

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-880-886

УДК 538. 953-405

## Измерение теплоемкости и теплопроводности объемных кристаллов $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ и $\beta\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ , выращенных методом Чохральского

Дмитрий Андреевич Бауман<sup>1</sup>, Дмитрий Юрьевич Панов<sup>2</sup>,  
 Владислав Алексеевич Спиридонов<sup>3</sup>✉, Арина Валерьевна Кремлева<sup>4</sup>,  
 Максим Анатольевич Одноблюдов<sup>5</sup>, Алексей Владимирович Асач<sup>6</sup>,  
 Василий Александрович Крылов<sup>7</sup>, Григорий Николаевич Исаченко<sup>8</sup>,  
 Екатерина Викторовна Тамбулатова<sup>9</sup>, Владислав Евгеньевич Бугров<sup>10</sup>,  
 Алексей Евгеньевич Романов<sup>11</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>1</sup> [dabauman@itmo.ru](mailto:dabauman@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5762-5920>

<sup>2</sup> [Dmitriipnv@gmail.com](mailto:Dmitriipnv@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-8715-9505>

<sup>3</sup> [vladspiridonov@itmo.ru](mailto:vladspiridonov@itmo.ru)✉, <https://orcid.org/0000-0001-5751-8597>

<sup>4</sup> [avkremleva@itmo.ru](mailto:avkremleva@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7045-0918>

<sup>5</sup> [maxim.odnobludov@spbstu.ru](mailto:maxim.odnobludov@spbstu.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3021-6892>

<sup>6</sup> [avasach@itmo.ru](mailto:avasach@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9509-2048>

<sup>7</sup> [vakrylov@itmo.ru](mailto:vakrylov@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3105-2172>

<sup>8</sup> [g.isachenko@itmo.ru](mailto:g.isachenko@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1763-4224>

<sup>9</sup> [evtambulatoва@itmo.ru](mailto:evtambulatoва@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7517-1651>

<sup>10</sup> [Vladislav.bugrov@niuitmo.ru](mailto:Vladislav.bugrov@niuitmo.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5380-645X>

<sup>11</sup> [alexey.romanov@niuitmo.ru](mailto:alexey.romanov@niuitmo.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3738-408X>

### Аннотация

**Предмет исследования.** Одна из областей применения объемных кристаллов оксида галлия — изготовление подложек для проведения эпитаксиального выращивания приборных структур силовой электроники и оптоэлектроники в системе  $\text{Ga}_2\text{O}_3/(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ . Для большинства конструкций приборов подложка является каналом отведения тепла от прибора к внешнему радиатору. Данное свойство делает информацию о тепловых характеристиках объемных кристаллов оксида галлия и твердого раствора оксидов галлия и алюминия, в частности о теплоемкости и теплопроводности критически важной. В работе проведено измерение теплоемкости объемных кристаллов  $\beta$ -модификации чистого оксида галлия ( $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ), полученных методом Чохральского, а также двойного твердого раствора  $\beta$ -оксида галлия и оксида алюминия  $\beta\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$  для различных значений концентрации Al в диапазоне температур 25–480 °С. **Метод.** Образцы объемных кристаллов выращены в промышленной установке «Ника-3» методом вытягивания из расплава (метод Чохральского). Затем на образцах, специальным образом подготовленных из объемных кристаллов, методом дифференциальной сканирующей калориметрии измерена удельная теплоемкость. Методом с применением плоского источника тепла (метод горячего диска) измерена теплопроводность в кристаллографическом направлении [010]. **Основные результаты.** Получена зависимость удельной теплоемкости кристаллов  $\beta\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$  для значений атомной концентрации алюминия, которая лежит в диапазоне от 0 (чистый оксид галлия) до 9,11 ат.%. Выполнен анализ влияния содержания Al на теплоемкость материала. Получена зависимость теплопроводности  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  от температуры, в направлении роста [010], в диапазоне температур 43–120 °С. **Практическая значимость.** Результаты исследования могут найти применение при дальнейшем изучении тепловых свойств оксида галлия, а также при решении задачи отвода тепла для приборов, основанных на оксиде галлия.

### Ключевые слова

оксид галлия, объемные кристаллы, метод Чохральского, теплоемкость, теплопроводность

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00686).

© Бауман Д.А., Панов Д.Ю., Спиридонов В.А., Кремлева А.В., Одноблюдов М.А., Асач А.В., Крылов В.А., Исаченко Г.Н., Тамбулатова Е.В., Бугров В.Е., Романов А.Е., 2021

**Ссылка для цитирования:** Бауман Д.А., Панов Д.Ю., Спиридонов В.А., Кремлева А.В., Одоблюдов М.А., Асач А.В., Крылов В.А., Исаченко Г.Н., Тамбулатова Е.В., Бугров В.Е., Романов А.Е. Измерение теплоемкости и теплопроводности объемных кристаллов  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и  $\beta$ -(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, выращенных методом Чохральского // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 6. С. 880–886. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-880-886

## Measurements of heat capacity and thermal conductivity of $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and $\beta$ -(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bulk crystals grown by the Czochralski method

Dmitrii A. Bauman<sup>1</sup>, Dmitrii Yu. Panov<sup>2</sup>, Vladislav A. Spiridonov<sup>3</sup>✉, Arina V. Kremleva<sup>4</sup>, Maxim A. Odnoblyudov<sup>5</sup>, Aleksei V. Asach<sup>6</sup>, Vasilii A. Krylov<sup>7</sup>, Grigory N. Isachenko<sup>8</sup>, Ekaterina V. Tambulatoва<sup>9</sup>, Vladislav E. Bougrov<sup>10</sup>, Alexey E. Romanov<sup>11</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>1</sup> dabauman@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5762-5920>

<sup>2</sup> Dmitriipnv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8715-9505>

<sup>3</sup> vladspiridonov@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-5751-8597>

<sup>4</sup> avkremleva@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7045-0918>

<sup>5</sup> maxim.odnobyudov@spbstu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3021-6892>

<sup>6</sup> avasach@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9509-2048>

<sup>7</sup> vakrylov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3105-2172>

<sup>8</sup> g.isachenko@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1763-4224>

<sup>9</sup> evtambulatoва@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7517-1651>

<sup>10</sup> Vladislav.bougrov@niuitmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5380-645X>

<sup>11</sup> alexey.romanov@niuitmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3738-408X>

### Abstract

One of the application fields of bulk gallium oxide crystals is the manufacture of substrates for epitaxial growth of device structures for power electronics and optoelectronics in the Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system. For most instrument designs, the substrate serves as a channel for heat removal from the device to an external heat sink. This property stresses the importance of information about the thermal characteristics of bulk crystals of gallium oxide and a solid solution of gallium and aluminum oxide, particularly about the heat capacity and thermal conductivity. In this work, we measured the heat capacity of bulk crystals of the  $\beta$ -modification of pure gallium oxide ( $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) obtained by the Czochralski method, as well as of a double solid solution of gallium and alumina oxide  $\beta$ -(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in the range of temperatures from 25 °C to 480 °C and for various values of the Al concentration. Samples of bulk crystals were grown in an industrial installation “Nika-3” by pulling from the melt (Czochralski method). Further, the specific heat was measured on samples specially prepared from bulk crystals by differential scanning calorimetry. The thermal conductivity in the [010] crystallographic direction was measured by the method using a flat heat source (hot disk method). The dependence of the specific heat capacity of  $\beta$ -(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> crystals on Al concentration was obtained for the atomic concentration of aluminum ranging from 0 (pure gallium oxide) to 9.11 at.%. The influence of the Al content on the heat capacity of the material is analyzed. The temperature dependence of the thermal conductivity of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in the [010] direction (direction of growth) in the temperature range from 43 °C to 120 °C was also obtained. The results of the study can be used to investigate the thermal properties of gallium oxide, as well as to solve the problem of heat removal for electronic devices based on gallium oxide.

### Keywords

gallium oxide, bulk crystals, Czochralski method, heat capacity, thermal conductivity

### Acknowledgements

This work was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 19-19-00686.

**For citation:** Bauman D.A., Panov D.Yu., Spiridonov V.A., Kremleva A.V., Odnoblyudov M.A., Asach A.V., Krylov V.A., Isachenko G.N., Tambulatoва E.V., Bougrov V.E., Romanov A.E. Measurements of heat capacity and thermal conductivity of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\beta$ -(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bulk crystals grown by the Czochralski method. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 6, pp. 880–886 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-880-886

### Введение

Устройства силовой электроники требуют использования полупроводниковых материалов, обладающих прежде всего высокими значениями напряжения пробоя и обеспечивающих низкие потери. В последнее десятилетие одним из лучших материалов для решения этой задачи считается  $\beta$ -модификация оксида галлия ( $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Отличительные свойства  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — ширина запрещенной зоны (около 4,85 эВ [1]) и напряжение

пробоя (свыше 8 МВ/см теоретически [2]). Данные значения существенно больше, чем у традиционно используемых нитрида галлия (GaN) и карбида кремния (SiC), а также кремния. Указанные значения характеристик позволяют изготавливать на основе  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> приборы, работающие при высоких напряжениях. Например, в [3] продемонстрирован диод Шоттки, с напряжением пробоя 4,2 МВ/см, что существенно превосходит теоретические пределы для 4H-SiC (2,2 МВ/см) и GaN (3,3 МВ/см) [4]. Большие значения ширины запрещен-

ной зоны также обеспечивают оксиду галлия высокую радиационную стойкость [5], что позволяет применять его в космических и других специальных приложениях.

Следующий шаг на пути улучшения характеристик полупроводникового материала и расширения его применений в приборах силовой электроники — добавление алюминия в  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. При этом формируется двойной твердый раствор  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Ширина запрещенной зоны для Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> составляет 8,8 эВ [6]. Таким образом, меняя содержание  $x$  алюминия в (Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> можно существенно увеличить ширину запрещенной зоны материала [7, 8]. Введение алюминия в кристалл также позволяет улучшать приборные характеристики материала. Так, например, замена  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на (Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> позволила увеличить значения фототока для солнечно слепых фотодетекторов примерно в 10 раз [9].

