятия показаний, предназначенных для ПАК; б) конструктивные особенности щупа

Щуп состоит из корпуса 3, который закрыт с одной стороны конусообразным колпачком 4, а с другой – крышкой 5. Внутри корпуса находится активный электрод 6, мембрана 7, конусообразный колпачок 4, позволяющий активному электроду 6 перемещаться в продольном направлении, и электронный модуль 8. На поверхности корпуса размещены кнопка 9, пассивный электрод 10, интерфейсный разъем для подключения к ЭВМ 11 и блок питания 12, общий провод, также, подключен к пассивному электроду 10 и первому выводу кнопки 9. В качестве блока преобразования в ПАК использован модуль быстродействующего АЦП с USB 2.0 интерфейсом - E20-10 производства ЗАО «L-Card» (<http://www.lcard.ru>), внешний вид блока преобразования изображен на рис. 5.

Характерной особенностью этого модуля является возможность высокоскоростного непрерывного сбора данных на частотах дискретизации до 10 МГц. Для обеспечения эффективности функционирования модуля в устройстве используется:

- четырехканальная архитектура с одним АЦП;
- коммутатор, обеспечивающий статический режим измерения собственного нуля, независимо для каждого канала;
- входные буферные усилители в последовательно опрашиваемых каналах позволяют полностью исключить влияние коммутационной помехи;
- активные фильтры низкой частоты (ФНЧ) 3-го порядка в каждом канале, предназначены для удаления помех и улучшения соотношения сигнал/шум.



Применение в ПАК двухканального 12-ти разрядного цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) дает возможность выставлять и поддерживать постоянное напряжение в диапазоне $\pm 5\text{В}$ при воздействии на биообъект. Следует заметить, что ПАК позволяет не только оцифровать, но и визуализировать процесс переходной характеристики по заданным параметрам.

В качестве среды разработки программного обеспечения для СППР на основе ПАК, была использована RAD Studio XE8 с наличием библиотек L-Card (Lisbari и LCome). Выбор этой среды обусловлен доступностью использования готовых приложений для работы с АЦП, ЦАП и возможностью визуализации различных информационных данных с последующим их масштабированием.

При старте работы система производит настройку следующих параметров, необходимых для ее функционирования:

- определение модуля L-Card;
- установка начальных параметров работы модуля L-Card;
- передачу в модуль параметров работы АЦП;
- определение подключенного на модуле устройства ЦАП;
- передачу в модуль параметров работы ЦАП.

Интерфейс основного диалогового окна, открывающегося при запуске программы, представлен на рис. 6.

Разработанный программный продукт реализует основные функции посредством модулей, схема взаимодействия которых представлена на рис. 7.

- Модуль MainF - является главным модулем программного продукта, который предназначен для организации работы интерфейса с модулем ввода начальных параметров, просмотра данных, полученных в ходе выполнения экспериментов (отображение данных реализуется в виде графиков). Посредством этого модуля осуществляется передача управления в другие модули программного продукта, а также осуществляется связь с модулем L-Card, позволяющая выполнить настройку и проверку устройства для дальнейшей работы с ним. В этом модуле организована синхронизация работы АЦП и ЦАП модуля L-Card E20-10.

- Модуль DigitalThread предназначен для работы с АЦП и ЦАП модуля L-Card E20-10.
- Модуль TViewChar используется для отображения переходной характеристики.

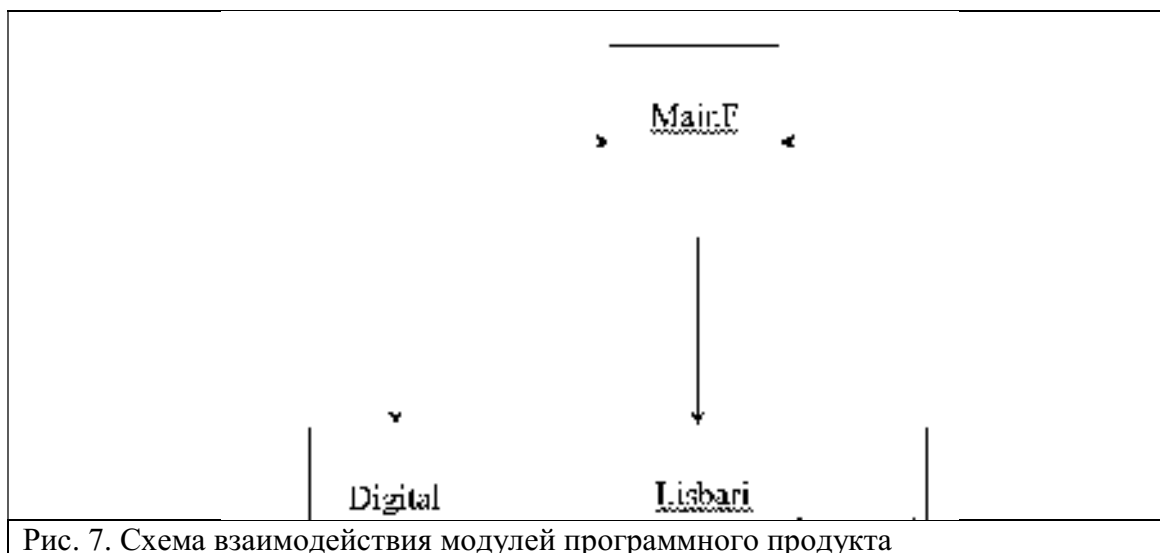


Рис. 7. Схема взаимодействия модулей программного продукта

Программное обеспечение было разработано в среде Delphi RAD Studio XE 8 с использованием библиотек L-Card (Lisbari и LCome).

Результаты и их обсуждение.

При моделировании переходных характеристик в БАТ биоматериал будем представлять эквивалентной схемой пассивного RC-двухполюсника, предложенного Коулом [3, 13, 14]. На рисунке 8 представлена электрическая схема такого двухполюсника, моделирующего импеданс биоматериала (выделен пунктирной линией).

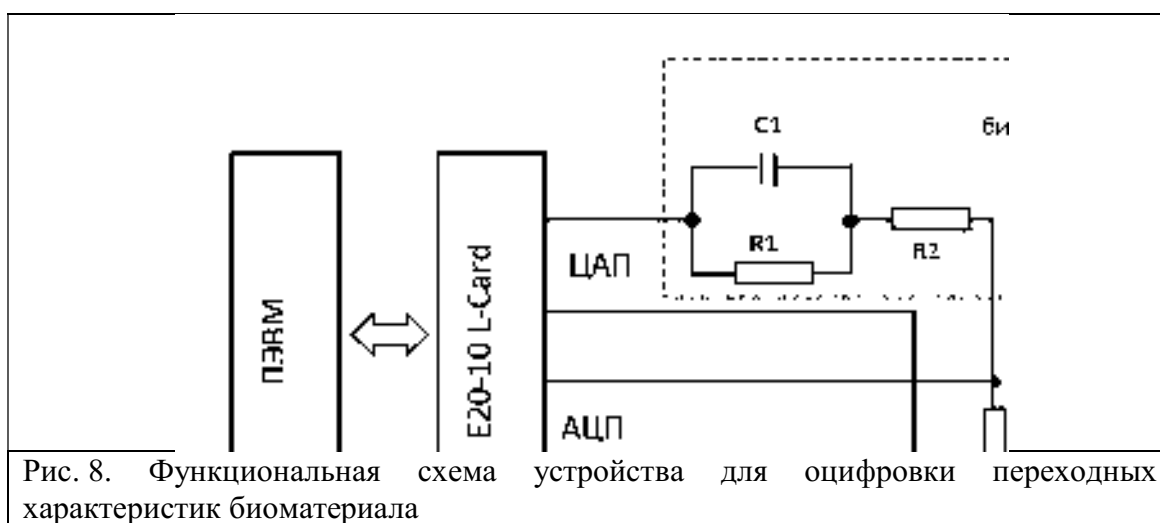


Рис. 8. Функциональная схема устройства для оцифровки переходных характеристик биоматериала

Переходная характеристика – это реакция линейной системы на функцию Хевисайда и является одной из энергетических характеристик БАТ [3]. Операторное сопротивление $Z(s)$ двухполюсника рис. 8 определяется согласно формуле [3]:

$$Z(s) = \frac{R_1 + R_2 + sR_1R_2C_1}{1 + sR_1C_1} \quad (5)$$

Функциональная схема устройства для оцифровки отсчётов переходной характеристики биоматериала представлена на рис. 8.

Импульсы Хевисайда формируются ПЭВМ посредством модуля E20-10 и подаются на биоматериал с выхода ЦАП, а переходный процесс наблюдается на резисторе R_T , на котором формируется напряжение, передаваемое в компьютер.

При реализации режима поиска БАТ на шуп, представляющий активный электрод диаметром 3 мм, подаются постоянные значения напряжений через ЦАП L-Card. Затем с помощью АЦП L-Card производится измерение полученных значений силы тока. С целью исключения влияния помех

производилась регистрация 100 отсчетов (размер кадра) при одном и том же значении напряжения на активном электроде. Выбранное количество в 100 отсчетов, снимаемое за каждый шаг дискретизации, позволяет отобразить полученные результаты в виде горизонтальной линии на экране монитора, по которой осуществляется навигация щупа. Проведенные исследования выполнялись при выборе следующих параметров режима поиска БАТ:

- величина постоянного напряжения (U), которое подается на биоматериал изменялось в диапазоне от 0 В до 3 В;
- значение частоты дискретизации АЦП (Δ) было задано по умолчанию, но может быть так же выбрано пользователем в диапазоне от 0,015 кГц до 10 МГц.

Если учесть, что в АЦП задан шаг дискретизации, то в этом случае число отсчетов легко переводится в интервал времени путём умножения величины количества отсчетов в кадре на шаг дискретизации, то есть, размер кадра « T » соответствует интервалу времени, за которое осуществляется опрос каналов АЦП L-Card (их в данном случае может быть от одного до четырех) при отсутствии межкадровой задержки.

Схема алгоритма работы этого режима представлена на рис. 9.

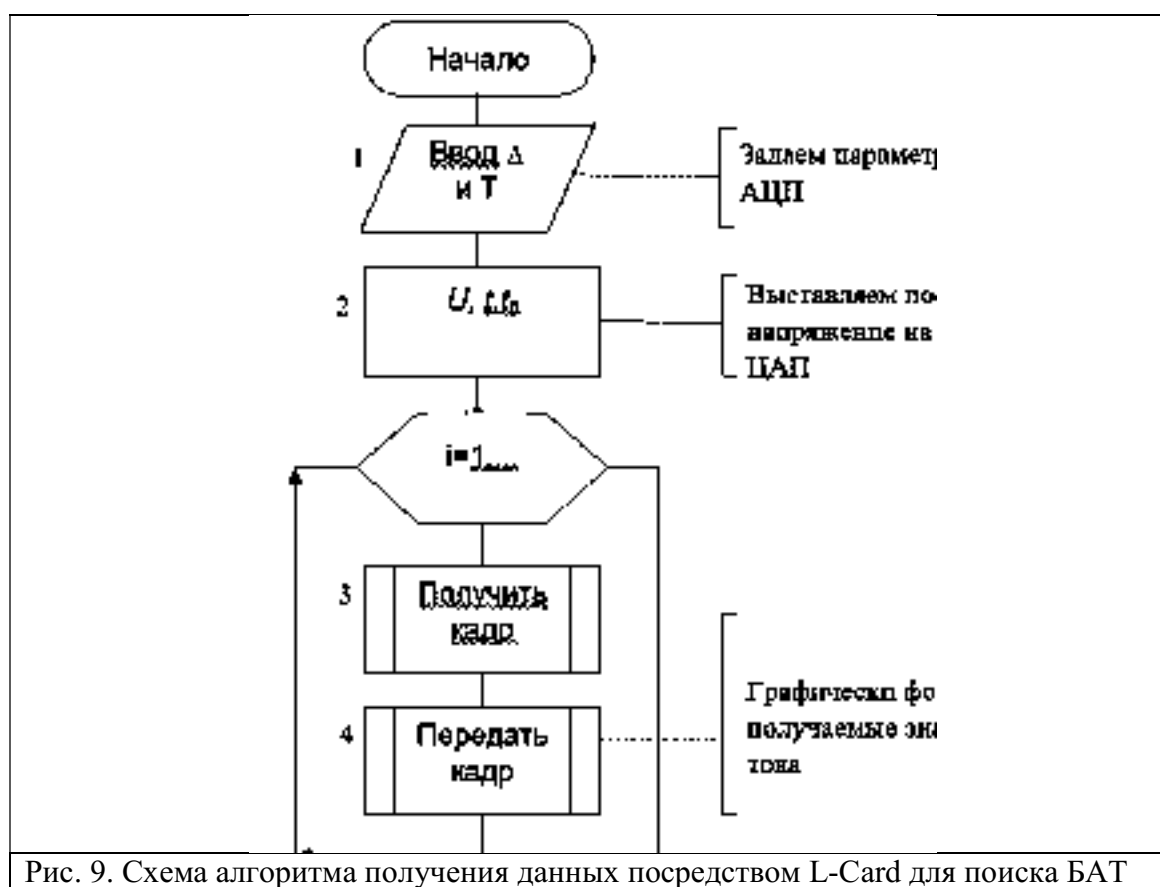


Рис. 9. Схема алгоритма получения данных посредством L-Card для поиска БАТ

Величина напряжения, частота дискретизации сигнала, период импульсов напряжения, время сбора данных и зоны активности переходных процессов задаются пользователем. Выбор значений этих величин не имеет принципиального значения, поскольку данный режим работы служит только для поиска БАТ. Затем в обнаруженных местах дислокации БАТ будут анализироваться переходные процессы во втором режиме работы. Частота дискретизации выбирается по принципу, чем меньше – тем точнее данные эксперимента, но опять же, даже при больших значениях частоты программа будет давать точный результат.

При оцифровке полученных данных получаем два канала оцифровки, один из которых соответствует значениям переходной характеристики, а второй значениям отсчетов напряжения на выходе ЦАП.

Заключение

Описан алгоритм и технические средства оцифровки переходной характеристики на живом биообъекте. Использование последовательности тестовых импульсов прямоугольной формы позволяет осуществить контроль динамики электрических свойств биоматериала аналогично способу использования вольтамперных характеристик биоматериала в аномальных зонах электропроводности, получаемых при реверсивно линейно-изменяющихся напряжениях, который описан в [15, 17].

Достоинства разработанного ПАК состоит в следующем:

- позволяет не только оцифровать, но и визуализировать процесс переходной характеристики по заданным параметрам;
- простота работы с использованием ПАК не требует какого-либо дополнительного обучения;
- масштабирование графиков происходит автоматически, что позволяет просмотреть процесс переходной характеристики более детально.

В перспективе разработанный ПАК предоставит возможность работы с ранее сохраненными файлами, а также будет предусмотрена процедура изменения возможностей визуализации, способствующая детальному изучению переходных характеристик. Не маловажной перспективой развития данного ПАК может являться установление рисков инфекционных заболеваний, что может помочь при первичной диагностики в условиях пандемии.

Данную СППР можно использовать в больницах или коммерческих организациях, которые предоставляют медицинские услуги для дополнительной диагностики.

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц (при наличии конфликта интересов, авторы указывают его суть и круг физических и юридических лиц, с которыми возник этот конфликт).

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90116.

Список литературы

1. Анализ нормы ст. 41 УК РФ об обоснованном риске с точки зрения теоретической обоснованности. [Электронный ресурс]. URL: http://studbooks.net/1116912/pravo/meditsinskiy_risk_obosnovannogo_riska.
2. Ростовцев В. Н. Классификация медицинских рисков. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kmsd.su/vracham/nauchnye-stati/klassifikatsiya-meditsinskikh-riskov-rostovtsev-v-n> (11.01.2021).
3. Шаталова О. В. Интеллектуальные системы мониторинга медицинских рисков с учетом биоимпедансных исследований: монография / О. В. Шаталова; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2020. 356 с.
4. Ефремов М. А. Гибридные нечеткие модели для прогнозирования возникновения и осложнений артериальной гипертензии с учетом энергетических характеристик биоактивных точек / М. А. Ефремов, С. А. Филист, О. В. Шаталова, Е. А. Старцев, Л. В. Шульга // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8. № 4 (29). С. 104–119.
5. Филист С. А. Гибридные информационные технологии по экспресс-диагностике инфекционных заболеваний на основе многочастотного анализа пассивных свойств биотканей / С. А. Филист, В. А. Алексенко, Кабус Кассим // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск. «Медицинские информационные системы» / Таганрог, 2010. № 8 (109). С. 12–17.

6. Shatalova O. V. Impedance models in anomalous electrical conduction zones forming by in-vivo experiments for intelligent systems of socially important diseases diagnostic / O. V. Shatalova, A. A. Burmaka, E. N. Korovin // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi: IEEE, 9–16 Sept., 2018. P. 1–4. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8501668>.
7. Готовский М. Ю. Электрохимические процессы на электродах при электропунктурной диагностике / М. Ю. Готовский, Ю. Ф. Перов // Сообщение 1. Постоянный ток. Традиционная медицина. 2013 г. № 4 (35).
8. Fernando Seoane. Bioelectrical impedance during hypoxic cell swelling: modeling of tissue as a suspension of cells / Fernando Seoane, Kaj Lindecrantz, Torsten Olsson, Ingemar Kjellmer // Proc. XII Int. Conf. on Electrical Bio-Impedance, June 20–24, 2004, Gdansk, Poland, P. 73–76.
9. Кузнецов В. В. Техническая реализация биоимпедансной поличастотной спектрометрии в диагностических исследованиях / Кузнецов В. В., Новиков А. А. // Омский научный вестник. Омск: 2013. № 2 (116). С. 235–240.
10. Кореневский Н. А. Диагностические системы на основе анализа вольтамперных характеристик биоактивных точек / Н. А. Кореневский, С. А. Филист, О. В. Шаталова, К. Д. А. Кассим, В. В. Руденко // Биотехносфера. 2013. № 5 (29). С. 33–38.
11. Филист С. А. Биотехническая система для контроля импеданса биоматериалов в экспериментах *in vivo* / С. А. Филист, А. А. Кузьмин, М. Н. Кузьмина // Биомедицинская радиоэлектроника. 2014. № 9. С. 38–41.
12. Филист С. А. Модели биоимпеданса при нелинейной вольтамперной характеристике и обратимом пробое диэлектрической составляющей биоматериала / С. А. Филист, О. В. Шаталова, А. С. Богданов // Бюллетень сибирской медицины. 2014. Т. 13. № 4. С. 129–135.
13. Попечителей Е. П. Способы и модели идентификации биоматериалов на основе анализа многочастотного импеданса / Е. П. Попечителей, С. А. Филист // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника. Медицинское приборостроение № 1, 2011. С. 74–80.
14. Кассим К. Д. А. Параметрические модели биоимпеданса для идентификации функционального состояния живой системы / К. Д. А. Кассим, И. А. Ключиков, О. В. Шаталова, З. Д. Яа // Биомедицинская радиоэлектроника. 2012. № 4. С. 50–56.
15. Суржикова С. Е. Исследование проводимости биоматериалов в биоактивных точках при циклических воздействиях токами различной полярности / С. А. Филист, С. Е. Суржикова // Биомедицинская радиоэлектроника. 2016. Вып. 9. С. 32–36.
16. Филист С. А. Универсальные сетевые модели для задач классификации биомедицинских данных / С. А. Филист, Р. А. Томакова, Зар До Яа // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 4 (43), Ч. 2. С. 44–50.
17. Суржикова С. Е. Программно-аппаратный комплекс для анализа вольтамперных характеристик биоактивных точек на основе модуля L-Card E20-10 / С. Е. Суржикова, О. В. Шаталова, В. В. Федянин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2015 № 2 (30). С. 150–161.

Hardware and software complex for the formation of descriptors in the decision support system for the diagnosis of medical risks

¹Korsunsky N. A., ¹Miroshnikov A. V., ^{1*}Shatalova O. V., ¹Protasova Z. U., ¹Serebrovsky A. V.,
¹Krikunova E. V., ²Safonov R. I.

¹FSBEI HE "Southwestern State University" (Kursk, Russia), 305004, Kursk, st. Chelyuskintsev, 19, bldg.