При этом применение оксида галлия в приборах силовой электроники предъявляет повышенные требования к тепловым характеристикам материала. В высоковольтном устройстве большая часть мощности рассеивается в канале, вызывая повышение его температуры. Такой нагрев может повысить температуру канала на десятки градусов выше температуры окружающей среды, без эффективного отвода тепла. Высокие температуры приводят к ухудшению свойств переноса электронов из-за повышенного электрон-фононного рассеяния и к снижению производительности устройства. Эффективный отвод выделяемого тепла необходим для поддержания производительности, а также для обеспечения надежности устройства. При этом теплопроводность оксида галлия (от 10 Вт/(К·м) до 27 Вт/(К·м) [10]) почти на порядок меньше, чем теплопроводность GaN и SiC (253 Вт/(К·м) и 370 Вт/(К·м) соответственно [11]). Это представляет одну из главных проблем применения  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в приборах силовой и оптоэлектроники и требует разработки специальных методов рассеивания тепла за счет оптимизации конструкции приборов или выбора специальных материалов<sup>1</sup>. По этой причине вопрос изучения тепловых свойств оксида галлия представляется важным и актуальным. Несмотря на активные исследования в области технологий синтеза и приборных структур оксида галлия, работ, посвященных анализу теплоемкости, теплопроводности и теплового сопротивления оксида галлия до сих пор довольно мало, а для (Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> не удалось найти ни одного опубликованного исследования тепловых свойств.

В настоящей работе приведены результаты измерений теплоемкости образцов в широком диапазоне температур, выполненные методом дифференциальной сканирующей калориметрии объемных кристаллов  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и  $\beta$ -(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с разным содержанием Al,

выращенных методом Чохральского. Приведены измерения теплопроводности объемных кристаллов  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> методом «горячего диска» для диапазона температур 30–120 °С.

### Экспериментальная часть

Объемные кристаллы  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и  $\beta$ -(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> выращены на промышленной установке «Ника-3» (производство EZAN, Россия), предназначенной для выращивания кристаллов по методу Чохральского. Для формирования расплава использован иридиевый тигель. Высота тигля — 26 мм, внутренний диаметр — 40 мм, толщина стенки — около 2 мм. Тигель помещен в тепловую зону из диоксида циркония, легированного аморфным кремнием. Вокруг зоны расположен индуктор с водяным охлаждением, обеспечивающий индукционный нагрев тигля. Затравочный кристалл прикреплен к стержню с помощью специальной оснастки. В качестве затравки использованы фрагменты выращенных кристаллов Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и (Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в виде узких полосок (брусков). В качестве исходного материала для формирования расплава использован порошок Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> чистотой 99,999 %. При выращивании твердого раствора (Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в тигель добавляли порошок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> чистотой 99,999 %. Скорость вытягивания кристалла во всех экспериментах лежала в диапазоне 0,1–0,2 мм/мин, а скорость вращения — 5–10 об/мин.

Образцы для измерений теплопроводности и теплоемкости изготовлены двумя способами. Для измерений теплоемкости были отобраны образцы с массой в диапазоне 11,5–51,5 мг. Высота и геометрические размеры образцов не превышали 2 мм и 4 мм соответственно. Для повышения теплового контакта поверхность одной из сторон исследуемых образцов — плоская.

Для измерения теплопроводности в таком сильно анизотропном кристалле, как  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> важна геометрия образца. Для подготовки образца у выращенного кристалла (буля цилиндрической формы) были отпилены нецилиндрические верхняя и нижняя части, а образовавшиеся торцы (спилы) отшлифованы и отполированы. В результате получен цилиндрический образец с плоскопараллельными полированными торцами. Высота цилиндра составила 8 мм, диаметр — 15 мм. Ось такого цилиндра совпала с направлением роста образца и кристаллографическим направлением [010]. Изображение образца приведено на рис. 1.

Измерение удельной теплоемкости образцов выполнено методом дифференциальной сканирующей калориметрии на установке фирмы Netzsch (DSC 204 Phoenix F1)<sup>2</sup> [12]. Измерения проведены в температурном интервале от 25 до 480 °С в режиме монотонного нагрева. Данный метод основан на сравнении свойств исследуемого образца и термически инертного вещества, выбранного эталоном. В качестве регистрируе-

<sup>1</sup> Moreno G., Bennion K., Kekelia B., Kotecha R., Mather B., Narumanchi S., Paret P., Tellekamp B., Zakutayev A., Graham S., Kim S. Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Packaging and Thermal Management Challenges and Opportunities // Third Ultrawide-Bandgap Workshop, 14–16 May 2019, Adelphi, Maryland [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73902.pdf> (дата обращения: 08.10.2021).

<sup>2</sup> Дифференциальная сканирующая калориметрия: Метод, техника, применение. Netzsch-Gerätebau GmbH, Германия. 2012 [Электронный ресурс]. URL: <https://docplayer.com/58293925-Diferencialnaya-skaniruyushchaya-kalorimetriya.html> (дата обращения: 08.10.2021).

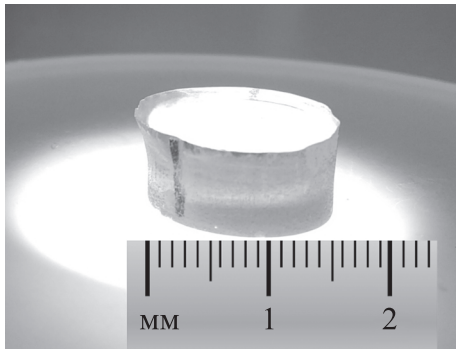


Рис. 1. Изображение образца, подготовленного для измерений теплопроводности

Fig. 1. Sample prepared for thermal conductivity measurements

мого параметра выступает разность тепловых потоков между исследуемым образцом и эталоном. В измерительной камере находятся две ячейки: одна — ячейка сравнения, которая остается пустой. В другую ячейку помещается тигель с исследуемым образцом. В ходе опыта измеряется тепловой поток через тигель с образцом и средняя температура тигля.

Измерение теплопроводности анизотропного материала выполнено методом с применением плоского источника тепла (метод горячего диска) [13] на установке Hot Disk TPS 2500 S. Подробное математическое описание метода представлено в [14]. Измерения проведены в температурном интервале от 30 до 120 °С с шагом 15 °С.

Установка Hot Disk TPS 2500 S использует чувствительный элемент (датчик) в форме двойной спирали. Данный датчик действует в качестве источника тепла для увеличения температуры образца и как «резистивный термометр» для регистрации роста температуры во времени. Датчик расположен между исследуемым образцом и материалом с известными теплофизическими свойствами. На протяжении предварительно заданного времени произведено 200 замеров электрического сопротивления датчика, из которых устанавливается зависимость между температурой и временем. Тепловая мощность, подаваемая на датчик, подобрана таким образом, чтобы рост регистрируемой температуры находился в диапазоне 4–6 °С.

Для измерений использован датчик 7577 F1 радиусом 2 мм. Электрическая мощность, подаваемая на датчик для нагрева образца равна 150 мВт, время проведения каждого эксперимента — 1 с.

### Обсуждение результатов

При измерении теплопроводности с применением плоского источника тепла, получим изменение температуры на поверхности образца в зависимости от времени [14]:

$$\Delta T(\tau) = \frac{P_0}{\pi^{3/2} r \lambda} D(\tau); \tau = \sqrt{\frac{ta}{r^2}},$$

где  $P_0$  — мощность, подведенная к сенсору;  $r$  — радиус сенсора;  $\lambda$  — теплопроводность образца;  $D(\tau)$  — безраз-

мерная функция времени;  $\tau$  — безразмерный параметр;  $t$  — время;  $a$  — температуропроводность.

Сенсор горячего диска с двойной спиралью из никелевой проволоки рассмотрим, как сенсор с  $m$  концентрическими кольцами, расположенными на одинаковом расстоянии. Тогда безразмерную функцию времени можно определить как [14]:

$$D(\tau) = \frac{1}{m^2(m+1)^2} \int_0^\tau \frac{d\sigma}{\sigma^2} \sum_{k=1}^m k \sum_{l=1}^m l e^{-\frac{(k^2+l^2)}{4\sigma^2} \frac{m^2}{4\sigma^2}} \times I_0\left(\frac{kl}{2m^2\sigma^2}\right),$$

$$\sigma^2 = \frac{a(t-t')}{r^2},$$

где  $\sigma$  — переменная интегрирования;  $k, l$  — порядковые номера колец;  $I_0$  — модифицированная функция Бесселя.

График зависимости роста температуры сенсора от  $D(\tau)$  получен в виде прямой линии. Из угла наклона этой прямой можно определить значение коэффициента теплопроводности.

Обязательное условие для измерения коэффициента теплопроводности в анизотропных образцах — указание в качестве исходных данных значения объемной теплоемкости исследуемого образца, равной произведению удельной теплоемкости на плотность материала. В качестве значений удельной теплоемкости возьмем результаты измерений на установке DSC 204 Phoenix F1. Плотность материала примем равной 5,961 г/см<sup>3</sup> [15]. Результаты измерений удельной теплоемкости образцов оксида галлия для образцов с разным содержанием Al показаны на рис. 2.

На рис. 2 видно, что теплоемкость при заданной температуре возрастает с увеличением содержания алюминия в образце. Это связано с замещением молекул галлия в кристаллической решетке почти вдвое более легкими атомами алюминия. Что приводит к увеличению числа атомов в единице массы материала. Из полученных результатов можно заключить, что исследованный диапазон температур одинаково далек

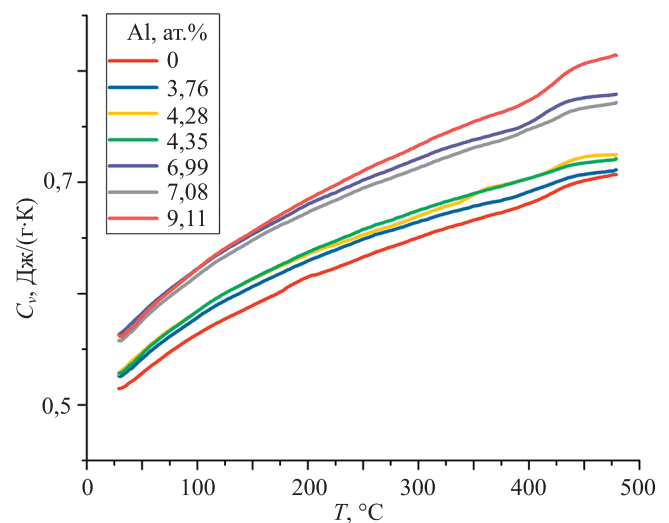


Рис. 2. Зависимость удельной теплоемкости  $C_v$  от температуры  $T$  для образцов с разным содержанием Al  
Fig. 2. Dependence of specific heat capacity  $C_v$  on temperature  $T$  for samples with different Al contents

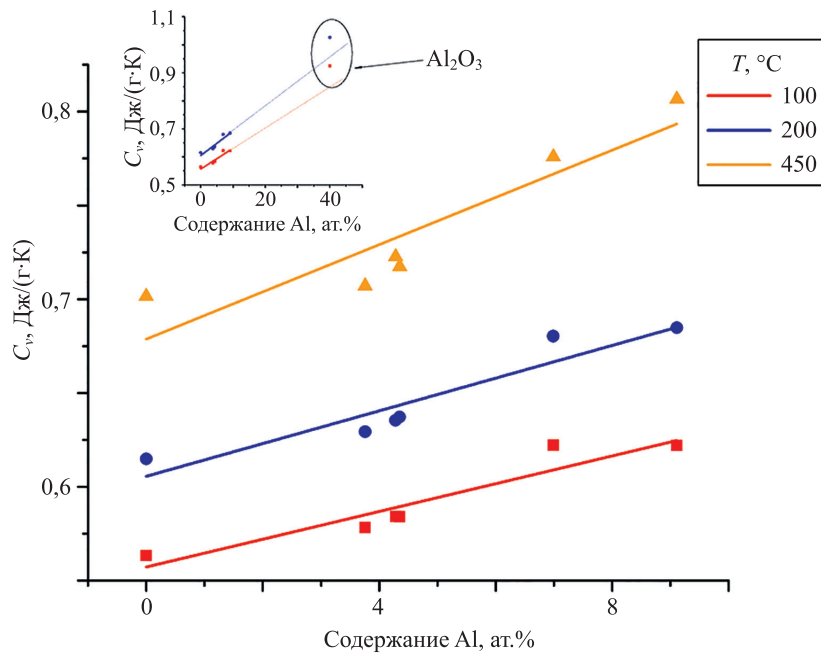


Рис. 3. Зависимость удельной теплоемкости  $C_v$  от процентного (ат.%) содержания алюминия в образце при заданных температурах. На вставке показаны значения удельной теплоемкости для чистого  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [16]

Fig. 3. Dependence of specific heat capacity  $C_v$  on the percentage (% at.) of aluminum content in the sample at a given temperatures. In the inset, there are specific heat capacity values for pure  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [16]

от низких температур ( $T \ll \theta_D$ , где  $\theta_D$  — температура Дебая), когда наблюдается кубическая зависимость (пропорционально  $T^3$ ) теплоемкости от температуры, и от высоких температур ( $T \gg \theta_D$ ), когда зависимость выходит на насыщение и выполняется закон Дюлонга-Пти. На рис. 3 приведены зависимости теплоемкости от процентного содержания алюминия в образце при заданной температуре.

В зависимости от вхождения в образец Al меняется наклон кривой  $C_v$  как функции температуры, что свидетельствует о возрастании чувствительности удельной теплоемкости к температуре при большем содержании алюминия. Для наглядности на рис. 3 на вставке приведены зависимости  $C_v$  от Al (ат.%) с добавлением значений теплоемкости чистого оксида алюминия (содержание алюминия — 40 ат.%), при предельной ситуации полного замещения атомов галлия. Видно, что значения теплоемкости для  $\text{Al}_2\text{O}_3$  смещены относительно линейной экстраполяции по температуре в сторону больших значений теплоемкости. Заметим, что при увеличении содержания алюминия от 0 % ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) до 40 % ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) непрерывный переход от теплоемкости оксида галлия к теплоемкости сапфира невозможен. При малом (менее 10 ат.%) содержании алюминия атомы алюминия встраиваются в решетку  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ , замещая атомы галлия без образования включений с решеткой корунда, а при дальнейшем возрастании содержания алюминия неизбежна перестройка кристаллической решетки и существенное увеличение количества дефектов.

С использованием полученных данных о теплоемкости измерена теплопроводность образца  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ , изображенного на рис. 1. Используемый метод надежно позволяет измерить только теплопроводность вдоль вертикальной оси образца, в нашем случае — оси

цилиндра (кристаллографическое направление [010]). Зависимость теплопроводности вдоль направления [010] от температуры для цилиндрического образца  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  показана на рис. 4.

Полученные результаты измерений теплоемкости (случай чистого  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ) и теплопроводности обнаруживают хорошее совпадение с результатами, изложенными в [17]. Это косвенно подтверждает корректность результатов, полученных и для  $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ . Следующими шагами в направлении исследований тепловых свойств  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  планируются измерения теплопроводности

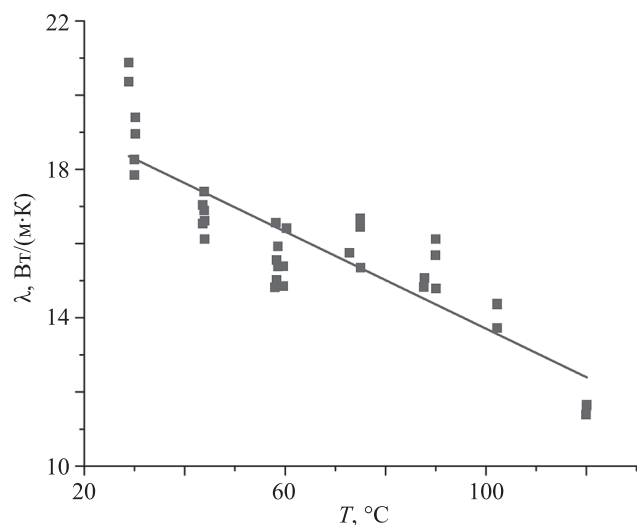


Рис. 4. Теплопроводность  $\lambda$  образца  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  вдоль кристаллографического направления [010] в зависимости от температуры  $T$

Fig. 4. Thermal conductivity  $\lambda$  of the  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  sample along the crystallographic direction [010] as a function of temperature  $T$

(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в направлении [010]. Также будут измерения теплопроводности Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и (Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в направлении, перпендикулярном плоскости (100), в сочетании с исследованием дефектной структуры образцов, что послужит предметом следующей работы.

### Заключение

В работе изложены первые результаты исследования тепловых характеристик объемных кристаллов оксида галлия. Измерена теплоемкость материала в широком диапазоне температур, а также при разном содержании алюминия в двойном твердом растворе (Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

### Литература

1. Janowitz C., Scherer V., Mohamed M., Krapf A., Dwelk H., Mancke R., Galazka Z., Uecker R., Irmscher K., Fornari R., Michling M., Schmeißer D., Weber J.R., Varley J.B., Walle C.G.V. Experimental electronic structure of In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // *New Journal of Physics*. 2011. V. 13. N 8. P. 085014. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/13/8/085014>
2. Mohamed H.F., Xia C., Sai Q., Cui H., Pan M., Qi H. Growth and fundamentals of bulk β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> single crystals // *Journal of Semiconductors*, 2019. V. 40. N 1. P. 011801. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/40/1/011801>
3. Joishi C., Rafique S., Xia Z., Han L., Krishnamoorthy S., Zhang Y., Lodha S., Zhao H., Rajan S. Low-pressure CVD-grown β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bevel-field-plated Schottky barrier diodes // *Applied Physics Express*. 2018. V. 11. N 3. P. 031101. <https://doi.org/10.7567/APEX.11.031101>
4. Higashiwaki M., Sasaki K., Kuramata A., Masui T., Yamakoshi S. Gallium oxide (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) metal-semiconductor field-effect transistors on single-crystal β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (010) substrates // *Applied Physics Letters*. 2012. V. 100. N 1. P. 013504. <https://doi.org/10.1063/1.3674287>
5. Bauman D.A., Borodkin A.I., Petrenko A.A., Panov D.I., Kremleva A.V., Spiridonov V.A., Zakgeim D.A., Silnikov M.V., Odnoblyudov M.A., Romanov A.E., Bougrov V.E. On improving the radiation resistance of gallium oxide for space applications // *Acta Astronautica*. 2021. V. 180. P. 125–129. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.12.010>
6. Бауман Д.А., Пьянкова Л.А., Кремлева А.В., Спиридонов В.А., Панов Д.И., Закгейм Д.А., Бахвалов А.С., Оdnoblyudov M.A., Романов А.Е., Бугров В.Е. Элементное и структурное картирование объемных кристаллов (Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, полученных методом Чохральского // *Письма в Журнал технической физики*. 2021. V. 47. N 5. P. 19–22. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.05.50671.18580>
7. Bauman D.A., Panov D.I., Zakgeim D.A., Spiridonov V.A., Kremleva A.V., Petrenko A.A., Brunkov P.N., Prasolov N.D., Nashchekin A.V., Smirnov A.M., Odnoblyudov M.A., Bougrov V.E., Romanov A.E. High-quality bulk β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and β-(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> crystals: Growth and properties // *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*. 2021. V. 218. N 20. P. 2100335. <https://doi.org/10.1002/pssa.202100335>
8. Swinnich E., Dave Y.J., Pitman E.B., Broderick S., Mazumder B., Seo J.-H. Prediction of optical band gap of β-(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> using material informatics // *Materials Discovery*. 2018. V. 11. P. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.md.2018.06.001>
9. Feng Q., Li X., Han G., Huang L., Li F., Tang W., Zhang J., Hao Y. (AlGa)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> solar-blind photodetectors on sapphire with wider bandgap and improved responsivity // *Optical Materials Express*. 2017. V. 7. N 4. P. 1240–1248. <https://doi.org/10.1364/OME.7.001240>
10. Stepanov S.I., Nikolaev V.I., Bougrov V.E., Romanov A.E. Gallium oxide: properties and applica — a review // *Reviews on Advanced Materials Science*. 2016. V. 44. N 1. P. 63–86.
11. Vaca D., Yates L., Nepal N., Katzer D.S., Downey B.P., Wheeler V., Meyer D.J., Graham S., Kumar S. Thermal conductivity of β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films grown by molecular beam epitaxy // *Proc. of the 19th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*. 2020. P. 1011–1016. <https://doi.org/10.1109/ITherm45881.2020.9190381>
12. Hidalgo-Ruiz J.L., Romero-González R., Martínez Vidal J.L., Garrido Frenich A. A rapid method for the determination of mycotoxins in

Данные по теплоемкости послужат основой для дальнейших исследований тепловых характеристик, таких как теплопроводность, коэффициент теплового расширения и тепловое сопротивление. Выполнено измерение теплопроводности оксида галлия в направлении роста кристалла (кристаллографическое направление [010]). В силу высокой анизотропности материала теплопроводность существенно зависит от ориентации образца при измерении. Заметим, что направление [010] наиболее важно для исследования, так как именно это направление совпадает с направлением эпитаксиального роста на подложках, изготавливаемых из объемного β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> методом Чохральского.