B

²FSBEI HE Kursk State Agricultural Academy named after I.I. Ivanova, 305021, Kursk, st. Karl Marx, 70

email: cor.nick2013@yandex.ru, miron_22_91@mail.ru, *Shatolg@mail.ru, zeinab.zeidan@yandex.ru,
grafjj@yandex.ru, Jlina-krikunova@yandex.ru, russafronov@yandex.ru

Purpose of the study. Development of a method for forming descriptors for trained classifiers of medical risks, based on the analysis of transient processes in biomaterial in an in vivo experiment.

Methods. The essence of the proposed method consists in the formation of test effects of the probing current on anatomical areas with abnormal electrical conductivity and obtaining the amplitude-phase-frequency characteristics of the impedance of the biomaterial on which the test action was carried out. The coordinates of the Cole plot of the biomaterial were used as descriptors for the classifiers. The Cole plot was obtained on the basis of Carson's transformation of the readings of the transient response of a four-port network, the element of which is the impedance of the biomaterial under study. A sequence of unipolar rectangular pulses was fed to the input of the four-port network.

Results. On the basis of the data collection system E20-10 manufactured by JSC "L-Card", a software and hardware complex has been developed for digitizing transient characteristics in a quadrupole, the element of which is the impedance of a biomaterial in anatomical areas with abnormal electrical conductivity. Software has been developed for the formation of test influences and digitization of signals that are the reaction of a biomaterial to these test influences. A theoretical model of the transition from the readings of the transient characteristic of a quadripole with an element of biomaterial impedance to the Cole plot of the biomaterial is proposed.

Conclusion. It is shown that the linear model of the biomaterial impedance allows one to obtain descriptors based on its amplitude-phase-frequency characteristics, which take into account the dissipative properties of the biomaterial. Obtaining a model of the Cole graph, taking into account its dissipative properties, makes it possible to construct trainable classifiers of medical risk for socially significant diseases.

Keyword: medical risk, zones of abnormal electrical conductivity, transient response, descriptors, software and hardware complex

Funding

The reported study was funded by RFBR, project number 19-38-90116.

References

1. Analiz normy st. 41 UK RF ob obosnovannom riske s tochki zreniya teoreticheskoy obosnovannosti [Analysis of the norm of Art. 41 of the Criminal Code of the Russian Federation on reasonable risk from the point of view of theoretical justification]. [Electronic resource]. URL: http://studbooks.net/1116912/pravo/meditsinskiy_risk_obosnovannogo_riska [In Russian].
2. Rostovcev V. N. Klassifikaciya medicinskikh riskov [Classification of medical risks]. [Electronic resource]. URL: <http://www.kmsd.su/vracham/nauchnye-stati/klassifikatsiya-meditsinskikh-riskov-rostovtsev-v-n> (11.01.2021) [In Russian].
3. Shatalova O. V. Intellectual'nye sistemy monitoring medicinskikh riskov s uchetom bioimpedansnykh issledovaniy: monografiya [Intelligent systems for monitoring medical risks taking into account bioimpedance research: monograph] / O. V. Shatalova; Yugo-Zap. gos. un-t. Kursk, 2020. 356 p [In Russian].
4. Efremov M. A. Gibridnye nechetkie modeli dlya prognozirovaniya vzniknoveniya i oslozhnenij arterial'noj gipertenzii s uchetom energeticheskikh kharakteristik bioaktivnykh toчек [Hybrid fuzzy models for predicting the occurrence and complications of arterial hypertension, taking into account the energy characteristics of bioactive points] / M. A. Efremov, C. A. Filist, O. V. Shatalova, E. A. Starcev, L. V. Shul'ga // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie [Proceedings of Southwest State University. Series Control, computer engineering, information science. Medical instruments engineering]. 2018. Vol. 8. No. 4 (29). P. 104–119 [In Russian].
5. Filist S. A. Gibridnye informacionnye tekhnologii po ekspress-diagnostike infekcionnykh zabojevanij na osnove mnogochastotnogo analiza passivnykh svojstv biotkanej [Hybrid information technologies for express diagnostics of infectious diseases based on multifrequency analysis of passive properties of biological tissues] / S. A. Filist, V. A. Aleksenko, Kabus Kassim // Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie

- nauki. Tematicheskij vypusk. «Medicinskie informacionnye sistemy» [Technical science. Thematic issue. "Medical Information Systems"] / Taganrog, 2010. No. 8 (109). P. 12–17 [In Russian].
6. Shatalova O. V. Impedance models in anomalous electrical conduction zones forming by in-vivo experiments for intelligent systems of socially important diseases diagnostic / O. V. Shatalova, A. A. Burmaka, E. N. Korovin // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi: IEEE, 9–16 Sept., 2018. P. 1–4. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8501668>.
 7. Gotovskij M. Yu. Elektrokhimicheskie process na elektrodakh pri elektropunkturoj diagnostike [Electrochemical processes on electrodes in electropuncture diagnostics] / M. Yu. Gotovskij, Yu. F. Perov // Soobshchenie 1. Postoyannyj tok. Tradicionnaya medicina [Message 1. Direct current. Traditional medicine]. 2013. No. 4 (35) [In Russian].
 8. Fernando Seoane. Bioelectrical impedance during hypoxic cell swelling: modeling of tissue as a suspension of cells / Fernando Seoane, Kaj Lindecrantz, Torsten Olsson, Ingemar Kjellmer // Proc. XII Int. Conf. on Electrical Bio-Impedance, June 20–24, 2004, Gdansk, Poland, P. 73–76.
 9. Kuznecov V. V. Tekhnicheskaya realizaciya bioimpedansnoj polichastotnoj spektrometrii v diagnosticheskikh issledovaniyakh [Technical implementation of bioimpedance polyfrequency spectrometry in diagnostic research] / Kuznecov V. V., Novikov A. A. // Omskij nauchnyj vestnik [Omsk Scientific Bulletin]. Omsk: 2013. No. 2 (116). P. 235–240 [In Russian].
 10. Korenevskij N. A. Diagnosticheskie sistemy na osnove analiza vol'tampernykh kharakteristik bioaktivnykh tocek [Diagnostic systems based on the analysis of current-voltage characteristics of bioactive points] / N. A. Korenevskij, S. A. Filist, O. V. Shatalova, K. D. A. Kassim, V. V. Rudenko // Biotekhnosfera [Biotechnosphere]. 2013. No. 5 (29). P. 33–38 [In Russian].
 11. Filist S. A. Biotekhnicheskaya sistema dlya kontrolya impedansa biomaterialov v eksperimentakh in vivo [Biotechnical system for controlling the impedance of biomaterials in in vivo experiments] / S. A. Filist, A. A. Kuz'min, M. N. Kuz'mina // Biomedicinskaya radioelektronika [Biomedical radioelectronics]. 2014. No. 9. P. 38–41 [In Russian].
 12. Filist S. A. Modeli bioimpedansa pri nelinejnoj vol'tampernoj kharakteristike i obratimom probe dielektricheskoy sostavlyayushchej biomateriala [Bioimpedance models with nonlinear current-voltage characteristic and reversible breakdown of the dielectric component of biomaterial] / S. A. Filist, O. V. Shatalova, A. S. Bogdanov // Byulleten' sibirskoj mediciny [Bulletin of Siberian Medicine]. 2014. Vol. 13. No. 4. P. 129–135 [In Russian].
 13. Popechitelev E. P. Sposoby i modeli identifikacii biomaterialov na osnove analiza mnogochastotnogo impedansa [Methods and models for identification of biomaterials based on multifrequency impedance analysis] / E. P. Popechitelev, S. A. Filist // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika. Medicinskoe priborostroenie [Proceedings of southwest state university. Series Control, computer engineering, information science. Medical instruments engineering] No. 1, 2011. P. 74–80 [In Russian].
 14. Kassim K. D. A. Parametricheskie modeli bioimpedansa dlya identifikacii funkcional'nogo sostoyaniya zhivoj sistemy [Parametric bioimpedance models for identification of the functional state of a living system] / K. D. A. Kassim, I. A. Klyuchikov, O. V. Shatalova, Z. D. Yaa // Biomedicinskaya radioelektronika [Biomedical radioelectronics]. 2012. No. 4. P. 50–56 [In Russian].
 15. Surzhikova S. E. Issledovanie provodimosti biomaterialov v bioaktivnykh tochkakh pri ciklicheskih vozdeystviyakh tokami razlichnoj polyarnosti [Study of the conductivity of biomaterials in bioactive points under cyclic exposure to currents of different polarity] / S. A. Filist, S. E. Surzhikova // Biomedicinskaya radioelektronika [Biomedical radioelectronics]. 2016. Vol. 9. P. 32–36 [In Russian].
 16. Filist S. A. Universal'nye setevye modeli dlya zadach klassifikacii biomedicinskikh dannykh [Universal network models for biomedical data classification problems] / S. A. Filist, R. A. Tomakova, Zar Do Yaa // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta [Proceedings of Southwest State University. Series Control, computer engineering, information science. Medical instruments engineering]. 2012. No. 4 (43), Part 2. P. 44–50 [In Russian].
 17. Surzhikova S. E. Programmno-apparatnyj kompleks dlya analiza vol'tampernykh kharakteristik bioaktivnykh tocek na osnove modulya L-Card E20-10 [Hardware and software complex for analyzing the current-voltage characteristics of bioactive points based on the L-Card E20-10 module] / S. E. Surzhikova, O. V. Shatalova, V. V. Fedyanin // Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie

tehnologii [Caspian Journal: Management and High Technologies]. 2015. No. 2 (30). P. 150–161 [In Russian].

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 004.5:004.8
ВАК 05.11.17, 05.15.01

Средства оценки мышечной нагрузки и мышечного утомления для управления экзоскелетом в комбинированном режиме

^{1*}Трифонов А. А., ¹ Кузьмин А. А., ² Петрунина Е. В., ¹ Кадырова С.