### References

1. Janowitz C., Scherer V., Mohamed M., Krapf A., Dwelk H., Mancke R., Galazka Z., Uecker R., Irmscher K., Fornari R., Michling M., Schmeißer D., Weber J.R., Varley J.B., Walle C.G.V. Experimental electronic structure of In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *New Journal of Physics*, 2011, vol. 13, no. 8, pp. 085014. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/13/8/085014>
2. Mohamed H.F., Xia C., Sai Q., Cui H., Pan M., Qi H. Growth and fundamentals of bulk β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> single crystals. *Journal of Semiconductors*, 2019, vol. 40, no. 1, pp. 011801. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/40/1/011801>
3. Joishi C., Rafique S., Xia Z., Han L., Krishnamoorthy S., Zhang Y., Lodha S., Zhao H., Rajan S. Low-pressure CVD-grown β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bevel-field-plated Schottky barrier diodes. *Applied Physics Express*, 2018, vol. 11, no. 3, pp. 031101. <https://doi.org/10.7567/APEX.11.031101>
4. Higashiwaki M., Sasaki K., Kuramata A., Masui T., Yamakoshi S. Gallium oxide (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) metal-semiconductor field-effect transistors on single-crystal β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (010) substrates. *Applied Physics Letters*, 2012, vol. 100, no. 1, pp. 013504. <https://doi.org/10.1063/1.3674287>
5. Bauman D.A., Borodkin A.I., Petrenko A.A., Panov D.I., Kremleva A.V., Spiridonov V.A., Zakgeim D.A., Silnikov M.V., Odnoblyudov M.A., Romanov A.E., Bougrov V.E. On improving the radiation resistance of gallium oxide for space applications. *Acta Astronautica*, 2021, vol. 180, pp. 125–129. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.12.010>
6. Bauman D.A., Pyankova L.A., Kremleva A.V., Spiridonov V.A., Panov D. YU., Zakgeim D.A., Bakhvalov A.S., Odnoblyudov M.A., Romanov A.E., Bougrov V.E. Elemental and structural mapping of bulk crystals (Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> obtained by the Czochralski method. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2021, vol. 47, no. 5, pp. 19–22. (in Russian). <https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.05.50671.18580>
7. Bauman D.A., Panov D.I., Zakgeim D.A., Spiridonov V.A., Kremleva A.V., Petrenko A.A., Brunkov P.N., Prasolov N.D., Nashchekin A.V., Smirnov A.M., Odnoblyudov M.A., Bougrov V.E., Romanov A.E. High-quality bulk β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and β-(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> crystals: Growth and properties. *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*, 2021, vol. 218, no. 20, pp. 2100335. <https://doi.org/10.1002/pssa.202100335>
8. Swinnich E., Dave Y.J., Pitman E.B., Broderick S., Mazumder B., Seo J.-H. Prediction of optical band gap of β-(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> using material informatics. *Materials Discovery*, 2018, vol. 11, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.md.2018.06.001>
9. Feng Q., Li X., Han G., Huang L., Li F., Tang W., Zhang J., Hao Y. (AlGa)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> solar-blind photodetectors on sapphire with wider bandgap and improved responsivity. *Optical Materials Express*, 2017, vol. 7, no. 4, pp. 1240–1248. <https://doi.org/10.1364/OME.7.001240>
10. Stepanov S.I., Nikolaev V.I., Bougrov V.E., Romanov A.E. Gallium oxide: properties and applica — a review. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2016, vol. 44, no. 1, pp. 63–86.
11. Vaca D., Yates L., Nepal N., Katzer D.S., Downey B.P., Wheeler V., Meyer D.J., Graham S., Kumar S. Thermal conductivity of β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films grown by molecular beam epitaxy. *Proc. of the 19th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*, 2020, pp. 1011–1016. <https://doi.org/10.1109/ITherm45881.2020.9190381>
12. Hidalgo-Ruiz J.L., Romero-González R., Martínez Vidal J.L., Garrido Frenich A. A rapid method for the determination of mycotoxins in

- edible vegetable oils by ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry // *Food Chemistry*. 2019. V. 288. P. 22–28. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.003>
13. Gustafsson S.E., Karawacki E., Khan M.N. Determination of the thermal-conductivity tensor and the heat capacity of insulating solids with the transient hot-strip method // *Journal of Applied Physics*. 1981. V. 52. N 4. P. 2596–2600. <https://doi.org/10.1063/1.329068>
  14. He Y. Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor: Part 1. Theoretical considerations // *Thermochimica Acta*. 2005. V. 436. N 1-2. P. 122–129. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2005.06.026>
  15. Jiang P., Qian X., Li X., Yang R. Three-dimensional anisotropic thermal conductivity tensor of single crystalline  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  // *Applied Physics Letters*. 2018. V. 113. N 23. P. 232105. <https://doi.org/10.1063/1.5054573>
  16. Шелудяк Ю.Е., Кашпоров Л.Я., Малинин Л.А., Цалков В.Н. Теплофизические свойства компонентов горючих систем: справочник. М.: НПО Информ ТЭИ, 1992. 184 с.
  17. Galazka Z., Irmischer K., Uecker R., Bertram R., Pietsch M., Kwasniewski A., Naumann M., Schulz T., Schewski R., Klimm D., Bickermann M. On the bulk  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  single crystals grown by the Czochralski method // *Journal of Crystal Growth*. 2014. V. 404. P. 184–191. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2014.07.021>
- edible vegetable oils by ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Food Chemistry*, 2019, vol. 288, pp. 22–28. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.003>
13. Gustafsson S.E., Karawacki E., Khan M.N. Determination of the thermal-conductivity tensor and the heat capacity of insulating solids with the transient hot-strip method. *Journal of Applied Physics*, 1981, vol. 52, no. 4, pp. 2596–2600. <https://doi.org/10.1063/1.329068>
  14. He Y. Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor: Part 1. Theoretical considerations. *Thermochimica Acta*, 2005, vol. 436, no. 1-2, pp. 122–129. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2005.06.026>
  15. Jiang P., Qian X., Li X., Yang R. Three-dimensional anisotropic thermal conductivity tensor of single crystalline  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ . *Applied Physics Letters*, 2018, vol. 113, no. 23, pp. 232105. <https://doi.org/10.1063/1.5054573>
  16. Sheludiyak Iu.E., Kashporov L.Ia., Malinin L.A., Tcalkov V.N. *Thermophysical Properties of Combustible Systems Components*. Moscow, NPO Inform TEI Publ., 1992, 184 p. (in Russian)
  17. Galazka Z., Irmischer K., Uecker R., Bertram R., Pietsch M., Kwasniewski A., Naumann M., Schulz T., Schewski R., Klimm D., Bickermann M. On the bulk  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  single crystals grown by the Czochralski method. *Journal of Crystal Growth*, 2014, vol. 404, pp. 184–191. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2014.07.021>

### Авторы

**Бауман Дмитрий Андреевич** — кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57197463758](https://orcid.org/0000-0001-5751-8597), [dabauman@itmo.ru](mailto:dabauman@itmo.ru)

**Панов Дмитрий Юрьевич** — младший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57208226091](https://orcid.org/0000-0001-8715-9505), [Dmitriipnv@gmail.com](mailto:Dmitriipnv@gmail.com)

**Спиридонов Владислав Алексеевич** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57210747840](https://orcid.org/0000-0001-5751-8597), [vladspiridonov@itmo.ru](mailto:vladspiridonov@itmo.ru)

**Кремлева Арина Валерьевна** — кандидат физико-математических наук, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57204369404](https://orcid.org/0000-0002-7045-0918), [avkremleva@itmo.ru](mailto:avkremleva@itmo.ru)

**Одноблюдов Максим Анатольевич** — кандидат физико-математических наук, ведущий инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 7004169351](https://orcid.org/0000-0003-3021-6892), [maxim.odnobyudov@spbstu.ru](mailto:maxim.odnobyudov@spbstu.ru)

**Асач Алексей Владимирович** — старший преподаватель, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57023883800](https://orcid.org/0000-0001-9509-2048), [avasach@itmo.ru](mailto:avasach@itmo.ru)

**Крылов Василий Александрович** — ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57191377175](https://orcid.org/0000-0003-3105-2172), [vakrylov@itmo.ru](mailto:vakrylov@itmo.ru)

**Исаченко Григорий Николаевич** — кандидат физико-математических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 14066141100](https://orcid.org/0000-0002-1763-4224), [g.isachenko@itmo.ru](mailto:g.isachenko@itmo.ru)

**Тамбулатова Екатерина Викторовна** — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57216346332](https://orcid.org/0000-0002-7517-1651), [evtambulatova@itmo.ru](mailto:evtambulatova@itmo.ru)

**Бугров Владислав Евгеньевич** — доктор физико-математических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 8321276100](https://orcid.org/0000-0002-5380-645X), [Vladislav.bougrov@niuitmo.ru](mailto:Vladislav.bougrov@niuitmo.ru)

**Романов Алексей Евгеньевич** — доктор физико-математических наук, профессор, ведущий профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 7202768874](https://orcid.org/0000-0003-3738-408X), [alexey.romanov@niuitmo.ru](mailto:alexey.romanov@niuitmo.ru)

Статья поступила в редакцию 18.10.2021  
Одобрена после рецензирования 05.11.2021  
Принята к печати 30.11.2021

### Authors

**Dmitrii A. Bauman** — PhD, Associate Professor, Lead Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57197463758](https://orcid.org/0000-0001-5751-8597), [dabauman@itmo.ru](mailto:dabauman@itmo.ru)

**Dmitrii Yu. Panov** — Junior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57208226091](https://orcid.org/0000-0001-8715-9505), [Dmitriipnv@gmail.com](mailto:Dmitriipnv@gmail.com)