¹ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия)

²Московский государственный гуманитарно-экономический университет (Москва, Россия)

email: *voldraf@mail.ru, ku3bmin@gmail.com, petruninaelenav@gmail.com, kstu-bmi@yandex.ru

Для управления серводвигателями кинематических звеньев экзоскелета, работающего в комбинированном режиме, предложено использовать электромиосигнал, получаемый в результате мониторинга активности мышц, выполняющих соответствующие тестовые упражнения. Чтобы вычислить момент сил на кинематических звеньях экзоскелета, которые ассистируют этим мышцам, необходимо по многоканальному электромиосигналу определить объем необходимой помощи, то есть вычислить необходимый экзогенный момент на соответствующем звене экзоскелета. Для этого необходим классификатор электромиосигналов. Так как дешифрация электромиосигнала осуществляется посредством нейронной сети, то для ее обучения необходимо сформировать обучающие выборки, в которых паттернам электромиосигналов ставится в соответствие тарированная нагрузка на соответствующие мышцы. В статье рассмотрен метод и средства получения тарированных электромиосигналов.

Ключевые слова: лица с ограниченными возможностями здоровья, экзоскелет, электромиосигнал, нейронные сети, тензодатчик.

Введение

Экзоскелет – это носимое (надеваемое на человека) механическое устройство или программно-мехатронный комплекс с элементами антропоморфных структур, конструктивно предназначенный для преумножения физических возможностей человека путём синхронного дублирования и поддержки двигательной активности последнего. Экзоскелеты используются, как в биотехнических системах реабилитационного типа для компенсации недостатка подвижности лиц с ограниченными возможностями здоровья (ОВЗ), так и в качестве промышленных роботов, где экзоскелеты выполняют роль ассистента [1–3]. Объединяет эти две, казалось бы, совсем не связанные между собой области применения экзоскелетов, то обстоятельство, что для эффективной реабилитации или для эффективной помощи рабочему в выполнении операций, автоматизировать которые достаточно затруднительно, необходимо определить тот момент, когда сам оператор экзоскелета не справляется с текущей физической нагрузкой, то есть ему необходима помощь. Такая помощь может быть оказана в момент наступления мышечной слабости, под которой понимается снижение мышечной силы [4–6].

Таким образом, необходимо точно определить время появления снижения мышечной силы, а также роль экзоскелета в компенсации этой мышечной слабости, то есть вклад серводвигателей экзоскелета в процесс выполнения технологической операции или терапевтической процедуры.

В медицинской практике мышечную силу оценивают при помощи шкал. В настоящее время повсеместное распространение получила шкала Совета по медицинским исследованиям Великобритании (MRC):

0 – отсутствие видимых сокращений мышц;

1 – имеются видимые сокращения мышц, но движения в конечности отсутствуют;

- 2 – наблюдаются движения конечности, но без преодоления силы тяжести;
- 3 – возможны движения в конечности, способные преодолеть силу тяжести, но не сопротивление, оказываемое врачом;
- 4 – движения, способные, по меньшей мере, частично преодолеть сопротивление, оказываемое врачом;
- 5 – нормальная мышечная сила.

Затруднения в использовании этой и аналогичных шкал обусловлены значительным диапазоном величин мышечной силы между оценками в 4 и 5 баллов.

Более ясное представление о соотношении мышечной слабости и двигательных нарушений дают функциональные пробы. Пациента просят выполнить то или иное движение, выявляющее определенный двигательный дефект, который можно оценить количественно (например, по числу приседаний или шагов по лестнице, которые пациент в состоянии совершить). При попытке встать с корточек или поставить ногу на стул определяют силу мышц бедра; ходьба на пятках и носках определяет силу мышц голени и стопы. Отталкивание руками при вставании со стула указывает на слабость четырехглавой мышцы бедра. Раскачивающие движения туловищем для перемещения рук в другую позицию свидетельствуют о парезе мышц плечевого пояса. Силу кистей рук можно полуколичественно определить ручным динамометром или по степени сжатия пациентом надутой манжеты тонометра. Пациенты со слабостью мышц тазового пояса вынуждены вставать из положения лежа в определенной последовательности: сначала они переворачиваются со спины на живот, затем становятся на колени и постепенно выпрямляются, «карабкаясь» руками по бедрам (симптом Гувера).

Для построения реабилитационных систем для лиц с ОВЗ необходимо контролировать сигналы двигательной активности – сигналы центральной нервной системы (ЦНС). Наиболее доступным из этих сигналов является сигнал поверхностной электромиограммы (ЭМГ). Сигналы ЭМГ имеют специфическую структуру, характерную для различных типов движений суставов. Распознавание типа движения по сигналу ЭМГ позволяет контролировать различные протезы, экзоскелеты и может быть использовано при разработке реабилитационных биотехнических систем (БТС) [7, 8].

У лиц с ОВЗ основной режим работы БТС – режим «ассистента», в котором БТС должна контролировать внешнюю нагрузку на реабилитируемые органы пациента и реакцию на эту нагрузку соответствующих групп мышц. Если сам пациент справляется с тестовой нагрузкой, то помощь не нужна, и БТС работает в режиме монитора. В случае, если нагрузка не адекватна функциональному состоянию пациента или физической возможности рабочего, и выполнить заданное упражнение он не в состоянии, то БТС должна войти в активный режим и рассчитать объем необходимой помощи, то есть оценить свой вклад в выполняемое пациентом упражнение. Поэтому декодер ЭМГ должен определить не только тип движения и координаты конечности, но и усилие (момент), которое передается на соответствующий исполнительный орган.

При возникновении в организме во время мышечной работы биохимических и функциональных сдвигов с различных рецепторов (хеморецепторов, осморецепторов, проприорецепторов и др.) в ЦНС по афферентным (чувствительным) нервам поступают соответствующие сигналы. При достижении значительной глубины этих сдвигов в головном мозге формируется охранительное торможение, распространяющееся на двигательные центры, иннервирующие скелетные мышцы. В результате в мотонейронах уменьшается выработка двигательных импульсов, что в итоге приводит к снижению физической работоспособности. Субъективно охранительное торможение воспринимается как чувство усталости. Усталость снижается за счет эмоций, действия кофеина или природных адаптогенов. При действии седативных средств, в том числе препаратов брома, охранительное торможение возникает раньше, что приводит к ограничению работоспособности [9].

Для стимуляции сигналов ЭМГ в БТС используют различные стимулы, включая стимуляцию виртуальной реальностью (VR). Эти стимулы возбуждают двигательные нейроны и, в свою очередь, стимулируют потенциалы двигательных единиц (ДЕ) мышц [10]. Наиболее важные части ЭМГ (признаки) должны быть найдены, чтобы различать и классифицировать не только мышечные движения, но и мышечную усталость. Эти признаки представляют текущий сигнал в виде кода с информацией о конкретном движении конечностей. Эта информация декодируется в декодере или классификаторе. Учитывая временные ограничения на расшифровку команды,

исследователи предпочитают методы кодирования сигнала ЭМГ во временной области на основе анализа амплитуд сигналов. Основным требованием к коду является его простота приема и скорость его декодирования (классификация команды). Следующие значения во временной области, измеренные как функции времени, используются в качестве знаков: интегральная ЭМГ; средний; средняя стоимость модуля; конечные различия; сумма элементарных областей; дисперсия; стандартное отклонение; длина сигнала; максимальное значение сигнала ЭМГ. Более подробная информация о выборе признаков для классификации приведена в [4, 7, 8, 11].

Поскольку ЭМГ-сигнал можно рассматривать как случайный процесс с нулевым средним значением, то для регистрации поверхностной ЭМГ можно применить следующий способ. Этот способ записи сигнала носит название корень квадратный из среднего значения квадрата сигнала и при этом амплитуда ЭМГ аппаратно возводится в квадрат:

$$RMS = \frac{\sqrt{\int_t^{t+\Delta t} s(t)^2 dt}}{\sqrt{\Delta t}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N s(t_i)^2}{N-1}}, \quad (1)$$

где $s(t)$ – ЭМГ-сигнал, зарегистрированный с помощью АЦП в точках $s(t_i)$, Δt – период усреднения; N – количество отсчетов в окне длительностью Δt .

В англоязычной литературе такой способ записи ЭМГ называется RootMeanSquare (сокращенно RMS) [11]. Процесс усреднения реализуется аппаратно методом скользящей средней в 100 мс окне. Сглаженный сигнал считывается с частотой 100 Гц.

На рисунке 1 представлены RMS-сигналы при сгибании кисти с динамометром.

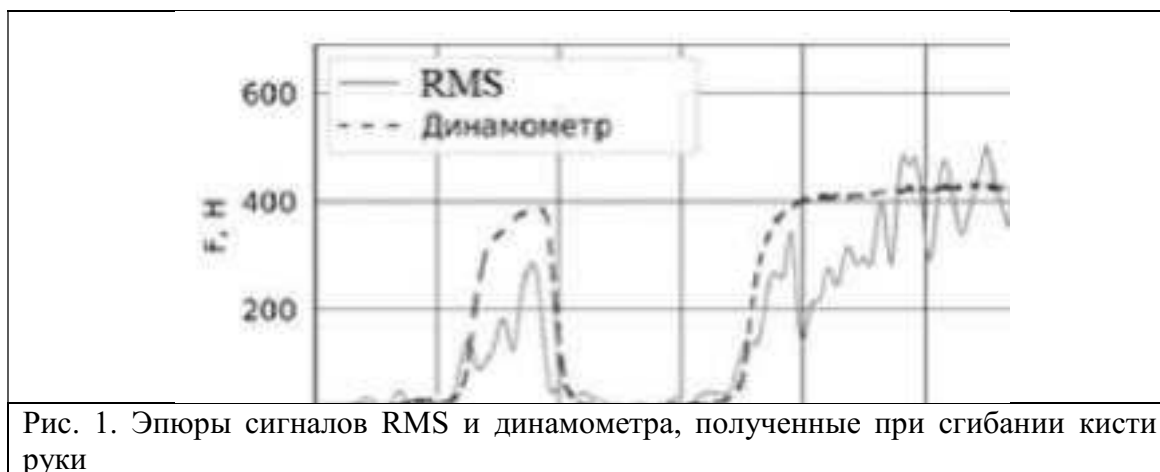


Рис. 1. Эюры сигналов RMS и динамометра, полученные при сгибании кисти руки

Эюры RMS сигналов и сигналы динамометра показывают, что по RMS сигналам можно определить как момент выполнения физической нагрузки, так и величину этой нагрузки на мышцы. Однако, чтобы зафиксировать момент утомления, необходимо контролировать не только ЭМГ-сигнал, но и динамику механической нагрузки на мышцы, что весьма затруднительно, как при использовании экзоскелета в медицинских, так и в промышленных целях.

Методы

Для измерения механической нагрузки на мышцы конечностей или на поясничные мышцы были построены обучаемые классификаторы, дескрипторы которых формировались на основе анализа ЭМГ соответствующих мышц [12–14]. Число каналов ЭМГ определялось количеством мышц, включаемых в выполнения тестовой процедуры. В каждом канале по результатам анализа ЭМГ формировались два дескриптора. Первый дескриптор характеризовал частотные свойства ЭМГ, а второй – амплитудные. Сигнал ЭМГ с усилителя биопотенциалов подавался на частотный детектор и амплитудный детектор, а затем осуществлялась низкочастотная фильтрация этих сигналов. Такая обработка сигнала ЭМГ осуществлялась на аппаратном уровне в реальном времени. Выбор окна обработки сигнала ЭМГ осуществлялся посредством выбора частот среза фильтров нижних частот на выходе частотного детектора и на выходе амплитудного детектора.

Классификаторы механической нагрузки и классификаторы утомления настраивались индивидуально для каждого оператора экзоскелета. Решающие правила по оказанию физической поддержки в выполнении терапевтических или технологических процедур с помощью экзоскелета формировались на экспертном уровне посредством правил нечеткой продукции [15].

Для калибровки реакции ЭМГ на эталонное воздействие на определенную мышцу необходимо подать разные по величине механические входные воздействия и исследовать реакцию ЭМГ на них. Для решения этой задачи использовалась двуглавую мышцу плеча и процесс сгибания руки с эталонной нагрузкой (рис. 2).

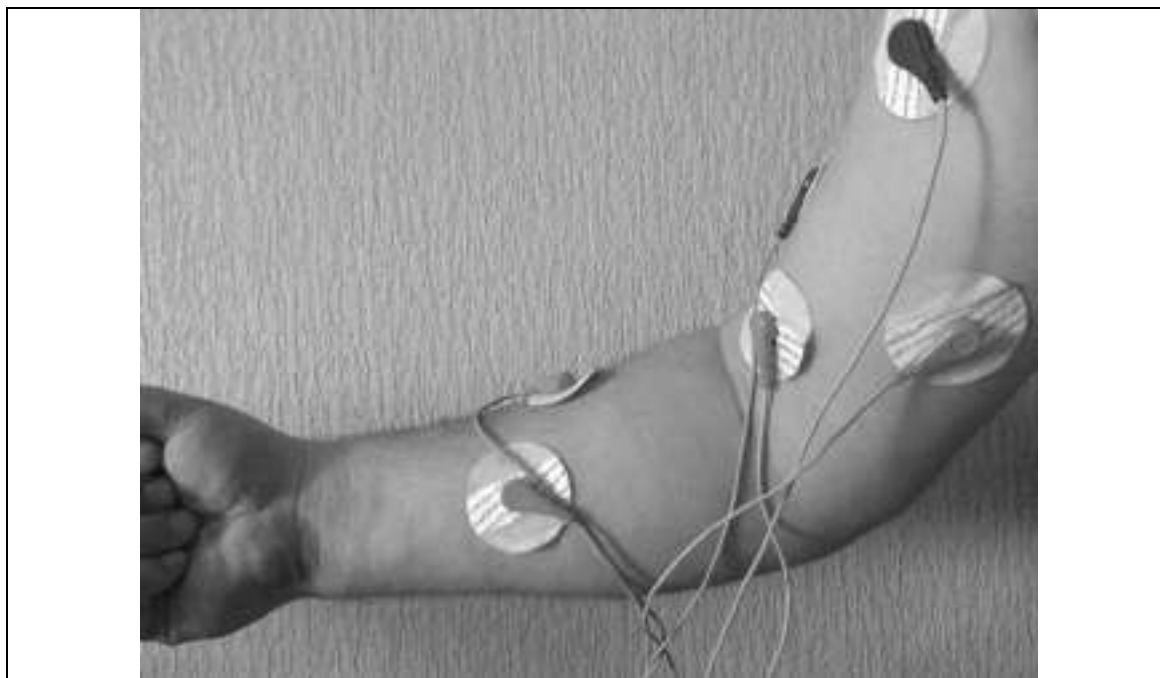


Рис. 2. Расположение электродов для контроля движения двуглавой мышцы

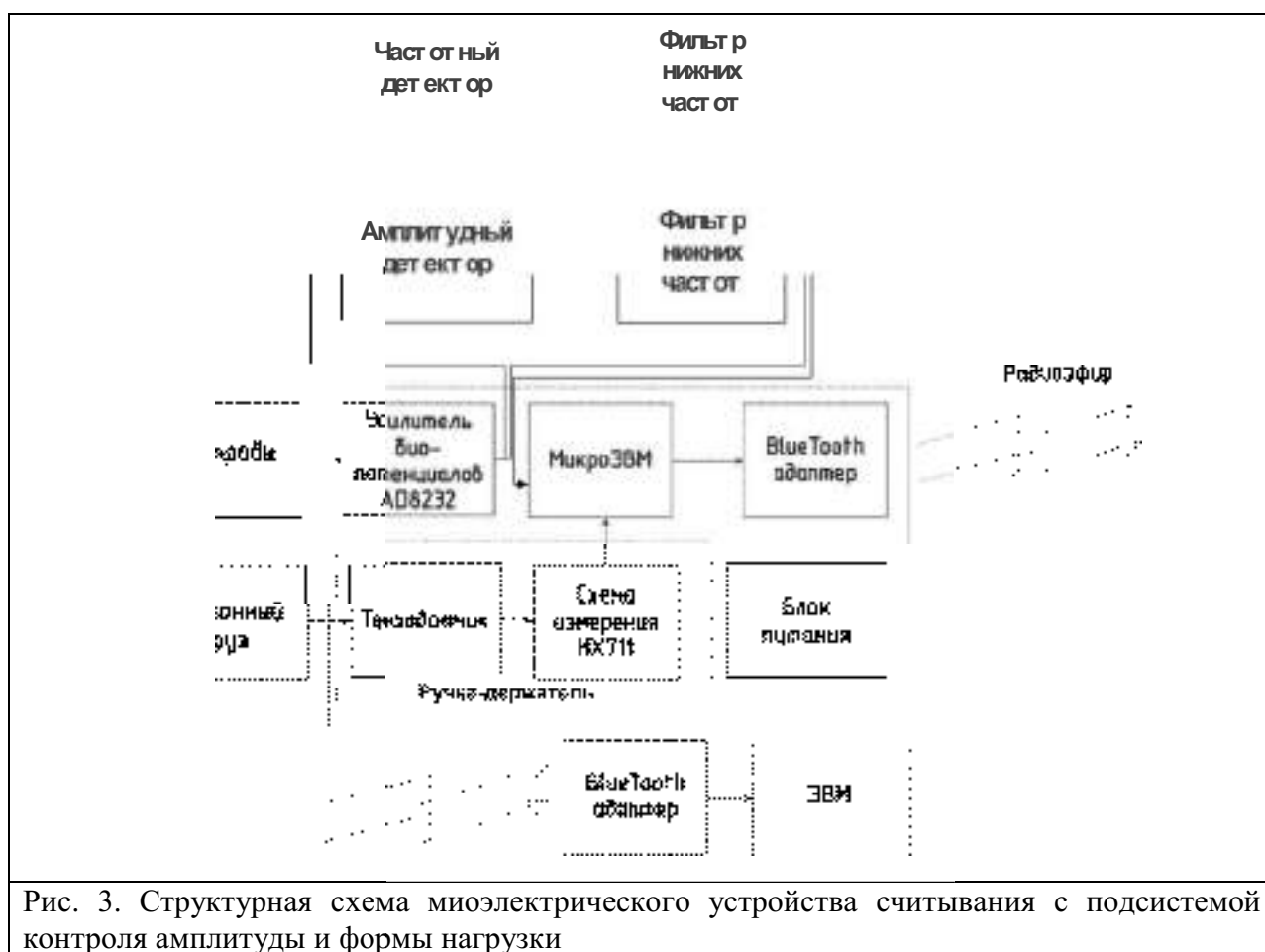
ЭМГ регистрировалась с помощью миоэлектрического устройства считывания (рис. 3). Миоэлектрическое устройство считывания представляет собой последовательно соединенные блок электродов, усилитель биопотенциалов, блок детекторов, микроЭВМ, первый адаптер BlueTooth, который посредством радиоэфира соединен со вторым адаптером BlueTooth, который подключен к ЭВМ.

В блок электродов входят несколько электродов (в зависимости от количества исследуемых каналов). Они снимают биопотенциалы с поверхности кожи. Данные биопотенциалы содержат множество помех (постоянные электрохимические потенциалы электродов, наводки от электромагнитных волн: сотовой связи, электрической сети, телевидения, радио и т.д.). Усилитель биопотенциалов необходим, чтобы усилить сигнал и очистить его от помех. Усилитель биопотенциалов построен по дифференциальной схеме, позволяющей избавиться от синфазных помех. Также внутри усилителя есть фильтры для фильтрации противофазных помех. Усилитель биопотенциалов реализован на одной микросхеме типа AD8232.

После прохождения сигнала через фильтры усилителя биопотенциалов его расщепляют на два канала: частотный и амплитудный. В первом канале осуществляется частотная демодуляция сигнала с последующей низкочастотной фильтрацией, а во втором канале – амплитудная демодуляция с последующей низкочастотной фильтрацией. Учитывая, что в RMS технологии для обработки ЭМГ используется скользящее окно 100 мс, то частота среза фильтров нижних частот выбрана 30 Гц. Сигналы в этих каналах необходимо оцифровать и отформатировать согласно спецификациям адаптера BlueTooth для последующей передачи по радиоканалу. Эту работу выполняет микроЭВМ (микроконтроллер), который благодаря встроенному модулю АЦП переводит его из аналоговой формы в цифровую.