**Vladislav A. Spiridonov** — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57210747840](https://orcid.org/0000-0001-5751-8597), [vladspiridonov@itmo.ru](mailto:vladspiridonov@itmo.ru)

**Arina V. Kremleva** — PhD, Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57204369404](https://orcid.org/0000-0002-7045-0918), [avkremleva@itmo.ru](mailto:avkremleva@itmo.ru)

**Maxim A. Odnobyudov** — PhD, Lead Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 7004169351](https://orcid.org/0000-0003-3021-6892), [maxim.odnobyudov@spbstu.ru](mailto:maxim.odnobyudov@spbstu.ru)

**Aleksei V. Asach** — Senior Lecturer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57023883800](https://orcid.org/0000-0001-9509-2048), [avasach@itmo.ru](mailto:avasach@itmo.ru)

**Vasily A. Krylov** — ассистент, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57191377175](https://orcid.org/0000-0003-3105-2172), [vakrylov@itmo.ru](mailto:vakrylov@itmo.ru)

**Grigory N. Isachenko** — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 14066141100](https://orcid.org/0000-0002-1763-4224), [g.isachenko@itmo.ru](mailto:g.isachenko@itmo.ru)

**Ekaterina V. Tambulatova** — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57216346332](https://orcid.org/0000-0002-7517-1651), [evtambulatova@itmo.ru](mailto:evtambulatova@itmo.ru)

**Vladislav E. Bougrov** — D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 8321276100](https://orcid.org/0000-0002-5380-645X), [Vladislav.bougrov@niuitmo.ru](mailto:Vladislav.bougrov@niuitmo.ru)

**Alexey E. Romanov** — D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 7202768874](https://orcid.org/0000-0003-3738-408X), [alexey.romanov@niuitmo.ru](mailto:alexey.romanov@niuitmo.ru)

Received 18.10.2021  
Approved after reviewing 05.11.2021  
Accepted 30.11.2021



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»

## КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ COMPUTER SCIENCE

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-887-894

УДК 004.021

### Подход к формированию информативных признаков в задачах мониторинга информационной безопасности киберфизических систем

Виктор Викторович Семенов

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

v.semenov@spcras.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-7216-769X>

#### Аннотация

**Предмет исследования.** Тесная интеграция современных киберфизических систем с системами производственно-технологическими и критической информационной инфраструктуры требует совершенствования процесса мониторинга. Процесс мониторинга необходим при постоянном увеличении возможных точек вхождения в системы. Для обработки большого количества данных, поступающих от систем мониторинга, необходимы значительные вычислительные мощности. В этой связи актуальным является снижение размерности признакового пространства при сохранении приемлемой точности мониторинга. Предлагаемое решение должно быть инвариантно к размерности и порядкам величин, из которых составлены временные ряды, подаваемые на вход системы. **Метод.** Для выделения наиболее информативных признаков при формировании их набора предложено применять метод анализа главных компонент, а для их классификации — метод на основе деревьев решений. **Основные результаты.** Выполнен вычислительный эксперимент для подтверждения применимости разработанного подхода. В эксперименте использовались данные сетевого трафика исследовательского стенда киберфизической системы водоочистки. Точность совокупности методов на анализируемых данных составила 98,74 %. Результаты сравнения с известными исследованиями показали увеличение F-меры до 0,925, что на 4,8 % превышает наиболее результативный из применяемых на сегодняшний день методов — метод изолирующего леса (Isolation Forest). **Практическая значимость.** Разработанный подход позволяет существенно повысить скорость идентификации и с высокой точностью обнаруживать аномалии информационной и функциональной безопасности киберфизических систем за счет снижения размерности исходного признакового пространства. Предложенный подход может использоваться в системах мониторинга событий информационной безопасности. Представленные теоретические результаты могут быть полезны исследователям информационно-функциональной безопасности киберфизических систем.

#### Ключевые слова

информационная безопасность, функциональная безопасность, киберфизические системы, выявление аномалий, анализ временных рядов, метод главных компонент, системы мониторинга

**Ссылка для цитирования:** Семенов В.В. Подход к формированию информативных признаков в задачах мониторинга информационной безопасности киберфизических систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 6. С. 887–894. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-887-894

### An approach to the identification of the state of elements in cyber-physical systems based on principal component analysis

Viktor V. Semenov

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation

v.semenov@spcras.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-7216-769X>

#### Abstract

The close integration of modern cyber-physical systems with production and technological ones as well as with critical information infrastructure requires improving the monitoring process. The monitoring process is necessary with



a constant increase in the possible points of entry into the system. The processing of a large amount of data coming from monitoring systems requires significant computing power. In this regard, it is relevant to reduce the dimension of the feature space while maintaining an acceptable monitoring accuracy. The proposed solution should be invariant to the dimension and orders of magnitude from which the time series supplied to the input of the monitoring system are composed. To obtain the most informative features in the formation of their set, it is proposed to use principal component analysis, and a method based on decision trees for their classification. A computational experiment was performed to confirm the applicability of the developed approach. The data of the network traffic for the research stand of the cyber-physical system water treatment were used in the experiment. The accuracy of the set of methods on the analyzed data was 98.74 %. The comparison with known studies showed an increase in the F-measure up to 0.925, which is 4.8 % higher than the most effective method used to date, namely the Isolation Forest method. The developed approach allows one to significantly increase the speed of identification and to detect anomalies of information security and functional safety of cyber-physical systems with high accuracy by reducing the dimension of the original feature space. The proposed approach can be used in event monitoring systems that deal with information security. The presented theoretical results can be useful for researchers of information security and functional safety of cyber-physical systems.

### Keywords

information security, functional safety, cyber-physical systems, identification of anomalies, time series analysis, principal component analysis, monitoring systems

**For citation:** Semenov V.V. An approach to the identification of the state of elements in cyber-physical systems based on principal component analysis. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 6, pp. 887–894 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-887-894

## Введение

Быстрое развитие технологий «Индустрии 4.0» привело к включению киберфизических систем в приоритетный список инноваций, являющихся критически важными для защиты национальных интересов Российской Федерации. Киберфизическая система (КФС) — система, подразумевающая интеграцию вычислительных ресурсов в физические сущности любого вида [1]. КФС, являясь основой для реализаций множества современных инновационных решений, существенно уязвимы с точки зрения успешных информационных атак, приводящих к критическим сбоям или аномальному функционированию [2].

Ввиду тесной интеграции КФС в производственно-технологические системы, системы критической информационной инфраструктуры, а также значительного количества возможных точек входа, задача мониторинга информационной безопасности (ИБ) для КФС является более сложной, чем для классических информационных систем [3]. В случае реализации угроз ИБ основной целью злоумышленника, как правило, является получение возможности управления КФС при помощи информационных воздействий [4], при этом деструктивные информационные воздействия могут влиять как на процессы хранения, обработки и передачи информации внутри системы, так и на физические процессы исполнительных механизмов КФС.

На сегодняшний день имеется множество работ отечественных и зарубежных исследователей, посвященных разработке методов, методик и систем обнаружения нарушений ИБ КФС [5–7]. Существенная часть исследователей рассматривает вопросы выявления аномалий ИБ КФС [8], которые могут быть вызваны атаками злоумышленников, например, внедрением программных закладок в КФС [9].

В случае крупномасштабных КФС, в которых присутствует огромное количество датчиков и логов протекающих информационных процессов, снижение размерности признакового пространства приобретает особую актуальность из-за огромного количества дан-

ных, поступающих от систем мониторинга, требующих несоизмеримо высоких вычислительных мощностей для их обработки.

В связи с этим особую актуальность приобретают методы и алгоритмы, позволяющие с минимальными затратами времени и вычислительных ресурсов производить мониторинг состояния информационной и функциональной безопасности КФС с приемлемой для практического использования точностью.

## Постановка задачи

КФС реализует заранее определенные ее техническими особенностями функции и представляет собой замкнутую систему, в которой протекает конечное множество физических процессов [10]. Предположим, что существует множество объектов обучающей выборки  $\{o_1, \dots, o_m\} = \{\{x_1(t_1), x_2(t_1), \dots, x_s(t_1)\}, \dots, \{x_1(t_m), x_2(t_m), \dots, x_n(t_m)\}\} \subset X$ , составленных из временных рядов, характеризующих функционирование КФС или ее отдельных элементов, множество меток классов  $\{C_0, C_1\} \subset C$ , отражающих состояния ИБ. Требуется построить алгоритм  $\mu$ , способный соотнести элементы множества  $X$  с одним из известных классов, соотнесенных с состоянием ИБ:

$$\mu: X \rightarrow C,$$

где  $C_0$  и  $C_1$  — множество меток классов безопасных состояний ИБ КФС и аномальных (опасных) состояний ИБ;  $\{c_1, c_2, \dots, c_k\} \subset C_0$ ,  $\{c_{k+1}, c_{k+2}, \dots, c_l\} \subset C_1$ ,  $l$  — число идентифицируемых состояний ИБ КФС;  $m$  — число объектов в обучающей выборке.

Цель работы — разработка научного подхода, обеспечивающего увеличение скорости идентификации состояния ИБ в условиях их большого количества и ограниченности обучающей выборки.

## Предлагаемый подход

Универсальным способом представления динамически изменяющихся данных являются временные

ряды [11]. Временной ряд  $X$  — собранный в разные моменты времени статистический материал о значении каких-либо параметров исследуемого процесса КФС.  $X = \{x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_m)\}$  — полученные значения, которые являются следствием протекания процессов КФС. Оценивание защищенности КФС от информационных угроз на основе анализа временных рядов сводим к задаче классификации их элементов и выявлению значений, относящихся к небезопасному классу  $C_1$  [12]. Обилие в КФС циклических (повторяющихся) процессов определяет успешную применимость предлагаемого подхода. В исследуемой задаче формируется  $m$  элементов временных рядов  $X = \{\{x_1(t_1), x_2(t_1), \dots, x_n(t_1)\}, \{x_1(t_2), x_2(t_2), \dots, x_n(t_2)\}, \dots, \{x_1(t_m), x_2(t_m), \dots, x_n(t_m)\}\}$ , представляющих собой сгруппированные и синхронизированные по времени множества значений сигналов от  $n$  источников.

Таким образом, получим метку класса состояния ИБ КФС в дискретный момент времени  $t$ :

$$c(t) = \mu(x_{1,t}, x_{2,t}, \dots, x_{s,t}), c \in C, x_{i,t} \in D_f, s \ll n,$$

где  $t$  — метка времени,  $t = 1, \dots, m$ ;  $D_f$  — множество допустимых значений признака;  $s$  — количество отобранных наиболее информативных признаков.