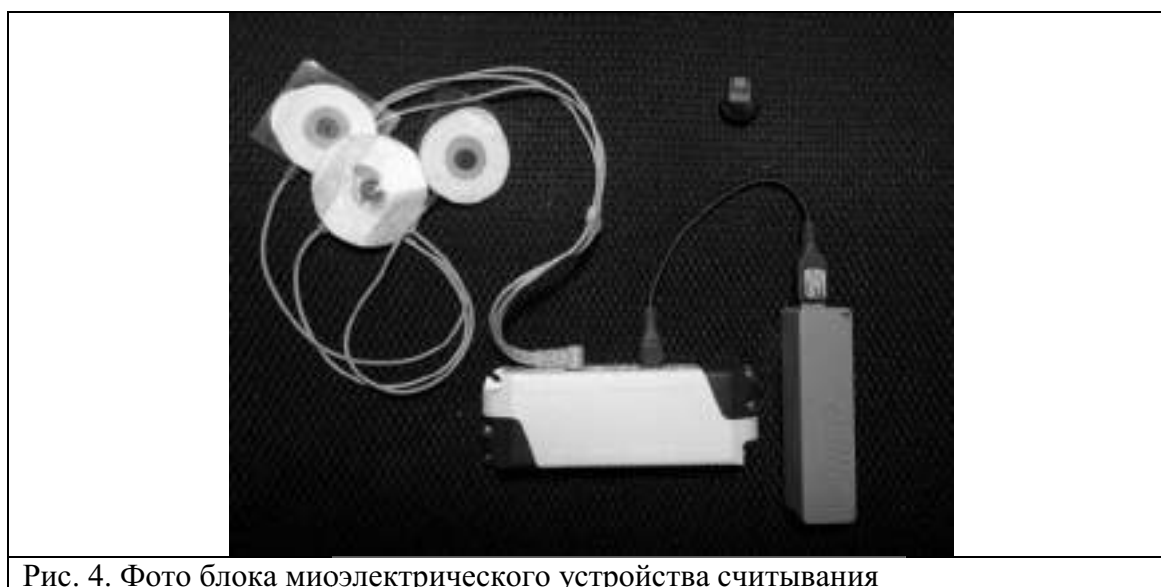
Также микроконтроллер принимает отсчеты от подсистемы контроля амплитуды и формы нагрузки. Цифровой сигнал от микроЭВМ формируется в кадры и поступает в Bluetooth адаптер

для передачи по радиоканалу согласно протоколам Bluetooth. Радиоканал обеспечивает мобильность устройства и его электрическую безопасность.



Далее сигнал поступает во второй Bluetooth адаптер на стороне ЭВМ, после чего непосредственно в ЭВМ. ЭВМ регистрирует сигналы, декодирует их, распознает данные и визуализирует их на экране. Блок питания обеспечивает устройство электроэнергией.

Фотография микроэлектрического устройства считывания показана на рис. 4.



Результаты

Процесс воздействия стимулирующего ЭМГ усилия иллюстрирует кинематическая схема, представленная на рис. 5. Кинематическое звено 1 (модель кисти руки с рис. 2) жестко связана с консолью 2, в середине которой закреплен тензодатчик 3. К свободному концу консоли 3 прикреплена тарированная пружина 4, на которую подвешивается груз 5. Посредством шкалы 6 и указателя 7 величина груза может быть измерена.

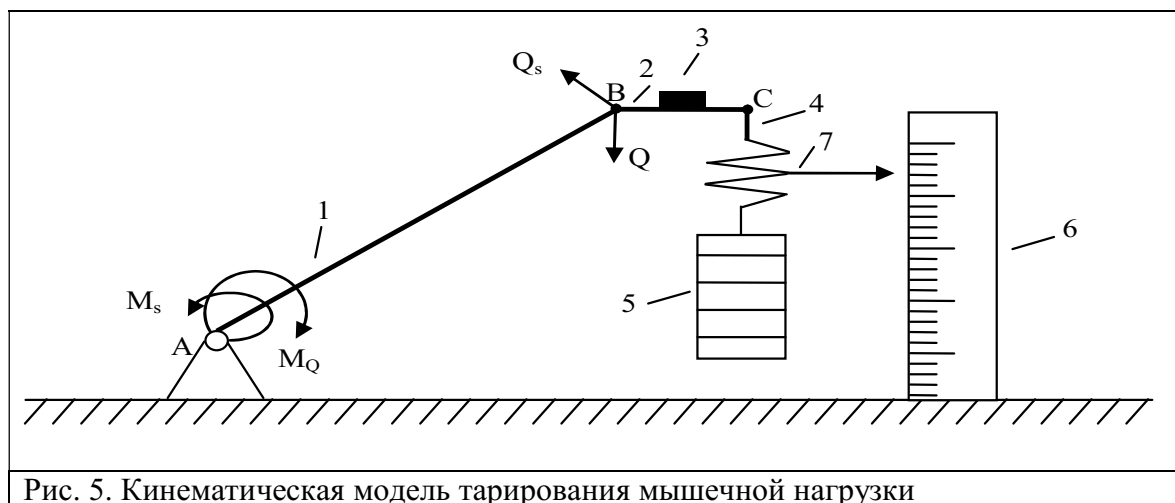


Рис. 5. Кинематическая модель тарирования мышечной нагрузки

Сила Q моделирует эталонную нагрузку, которой соответствует момент $M_Q = Q \cdot AB \cdot \sin \varphi$, где $Q \cdot \sin \varphi$ – проекция Q на направление, перпендикулярное AB . Момент M_S – это сумма моментов мышц и экзогенных моментов, получаемых посредством серводвигателей экзоскелета.

ЭМГ в этом процессе отражает реакцию мышцы на предъявление нагрузки определенного уровня. Для контроля амплитуды и формы сил, действующих на исследуемую мышцу, будем прикладывать нагрузку через измерительный тензодатчик, закрепленный на специальной ручке-держателе (рис. 6), которые вместе образуют подсистему контроля амплитуды и формы нагрузки.

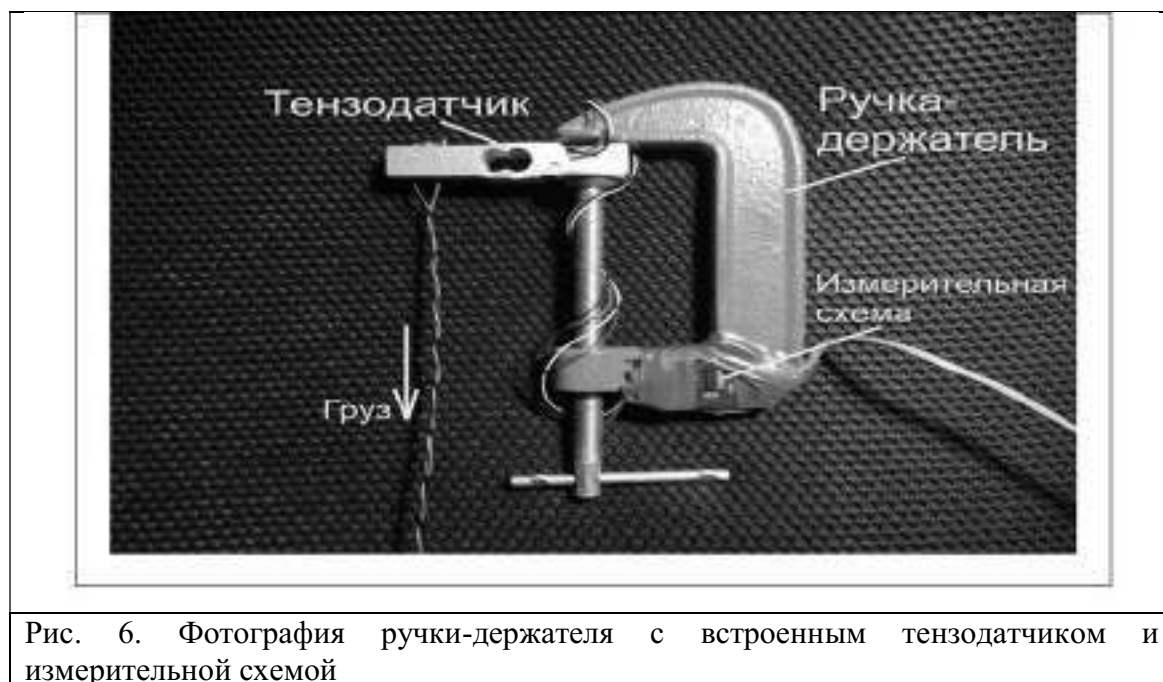


Рис. 6. Фотография ручки-держателя с встроенным тензодатчиком и измерительной схемой

Для калибровки тензодатчика вычислялись силы Q , моменты M , прогибы D в различных координатах консоли, на которой установлен тензодатчик. Эпюры этих рассчитанных величин представлены на рис. 7. Тензодатчик 3 установлен на середине консоли BC 2, которая жестко закреплена в точке B с кинематическим звеном 1. Используя эпюры рис. 7 можем рассчитать динамический диапазон сигнала с тензодатчика, а также его функцию преобразования.

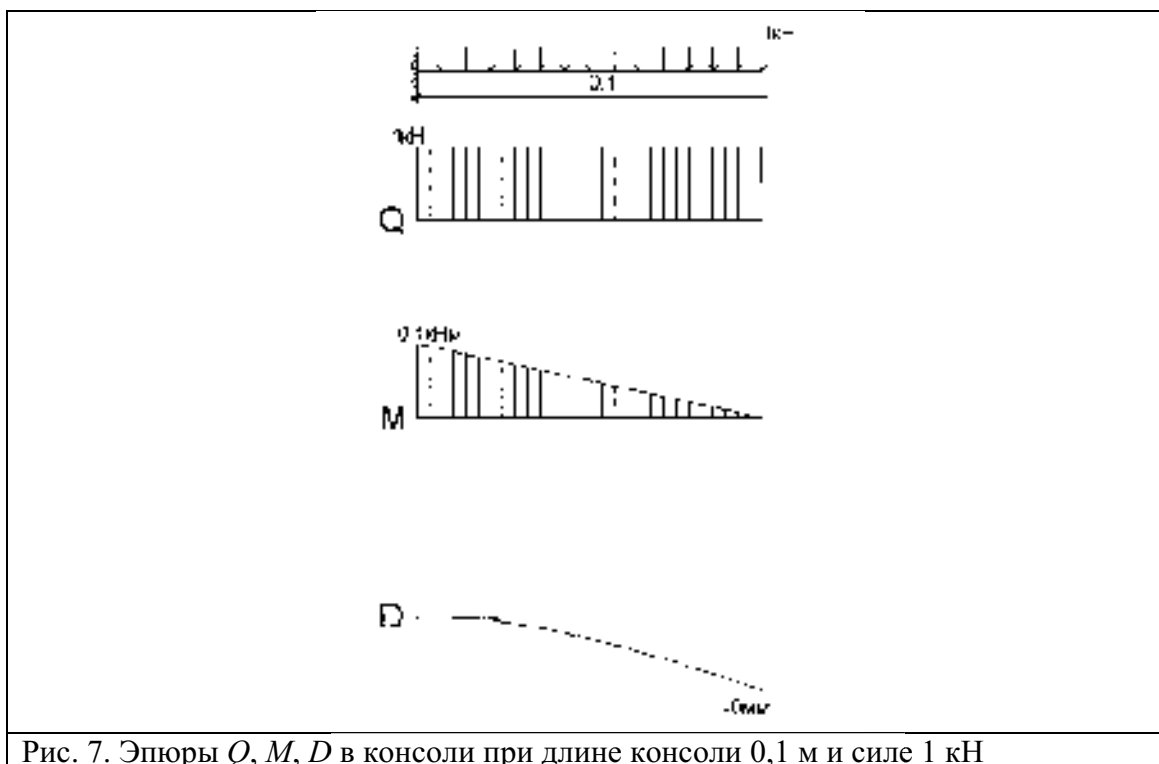


Рис. 7. Эпюры Q , M , D в консоли при длине консоли 0,1 м и силе 1 кН

На рис. 8 показаны эпюры напряжений в одном из каналов ЭМГ и в канале тензометрического датчика, измеряющего величину мышечной нагрузки.



Рис. 8. Эпюры напряжения в канале ЭМГ и в канале измерения мышечной нагрузки

На следующем этапе исследований были выбраны 10-секундные интервалы в сигнале ЭМГ на определенной механической нагрузке двуглавой мышцы. Одна из целей этого исследования заключалась в разработке решающего правила для измерения уровня утомляемости мышц людей, поэтому вычисления необходимо проводить в реальном времени. Кроме того, важно достижение точности определения величины механической нагрузки по анализу ЭМГ и показателей качества классификации утомления на основе предлагаемого метода. С этой целью увеличивалось количество экспериментов, то есть количество сокращений мышц при одной и той же нагрузке. Большее количество сокращений мышц не только дает большую точность, но и требует больше времени эксперимента, поэтому были учтены оба этих обстоятельства. Обучающая выборка строилась на основе пятидесяти, ста и двухсот сокращений мышцы при линейно изменяющейся механической нагрузке (см. рис. 6). Для определения величины механической нагрузки по параметрам ЭМГ использовалась модель линейной регрессии и обучаемая нейронная сеть с линейной функцией активации. Модель линейной регрессии строилась в программе MATHCAD 15, нейронные сети прямого распространения моделировались в интерактивной среде MATLAB R2018b.

В экспериментах участвовало десять мужчин, средний возраст 22 ± 2 года. Все они были здоровы и не имели хронических заболеваний. У этих участников была практически одинаковая масса тела,

они были одинаково физически развиты и не занимались профессионально спортом. Получено информированное согласие участников на эксперимент.

Средняя ошибка при определении величины нагрузки на мышцы составила 10,5, 9,2 и 6,5 %, соответственно, при использовании линейной регрессионной модели и 11,5, 9 и 5,5 %, соответственно, при использовании в качестве аппроксиматора многослойной нейронной сети прямого распространения. Как видно, точность на пятидесяти и ста опытах близки друг к другу, поэтому мы выбрали 100 сокращений мышцы в качестве основного пула при формировании обучающих и контрольных выборок.

Для классификации уровня утомления использовался классический дискриминантный анализ и нейросетевой классификатор на основе многослойного персептрона. Тест с нагрузкой проводился в течение 15 минут. По результатам исследования 15-минутное время теста было разделено на три части, соответствующие трем кластерам утомления. Отрезки сигналов ЭМГ у испытуемых содержали записи до 90-й секунды, с 90-й до 600-й секунды, с 600-й по 900-ю секунду. Обучающая выборка строилась на основе пятидесяти, ста и двухсот экспериментов на одного испытуемого. Средняя ошибка при определении величины утомления мышцы по экспериментальной группе по выделенным временным кластерам утомления составила 19,5, 18 и 18,5 %, соответственно, при использовании модели классификатора, построенного на основе классического дискриминантного анализа, и 12,5, 9,5 и 7,5 %, соответственно, при использовании в качестве классификатора многослойной нейронной сети прямого распространения.

Заключение

Для управления экзоскелетом в режиме ассистента (в комбинированном режиме) в БТС целесообразно использовать нейросетевой дешифратор ЭМГ с дублирующими каналами [16–18] и с дескрипторами, полученными на основе частотной и амплитудной демодуляции ЭМГ. Так как дешифрация электромиосигнала осуществляется посредством нейронной сети, то для ее обучения необходимо сформировать обучающие выборки, в которых паттернам электромиосигналов ставится в соответствие тарированная нагрузка на соответствующие мышцы и уровень утомления этих мышц. В каждом канале ЭМГ осуществляется оценка величины нагрузки на соответствующие мышцы и классификация утомления. В дальнейших исследованиях планируется использовать многоканальные классификаторы утомления и мышечной нагрузки и наряду с амплитудно и частотно демодулированными сигналами ЭМГ использовать показатели синхронности возбуждения мышц для более точного дифференцирования мышечного утомления [19].

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90112.

Список литературы

1. Трифонов А. А., Кузьмин А. А., Филист С. А., Петрунина Е. В. Нейросетевая модель для управления вертикализацией экзоскелета в комбинированном режиме // Нейроинформатика, её приложения и анализ данных. Материалы XXVIII Всероссийского семинара. Красноярск, 2020. С. 111–116.

2. Аль-Баредда А. Я. С., Брежнева А. Н., Томакова Р. А. Алгоритмы синтеза оптимального управления в биотехнических системах реабилитационного типа на основе технологий нейронных сетей // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2018. Т. 17, № 3. С. 750–754.
3. Пат. № 2635632, Российская Федерация, А61F 2/72, А61F 2/68, А61F 2/62. Способ и система управления интеллектуальной бионической конечностью / Н. М. Иванюк, В. Р. Каримов, Р. Ю. Будко, П. В. Гронский, С. М. Клейман; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Бионик Натали». Заявл. 14.12.2016;опубл. 14.11.2017. Бюл. № 32.
4. Филист С. А., Петрунина Е. В., Трифонов А. А., Серебровский А. В. Кодовые образы сигналов электроэнцефалограммы для управления робототехническими устройствами посредством интерфейса мозг-компьютер // Научный журнал. Том 7, № 1. С. 67–79.
5. Трифонов А. А., Петрунина Е. В., Филист С. А., Кузьмин А. А., Жилин В. В. Биотехническая система с виртуальной реальностью в реабилитационных комплексах с искусственными обратными связями // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. 9 (4). С. 49–66.
6. Трифонов А. А., Кузьмин А. А., Мяснянкин М. Б., Филист С. А. Реабилитационная биотехническая система с электромиографическим контуром управления // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ2020. Труды XIV Международной научной конференции с научной молодежной школой им. И. Н. Спиридонова. 2020. С. 128–133.
7. Бобе А. С., Коньшев Д. В., Воротников С. А. Использование паттернов ЭМГ в задаче распознавания цикла ходьбы человека // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2016. № 3 (35). С. 21–28.
8. Будко Р. Ю., Страченко И. Б. Создание классификатора мимических движений на основе анализа электромиограммы // Труды СПИИРАН. 2016. Вып. 46. С. 76–89.
9. Clinical Model to the Analysis of Synergy Pattern Changes of Back Muscles and its Relationship with the Occurrence of Fatigue / Armin Hak Kak Moghaddam Torbati, Ehsan Tahami and Hamid Reza Kobravi // The Open Bioinformatics Journal, 2018.11. P.53–60.
10. Киселев А. В., Петрова Т. В., Дегтярев С. В., Рыбочкин А. Ф., Филист С. А., Шаталова О. В. [и др.] Нейросетевые модули с виртуальными потоками для классификации и прогнозирования функционального состояния сложных систем // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. № 4 (79). С. 123–134.
11. Atae Pedram and Aleem Idris S. Patent US, 20150370333 A1, G 06 F 3/01. applicant: Thalmic Labs Inc. – Appl. No.: 14/737,081, Filed: Jun. 11, 2015. Pub. Date: Dec. 24, 2015. 27 p.
12. Филист С. А., Шаталова О. В., Ефремов М. А. Гибридная нейронная сеть с макрослоями для медицинских приложений // Нейрокомпьютеры. Разработка и применение. 2014. № 6. С. 35–39.
13. Филист С. А., Томакова Р. А., Шаталова О. В., Кузьмин А. А., Кассим К. Д. Али. Метод классификации сложноструктурируемых изображений на основе самоорганизующихся нейросетевых структур // Радиопромышленность. 2016. № 4. С. 57–65.
14. Белых В. С., Ефремов М. А., Филист С. А. Разработка и исследование метода и алгоритмов для интеллектуальных систем классификации сложноструктурируемых изображений // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2016. № 2 (19). С. 12–24.
15. Филист С. А., Абдул Рахим Салем Халед, Шаталова О. В., Руденко В. В. Модели нечетких нейронных сетей с трехстабильным выходом в инструментарии для психологических и физиологических исследований // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2007. Т. 6, № 2. С. 475–479.
16. Трифонов А. А., Кузьмин А. А., Филист С. А., Петрунина Е. В. Нейросетевая модель для управления вертикализацией экзоскелета в комбинированном режиме // Нейроинформатика, её приложения и анализ данных. Материалы XXVIII Всероссийского семинара. Красноярск, 2020. С. 111–116.
17. Trifonov A. A., Kuzmin A. A., Filist S. A., Petrunina E. V. Neural network model in the exoscelete verticalization control system // Journal of Physics: Conference Series. Krasnoyarsk Science and

Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russian Federation, 2020. P. 32036.