Исходное признаковое пространство  $H = (f_1, f_2, \dots, f_n)$  представляет собой набор возможных параметров функционирования КФС, которые могут включать в себя как характеристики информационных процессов (например, параметры сетевого трафика), так и данные о протекающих физических процессах (например, информацию с датчиков). Очевидно, что крайне важным является выявление признаков, способствующих достижению максимальной полноты и точности идентификации.

Наилучший подход для оценивания информативности признаков в задаче идентификации состояния ИБ КФС — информационный подход. Данный подход позволяет выполнить отбор признаков, обладающих максимальной дискриминаторной способностью для защищаемого типа КФС.

Метод анализа главных компонент (МГК) широко используется для понижения размерности исходных данных. В работах [13, 14] МГК применяется в качестве предобработки, при этом исходное многомерное признаковое пространство преобразуется в пространство главных компонент (ГК). В настоящей работе МГК предложено использовать с целью вычисления информативности каждого признака (источника информации о процессах системы).

Матрица данных  $X$  представляет собой результаты измерения некоторых параметров объекта КФС во времени:

$$X = \begin{pmatrix} x_1(t_1) & x_2(t_1) & \dots & x_n(t_1) \\ x_1(t_2) & x_2(t_2) & \dots & x_n(t_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1(t_m) & x_2(t_m) & \dots & x_n(t_m) \end{pmatrix}.$$

Перед применением МГК для анализа обучающей выборки КФС, выполним автошкалирование (центриро-

вание и нормировку) данных. Каждая строка матрицы  $X$  — матрицы временных рядов предобработанных данных, состоит из параметров, описывающих состояние ИБ КФС.

Разложение матрицы  $X$  в виде матричного уравнения при помощи метода анализа ГК представлено в виде:

$$X = TP^T + E,$$

где  $T$  — матрица счетов (*scores*);  $P^T$  — транспонированная матрица нагрузок (*loadings*);  $E$  — матрица остатков (*errors or residuals*); индекс « $T$ » — операция транспонирования, в результате которой матрица поворачивается относительно своей главной диагонали.

Каждый столбец  $P$  — вектор ГК, число строк —  $n$  (размерность пространства данных), число столбцов —  $k$  (число векторов ГК, выбранных для проецирования). Величины нагрузок  $p$  — принадлежат диапазону  $[-1, +1]$  и отражают влияние на данную ГК конкретной исходной переменной.

Матрица ошибок (или остатков):  $E = X - TP^T$ .

Для вычисления информативности признаков необходимо решить задачу выбора числа ГК ( $k$ ). Для этого последовательно при каждом значении  $k$ , начиная с единицы, рассчитаем значения объясненной дисперсии (ERV):

$$ERV = 1 - \frac{\sum_{t=1}^m \sum_{j=1}^n e_{tj}^2}{\sum_{t=1}^m \sum_{j=1}^n x_{tj}^2},$$

где  $e_{tj}$  и  $x_{tj}$  — элементы матриц  $E_t$  и  $X_t$  соответственно.

Решающее правило для выбора  $k$ :  $ERV_k \geq \epsilon$ , где  $\epsilon$  выбирается эмпирически в зависимости от конкретной КФС. Тогда, информативность  $i$ -го признака при  $k$  ГК вычисляется при помощи матрицы  $P$  по формуле:

$$I_{fi} = \sqrt{\sum_{j=1}^k p_{tj}^2}. \quad (1)$$

Идентификаторы источников упорядочиваются по информативности  $I_{f1} \geq I_{f2} \geq \dots \geq I_{fs}$ . По правилу Кайзера произведем отбор  $s$  источников, информативность которых больше средней информативности:

$$I_{fi} > \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{fi},$$

где  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{fi}$  — средняя информативность всех рассматриваемых (доступных) источников;  $i = 1, \dots, n$ .

Идентификаторы источников заносятся в архив и участвуют в дальнейшем построении модели классификации. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 1.

### Эксперимент

С целью исследования состояния ИБ выполним анализ сетевого трафика между системой управления и сбора данных (SCADA) и программируемым логическим контроллером КФС. Апробация метода заключается в проведении вычислительного эксперимента над набором данных [15] с целью практической реализации предложенного подхода.

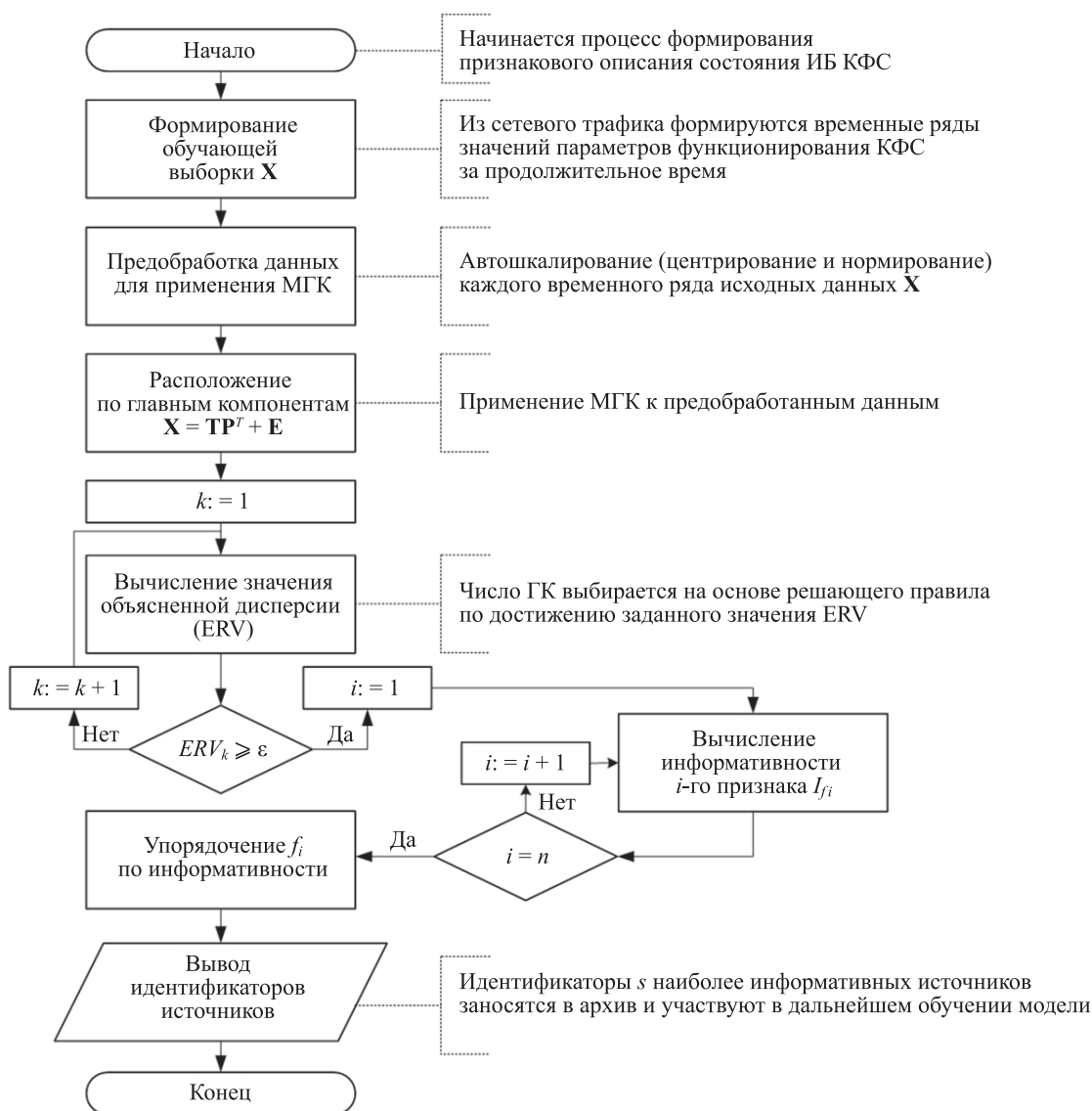


Рис. 1. Блок-схема алгоритма формирования признакового описания состояния информационной безопасности элементов киберфизических систем

Fig. 1. Block diagram of the algorithm for the formation of feature description of the information security state of cyber-physical systems elements

Цель вычислительного эксперимента — применение алгоритма формирования признакового описания состояния ИБ элементов КФС для реально существующей КФС.

Для анализа временных рядов, характеризующих функционирование КФС, применено программное обеспечение Matlab R2021a. Исходные данные для реализации разработанного комплексного подхода представляют численный двумерный массив  $944\ 919 \times 51$ , каждый элемент массива  $X$  задан двумя индексами, индексом строки и индексом столбца. В строках расположены значения временных рядов, регистрируемых раз в секунду, в свою очередь столбцы упорядочены по источникам получения информации от КФС.

Перечень источников получения информации о функционировании КФС представлен в работе [15]: FIT101, LIT101, MV101, P101, P102, AIT201, AIT202, AIT203, FIT201, MV201, P201, P202, P203, P204, P205,

P206, DPIT301, FIT301, LIT301, MV301, MV302, MV303, MV304, P301, P302, AIT401, AIT402, FIT401, LIT401, P401, P402, P403, P404, UV401, AIT501, AIT502, AIT503, AIT504, FIT501, FIT502, FIT503, FIT504, P501, P502, PIT501, PIT502, PIT503, FIT601, P601, P602, P603.