18. Трифонов А. А., Филист С. А., Кузьмин А. А., Жилин В. В., Петрунина Е. В. Двухуровневая нейросетевая модель дешифратора электромиосигнала в системе управления вертикализацией экзоскелета // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2020. № 4 (52). С. 99–111.

19. Петрова Т. В., Филист С. А., Дегтярев С. В., Киселев А. В., Шаталова О. В. Предикторы синхронности системных ритмов живых систем для классификаторов их функциональных состояний // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2018. Т. 17. № 3. С. 693–700.

Muscle load and muscle fatigue assessment tools for combined exoskeleton control

^{1*}Trifonov A. A., ¹Kuzmin A. A., ²Petrulina E. V., ¹Kadyrova S.

¹ *Southwest State University (Kursk, Russia)*

² *Moscow State University for the Humanities and Economics (Moscow, Russia)*

email: *voldraf@mail.ru, ku3bmin@gmail.com, petruninaelenav@gmail.com, kstu-bmi@yandex.ru

To control the servo motors of the kinematic links of the exoskeleton operating in a combined mode, it is proposed to use an electromyosignal obtained as a result of monitoring the activity of muscles performing the corresponding test exercises. In order to calculate the moment of forces on the kinematic links of the exoskeleton, which assist these muscles, it is necessary to determine the amount of necessary assistance by the multichannel electromyosignal, that is, to calculate the required exogenous moment on the corresponding link of the exoskeleton. This requires an electromyosignal classifier. Since the decoding of the electromyosignal is carried out by means of a neural network, for its training it is necessary to form training samples in which the calibrated load on the corresponding muscles is assigned to the patterns of electromyosignals. The article describes the method and means of obtaining calibrated electromyosignals. *Keyword:* persons with disabilities, exoskeleton, electromyosignal, neural networks, strain gauge

Funding

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 19-38-90112.

References

1. Trifonov A. A., Kuzmin A. A., Filist S. A., Petrunina E. V. Neurosetevaya model dlya upravleniya vertikalizatsiei ehkzoskeleta v kombinirovannom rezhime [Neural network model for controlling the verticalization of an exoskeleton in a combined mode] // Neuroinformatika, ee prilozheniya i analiz dannykh. Materialy XXVIII Vserossiiskogo seminar [Neuroinformatics, its applications and data analysis. Materials of the XXVIII All-Russian Seminar]. Krasnoyarsk, 2020. P. 111–116 (In Russian).
2. Al-Bareda A. Ya. S., Brezhneva A. N., Tomakova R. A. Algoritmy sinteza optimalnogo upravleniya v biotekhnicheskikh sistemakh reabilitatsionnogo tipa na osnove tekhnologii neironnykh setei [Optimal control synthesis algorithms in biotechnical systems of rehabilitation type based on neural network technologies] // Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh [Systems analysis and control in biomedical systems]. 2018. Vol. 17, No. 3. P. 750–754 (In Russian).
3. Pat. № 2635632, Rossiiskaya Federatsiya, A61F 2/72, A61F 2/68, A61F 2/62. Sposob i sistema upravleniya intellektualnoi bionicheskoi konechnostyu [Method and system of intelligent bionic limb control] / N. M. Ivanyuk, V. R. Karimov, R. Yu. Budko, P. V. Gronskii, S. M. Kleiman; zayavitel i patentoobladatel Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennostyu «BionikNatalI». Zayavl. 14.12.2016; opubl. 14.11.2017. Byul. № 32 (In Russian).
4. Filist S. A., Petrunina E. V., Trifonov A. A., Serebrovskii A. V. Kodovye obrazy signalov ehlektroehntsefalogrammy dlya upravleniya robototekhnicheskimi ustroystvami posredstvom interfeisa

- mozg-kompyuter [Electroencephalogram signal codes for control of robotic devices via a brain-computer interface] // Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii. Nauchnyi zhurnal [Modeling, optimization and information technology. Science Magazine]. Vol. 7, No. 1. P. 67–79 (In Russian).
5. Trifonov A. A., Petrunina E. V., Filist S. A., Kuzmin A. A., Zhilin V. V. Biotekhnicheskaya sistema s virtualnoi realnostyu v reabilitatsionnykh kompleksakh s iskusstvennymi obratnymi svyazyami [Biotechnical system with virtual reality in rehabilitation complexes with artificial feedback] // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie [Proceedings of Southwest State University. Series Control, computer engineering, information science. Medical instruments engineering]. 2019. No. 9 (4). P. 49–66 (In Russian).
 6. Trifonov A. A., Kuzmin A. A., Myasnyankin M. B., Filist S. A. Reabilitatsionnaya biotekhnicheskaya sistema s ehlektromiograficheskim konturom upravleniya [Rehabilitation biotechnical system with electromyographic control loop] // Fizika i radioehlektronika v meditsine i ehkologii – FREHMEH 2020. Trudy XIV Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii s nauchnoi molodezhnoi shkoloj im. I. N. Spiridonova [Physics and radioelectronics in medicine and ecology – FREM'2020. Proceedings of the XIV International Scientific Conference with the Scientific Youth School named after I. N. Spiridonova]. 2020. P. 128–133 (In Russian).
 7. Bobe A. S., Konyshev D. V., Vorotnikov S. A. Ispolzovanie patternov EHMГ v zadache raspoznavaniya tsikla khodby cheloveka [The use of EMG patterns in the task of recognizing the human walking cycle] // Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii [Caspian Journal: Management and High Technologies]. 2016. No. 3 (35). P. 21–28 (In Russian).
 8. Budko R. Yu., Strachenko I. B. Sozdanie klassifikatora mimicheskikh dvizhenii na osnove analiza ehlektromiogrammy [Creation of a classifier of facial movements based on the analysis of electromyogram] // Trudy SPIIRAN [SPIIRAS Proceedings]. 2016. Vol. 46. P. 76–89 (In Russian).
 9. Clinical Model to the Analysis of Synergy Pattern Changes of Back Muscles and its Relationship with the Occurrence of Fatigue / Armin Hak Kak Moghaddam Torbati, Ehsan Tahami and Hamid Reza Kobravi // The Open Bioinformatics Journal, 2018. 11. P. 53–60 (In Russian).
 10. Kiselev A. V., Petrova T. V., Degtyarev S. V., Rybochkin A. F., Filist S. A., Shatalova O. V. [et. al.] Neurosetevye moduli s virtualnymi potokami dlya klassifikatsii i prognozirovaniya funktsionalnogo sostoyaniya slozhnykh system [Neural network modules with virtual flows for classification and prediction of the functional state of complex systems] // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta [Proceedings of Southwest State University. Series Control, computer engineering, information science. Medical instruments engineering]. 2018. No. 4 (79). P. 123–134 (In Russian).
 11. Atae Pedram and Aleem Idris S. Patent US, 20150370333 A1, G 06 F 3/01. applicant: Thalmic Labs Inc. – Appl. No.: 14/737,081, Filed: Jun. 11, 2015. Pub. Date: Dec. 24, 2015. 27 p.
 12. Filist S. A., Shatalova O. V., Efremov M. A. Gibridnaya neironnaya set s makrosloyami dlya meditsinskikh prilozhenii [Hybrid neural network with macro layers for medical applications] // Neurokompyutery. Razrabotka i primenenie [Neurocomputers. Development and application]. 2014. No. 6. P. 35–39 (In Russian).
 13. Filist S. A., Tomakova R. A., Shatalova O. V., Kuzmin A. A., Kassim K. D. Ali. Metod klassifikatsii slozhnostrukturiruemykh izobrazhenii na osnove samoorganizuyushchikhsya neurosetevykh struktur [Classification method for complexly structured images based on self-organizing neural network structures] // Radiopromyshlennost [Radio industry]. 2016. No. 4. P. 57–65 (In Russian).
 14. Belykh V. S., Efremov M. A., Filist S. A. Razrabotka i issledovanie metoda i algoritmov dlya intellektualnykh system klassifikatsii slozhnostrukturiruemykh izobrazhenii [Development and research of a method and algorithms for intelligent classification systems for complexly structured images] // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie [Proceedings of southwest state university. Series Control, computer engineering, information science. Medical instruments engineering]. 2016. No. 2 (19). P. 12–24 (In Russian).
 15. Filist S. A., Abdul Rakhim Salem Khaled, Shatalova O. V., Rudenko V. V. Modeli nechetkikh neironnykh setei s trekhstabilnym vykhodom v instrumentarii dlya psikhologicheskikh i fiziologicheskikh issledovaniy [Models of fuzzy neural networks with three-stable output in tools for psychological and

- physiological research] // *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh* [Systems analysis and control in biomedical systems]. 2007. Vol. 6, No. 2. P. 475–479 (In Russian).
16. Trifonov A. A., Kuzmin A. A., Filist S. A., Petrunina E. V. Neurosetevaya model dlya upravleniya vertikalizatsiei ehkzoskeleta v kombinirovannom rezhime [Neural network model for controlling the verticalization of an exoskeleton in a combined mode] // *Neuroinformatika, ee prilozheniya i analiz dannykh. Materialy XXVIII Vserossiiskogo seminar* [Neuroinformatics, its applications and data analysis. Materials of the XXVIII All-Russian Seminar]. Krasnoyarsk, 2020. P. 111–116 (In Russian).
17. Trifonov A. A., Kuzmin A. A., Filist S. A., Petrunina E. V. Neural network model in the exoscelete verticalization control system // *Journal of Physics: Conference Series*. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russian Federation, 2020. P. 32036.
18. Trifonov A. A., Filist S. A., Kuzmin A. A., Zhilin V. V., Petrunina E. V. Dvukhurovnevaya neurosetevaya model deshifatora ehlektromiosignala v sisteme upravleniya vertikalizatsiei ehkzoskeleta [Two-level neural network model of an electromyosignal decoder in the exoskeleton verticalization control system] // *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies]. 2020. No. 4 (52). P. 99–111 (In Russian).
19. Petrova T. V., Filist S. A., Degtyarev S. V., Kiselev A. V., Shatalova O. V. Prediktory sinkhronnosti sistemnykh ritmov zhivykh system dlya klassifikatorov ikh funktsionalnykh sostoyanii [Predictors of synchronicity of systemic rhythms of living systems for classifiers of their functional states] // *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh* [Systems analysis and control in biomedical systems]. 2018. Vol. 17. No. 3. P. 693–700 (In Russian).