На первом этапе реализации алгоритма формирования информативных признаков выполним разложение при помощи стандартной функции Matlab  $[loadings, scores, latent, tsquared, explained, mu] = \text{pca}(X, 'NumComponents', 51)$ , где:

- *loadings* — матрица нагрузок;
- *scores* — матрица счетов;
- *latent* — вектор-столбец, содержащий значения дисперсий ГК, т. е. собственные значения ковариационной матрицы  $X$ ;
- *tsquared* — вектор-столбец, который представляет собой сумму квадратов стандартизованных счетов

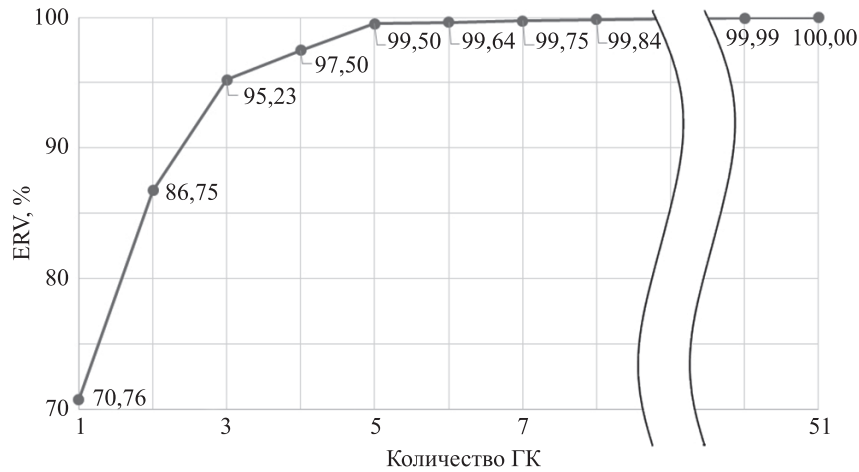


Рис. 2. Зависимость совокупной объясненной дисперсии от количества главных компонент для исследуемой киберфизической системы водоочистки

Fig. 2. Dependence of the explained residual variance on the amount of principal components for the studied water treatment cyber-physical system

для каждого временного ряда (Т-квадрат распределения Хотеллинга);  
 — *explained* — вектор-столбец, содержащий значения объясненной дисперсии для заданного в *NumComponents* числа ГК;  
 — *mu* — средние значения переменных в *X*, возвращенные как вектор-строка.

Наиболее интересными для анализа и формирования информативных признаков являются переменные *loadings* и *explained*. Последняя представляет собой столбец, в котором содержатся частные значения дисперсии по каждой ГК отдельно. Для получения совокупных значений в цикле производится суммирование *q* первых элементов:

$$ERV_q = \sum_{i=1}^q explained(i), q = 1, \dots, n.$$

Зависимость совокупной объясненной дисперсии от количества ГК представлена на рис. 2.

ГК упорядочиваются по величинам ERV. Как видно из графика (рис. 2), значения объясненной дисперсии резко увеличиваются при ГК с первой по пятую, затем идет монотонное медленное увеличение вплоть до 51-ой ГК. Исходя из этого, можно сделать вывод, что большую часть разброса экспериментальных данных можно объяснить существенно меньшим числом источников в пространстве ГК. Разработанная модель подразумевает использование МГК для вычисления информативности признаков с целью сокращения вычислительных затрат.

Для непосредственного расчета информативности используется массив *loadings*, строки которого упорядочены по источникам  $f_i$ , а столбцы содержат значения нагрузок *P* для каждой из *k* ГК. Старшинство ГК определяется большим значением величины объясненной дисперсии. На рис. 3 представлен график нагрузок для двух старших ГК, по оси абсцисс отложены значения 1-го столбца матрицы нагрузок *P* ( $p_{i,1}$ ), а по оси ординат — второго *P* ( $p_{i,2}$ ). По мере удаления от начала координат и увеличения абсолютных значений координат

точки информативность соответствующего источника увеличивается. Отметим, что при разном количестве ГК (*k*) результаты расчета информативности отличаются несущественно, главное влияние оказывают пять старших ГК.

Информативность признаков по разработанному алгоритму рассчитана по формуле (1).

В результате расчетов в соответствии с информативностью *i*-го признака ( $f_i$ ) при *k* ГК определены наиболее информативные (по правилу Кайзера) признаки для: LIT401 информативность ( $I_{fi}$ ) равна 0,99913; LIT101 — 0,99913; LIT301 — 0,99896; AIT201 — 0,94786; PIT501 — 0,67211; PIT503 — 0,51464; AIT402 — 0,48828; AIT203 — 0,31012; AIT502 — 0,22888, а также информативные признаки, например: DPIT301 — 0,04848; AIT504 — 0,02570; AIT503 — 0,01251; FIT201 — 0,00883, которые имеют значения менее 0,1.

Из 51 ГК источника информации о функционировании КФС информативность девяти оказалась больше средней информативности, составившей  $\bar{I} = 0,12410$ .

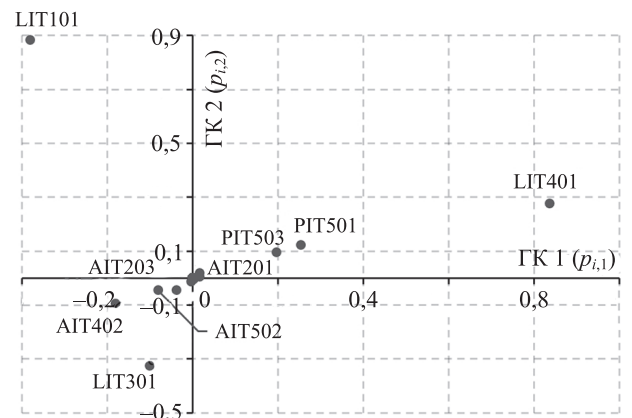


Рис. 3. График нагрузок при осуществлении атак на киберфизическую систему

Fig. 3. Schedule of loadings during the attacks on the cyber-physical system

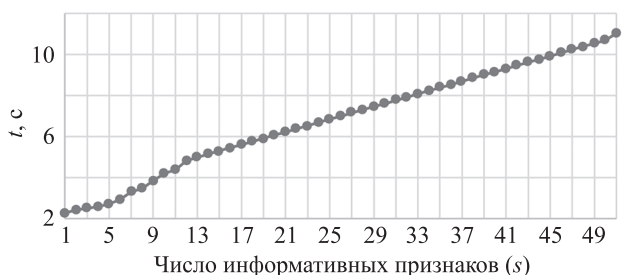


Рис. 4. Зависимость времени обучения классификатора от числа информативных признаков

Fig. 4. Dependence of the training time of the classifier on the number of informative features

Данный результат позволил существенно сократить количество используемых для построения модели классификации признаков, уменьшив тем самым вычислительные затраты на обработку массива данных и увеличив скорость реагирования на инциденты ИБ. Эксперимент показал закономерное увеличение времени обучения классификатора на основе деревьев решений при увеличении числа информативных признаков (рис. 4).

Модель формирования признакового описания состояния ИБ элементов КФС была применена для временных рядов, полученных в результате функционирования КФС водоочистки в безопасном и в потенциально опасных состояниях ИБ. Исследованы зависимости характеристик классификации от числа информативных признаков (рис. 5). При проведении эксперимента и построении графика в первую очередь использованы признаки с большей информативностью, вычисленной по формуле (1).

На графике (рис. 5) наблюдается резкое увеличение показателей качества идентификации при числе информативных признаков от одного до трех. Дальнейшее увеличение  $s$  также приводит к закономерному росту величины площади под ROC-кривой (AUC) и F-меры, тенденция сохраняется вплоть до девяти информативных признаков, после чего показатели меняются незначительно. При  $s = 9$ : точность 98,74 %, AUC — 0,96,

F-мера — 0,925. При  $s = 51$  AUC увеличилась всего на 0,01, а F-мера на 0,02 по сравнению с  $s = 9$ , что позволяет говорить о том, что большая часть источников содержит шумовые данные и не способствует существенно увеличению качества классификации. Эксперимент показал, что характеристики классификации зависят не только от числа информативных признаков, но и от порядка их использования — предпочтительнее обучать классификатор на значениях наиболее информативных признаков. Результаты исследования сопоставлены с работами [6, 13, 16–20]. Наилучшее из представленных в литературе решений основывается на применении метода изолирующего леса (Isolation Forest) [20], F-мера 0,882. Исходя из этого, можно сделать вывод о возможности комплексного применения предложенного подхода в целях существенного повышения оперативности мониторинга и сокращения вычислительных затрат.

### Заключение

Предложенный подход к формированию признакового описания состояния информационной безопасности позволяет на этапах реализации мониторинга элементов киберфизических систем повысить полноту, точность и скорость мульти-классификации. Алгоритм инвариантен к размерности и порядкам величин, из которых составлены временные ряды, подаваемые на вход.

Полученные результаты демонстрируют применимость разработанного подхода, позволяющего повысить скорость идентификации состояний КФС и обеспечить эффективное уменьшение признакового пространства без существенной потери точности. Достигается значение F-меры 0,925, что на 4,8 % превышает наиболее результативный из представленных на сегодняшний день в мировой научной литературе метод на основе изолирующего леса.

В результате применения разработанного алгоритма возможно выделить наиболее информативные признаки, используемые в дальнейшем в системах управления информационной безопасностью и управления событиями безопасности.

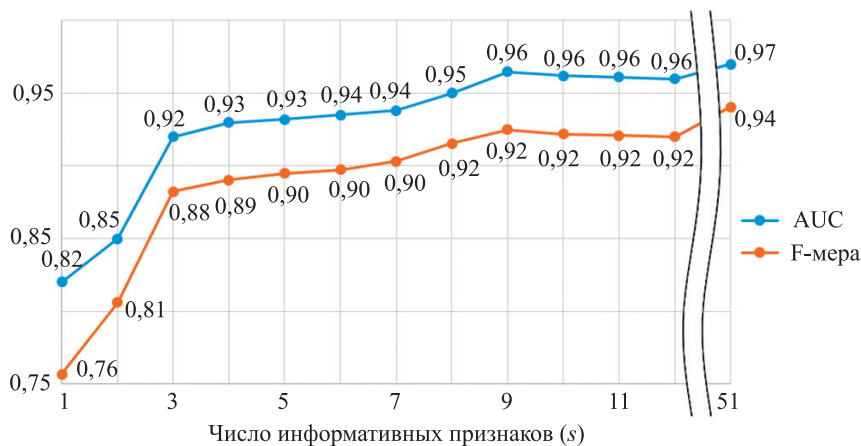


Рис. 5. Оценка качества классификации

Fig. 5. Assessment of the classification quality

## Литература

1. Cardenas A., Amin S., Sinopoli B., Giani A., Perrig A., Sastry S. Challenges for securing cyber physical systems // Workshop on Future Directions in Cyber-Physical Systems Security. 2009.
2. Зегжда Д.П., Васильев Ю.С., Полтавцева М.А., Кефели И.Ф., Боровков А.И. Кибербезопасность прогрессивных производственных технологий в эпоху цифровой трансформации // Вопросы кибербезопасности. 2018. № 2(26). С. 2–15. <https://doi.org/10.21681/2311-3456-2018-2-2-15>
3. Семенов В.В., Салахутдинова К.И., Лебедев И.С., Сухопаров М.Е. Выявление аномальных отклонений при функционировании устройств киберфизических систем // Прикладная информатика. 2019. Т. 14. № 6(84). С. 114–122. <https://doi.org/10.24411/1993-8314-2019-10053>
4. Zegzhda D.P. Sustainability as a criterion for information security in cyber-physical systems // Automatic Control and Computer Sciences. 2016. V. 50. № 8. С. 813–819. <https://doi.org/10.3103/S0146411616080253>
5. Павленко Е.Ю., Штыркина А.А., Зегжда Д.П. Оценка устойчивости киберфизических систем на основе спектральной теории графов // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2019. № 1. С. 60–68.
6. Gómez A., Maimó L., Celdrán A., Clemente F. MADICS: A methodology for anomaly detection in industrial control systems // Symmetry. 2020. V. 12. N 10. P. 1583. <https://doi.org/10.3390/sym12101583>
7. Wang X., Zhou Q., Harer J., Brown G., Qiu S., Dou Z., Wang J., Hinton A., Gonzalez C.A., Chin P. Deep learning-based classification and anomaly detection of side-channel signals // Proceedings of SPIE. 2018. V. 10630. P. 1063006. <https://doi.org/10.1117/12.2311329>
8. Semenov V.V., Lebedev I.S., Sukhoparov M.E., Salakhutdinova K.I. Application of an autonomous object behavior model to classify the cybersecurity state // Lecture Notes in Computer Science. 2019. V. 11660. P. 104–112. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-30859-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-30859-9_9)
9. Meleshko A.V., Desnitsky V.A., Kotenko I.V. Machine learning based approach to detection of anomalous data from sensors in cyber-physical water supply systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 709. P. 033034. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/3/033034>
10. Сухопаров М.Е., Семенов В.В., Лебедев И.С. Мониторинг информационной безопасности элементов киберфизических систем с использованием искусственных нейронных сетей // Методы и технические средства обеспечения безопасности информации. 2018. № 27. С. 59–60.
11. Шелухин О.И., Осин А.В. Мультифрактальные свойства трафика реального времени // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2006. Т. 2. № 3. С. 36–43.
12. Semenov V., Sukhoparov M., Lebedev I. An approach to classification of the information security state of elements of cyber-physical systems using side electromagnetic radiation // Lecture Notes in Computer Science. 2018. V. 11118. P. 289–298. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-01168-0\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01168-0_27)
13. Li D., Chen D., Jin B., Shi L., Goh J., Ng S.-K. MAD-GAN: Multivariate anomaly detection for time series data with generative adversarial networks // Lecture Notes in Computer Science. 2019. V. 11730. P. 703–716. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-30490-4\\_56](https://doi.org/10.1007/978-3-030-30490-4_56)
14. Медведникова М.М. Использование метода главных компонент при построении интегральных индикаторов // Машинное обучение и анализ данных. 2012. Т. 1. № 3. С. 292–304.
15. Goh J., Adepu S., Junejo K.N., Mathur A. A dataset to support research in the design of secure water treatment systems // Lecture Notes in Computer Science. 2017. V. 10242. P. 88–99. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-71368-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-71368-7_8)
16. Kravchik M., Shabtai A. Detecting cyber attacks in industrial control systems using convolutional neural networks // Proc. of the 2018 Workshop on Cyber-Physical Systems Security and PrivaCy. 2018. P. 72–83. <https://doi.org/10.1145/3264888.3264896>
17. Shalyga D., Filonov P., Lavrentyev A. Anomaly detection for water treatment system based on neural network with automatic architecture optimization // arXiv. 2018. arXiv:1807.07282.
18. Inoue J., Yamagata Y., Chen Y., Poskitt C.M., Sun J. Anomaly detection for a water treatment system using unsupervised machine learning // Proc. of the 2017 IEEE International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW). 2017. P. 1058–1065. <https://doi.org/10.1109/ICDMW.2017.149>

## References

1. Cardenas A., Amin S., Sinopoli B., Giani A., Perrig A., Sastry S. Challenges for securing cyber physical systems. *Workshop on Future Directions in Cyber-Physical Systems Security*, 2009.
2. Zegzhda D., Vasilev U., Poltavtseva M., Kefelev I., Borovkov A. Advanced production technologies security in the era of digital transformation. *Voprosy kiberbezopasnosti*, 2018, no. 2(26), pp. 2–15. (in Russian). <https://doi.org/10.21681/2311-3456-2018-2-2-15>
3. Semenov V., Salakhutdinova K., Lebedev I., Sukhoparov M. Identification of abnormal functioning during the operation devices of cyber-physical systems. *Journal of Applied Informatics*, 2019, vol. 14, no. 6(84), pp. 114–122. (in Russian). <https://doi.org/10.24411/1993-8314-2019-10053>
4. Zegzhda D.P. Sustainability as a criterion for information security in cyber-physical systems. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2016, vol. 50, no. 8, pp. 813–819. <https://doi.org/10.3103/S0146411616080253>
5. Pavlenko E.Yu., Shtyrkina A.A., Zegzhda D.P. Estimating the cyber-physical system sustainability based on spectral graph theory. *Information Security Problems. Computer Systems*, 2019, no. 1, pp. 60–68. (in Russian)
6. Gómez A., Maimó L., Celdrán A., Clemente F. MADICS: A methodology for anomaly detection in industrial control systems. *Symmetry*, 2020, vol. 12, no. 10, pp. 1583. <https://doi.org/10.3390/sym12101583>
7. Wang X., Zhou Q., Harer J., Brown G., Qiu S., Dou Z., Wang J., Hinton A., Gonzalez C.A., Chin P. Deep learning-based classification and anomaly detection of side-channel signals. *Proceedings of SPIE*, 2018, vol. 10630, pp. 1063006. <https://doi.org/10.1117/12.2311329>
8. Semenov V.V., Lebedev I.S., Sukhoparov M.E., Salakhutdinova K.I. Application of an autonomous object behavior model to classify the cybersecurity state. *Lecture Notes in Computer Science*, 2019, vol. 11660, pp. 104–112. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-30859-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-30859-9_9)
9. Meleshko A.V., Desnitsky V.A., Kotenko I.V. Machine learning based approach to detection of anomalous data from sensors in cyber-physical water supply systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 709, pp. 033034. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/3/033034>
10. Sukhoparov M.E., Semenov V.V., Lebedev I.S. Information security monitoring of elements of cyber-physical systems using artificial neural networks. *Metody i Tekhnicheskie Sredstva Obespecheniya Bezopasnosti Informatsii*, 2018, no. 27, pp. 59–60. (in Russian)
11. Osin A.V., Sheluhin O.I. Multifractal properties of the real-time traffic. *Jeletrotehnicheskie i informacionnye komplekxy i sistemy*, 2006, vol. 2, no. 3, pp. 36–43. (in Russian)
12. Semenov V., Sukhoparov M., Lebedev I. An approach to classification of the information security state of elements of cyber-physical systems using side electromagnetic radiation. *Lecture Notes in Computer Science*, 2018, vol. 11118, pp. 289–298. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-01168-0\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01168-0_27)
13. Li D., Chen D., Jin B., Shi L., Goh J., Ng S.-K. MAD-GAN: Multivariate anomaly detection for time series data with generative adversarial networks. *Lecture Notes in Computer Science*, 2019, vol. 11730, pp. 703–716. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-30490-4\\_56](https://doi.org/10.1007/978-3-030-30490-4_56)
14. Medvednikova M.M. Principal component analysis for building integral indicators. *Machine Learning and Data Analysis*, 2012, vol. 1, no. 3, pp. 292–304. (in Russian)
15. Goh J., Adepu S., Junejo K.N., Mathur A. A dataset to support research in the design of secure water treatment systems. *Lecture Notes in Computer Science*, 2017, vol. 10242, pp. 88–99. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-71368-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-71368-7_8)
16. Kravchik M., Shabtai A. Detecting cyber attacks in industrial control systems using convolutional neural networks. *Proc. of the 2018 Workshop on Cyber-Physical Systems Security and PrivaCy*, 2018, pp. 72–83. <https://doi.org/10.1145/3264888.3264896>
17. Shalyga D., Filonov P., Lavrentyev A. Anomaly detection for water treatment system based on neural network with automatic architecture optimization. *arXiv*, 2018, arXiv:1807.07282.
18. Inoue J., Yamagata Y., Chen Y., Poskitt C.M., Sun J. Anomaly detection for a water treatment system using unsupervised machine learning. *Proc. of the 2017 IEEE International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW)*, 2017, pp. 1058–1065. <https://doi.org/10.1109/ICDMW.2017.149>

19. Kravchik M., Shabtai A. Efficient cyber attack detection in industrial control systems using lightweight neural networks and PCA // *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*. 2021. in press. <https://doi.org/10.1109/TDSC.2021.3050101>
20. Elnour M., Meskin N., Khan K., Jain R. A dual-isolation-forests-based attack detection framework for industrial control systems // *IEEE Access*. 2020. V. 8. P. 36639–36651. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2975066>
19. Kravchik M., Shabtai A. Efficient cyber attack detection in industrial control systems using lightweight neural networks and PCA. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 2021, in press. <https://doi.org/10.1109/TDSC.2021.3050101>
20. Elnour M., Meskin N., Khan K., Jain R. A dual-isolation-forests-based attack detection framework for industrial control systems. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 36639–36651. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2975066>

**Автор**

**Семенов Виктор Викторович** — младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация, [orcid.org/0000-0002-7216-769X](https://orcid.org/0000-0002-7216-769X), [v.semenov@spcras.ru](mailto:v.semenov@spcras.ru)

**Author**

**Viktor V. Semenov** — Junior Researcher, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, [orcid.org/0000-0002-7216-769X](https://orcid.org/0000-0002-7216-769X), [v.semenov@spcras.ru](mailto:v.semenov@spcras.ru)

*Статья поступила в редакцию 13.09.2021*  
*Одобрена после рецензирования 01.11.2021*  
*Принята к печати 28.11.2021*

*Received 13.09.2021*  
*Approved after reviewing 01.11.2021*  
*Accepted 28.11.2021*



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»