

# Программная инженерия



**Пр** **9**  
**ИН** **2021**  
Том 12

Рисунки к статье М. Г. Персовой, Ю. Г. Соловейчика, А. М. Грифа  
 «БАЛАНСИРОВКА ПОТОКОВ НА НЕКОНФОРМНЫХ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНЫХ  
 СЕТКАХ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ МНОГОФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ»

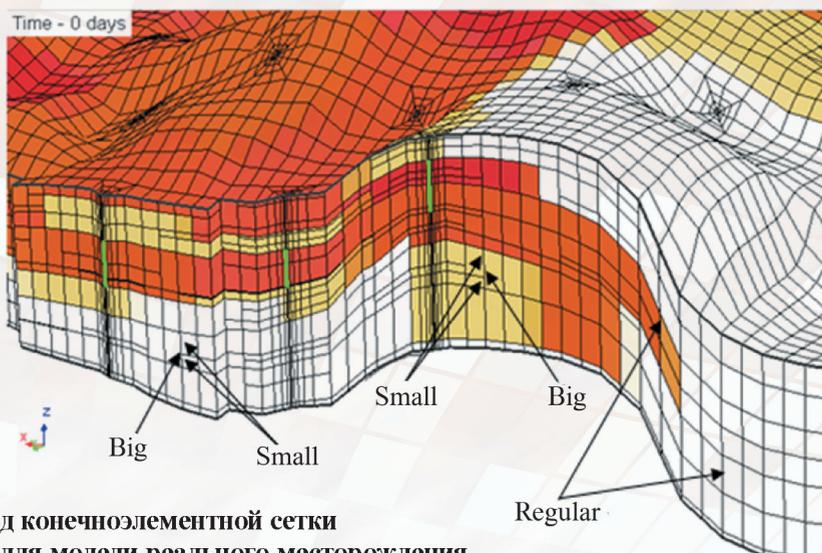


Рис. 1. Вид конечноэлементной сетки в разрезе для модели реального месторождения

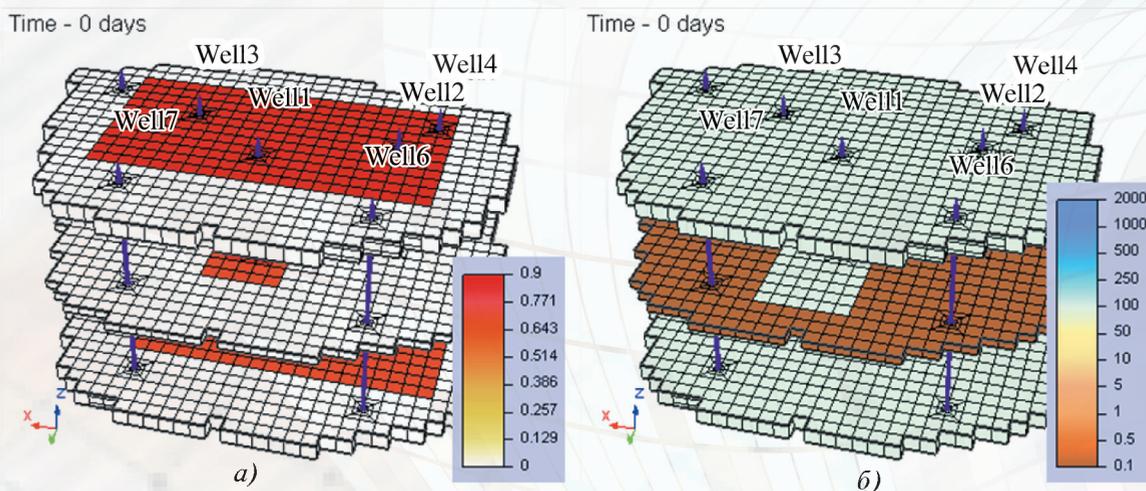


Рис. 3. Распределение начальной нефтенасыщенности (а) и проницаемости (б) в модели (для наглядности слои разделены)

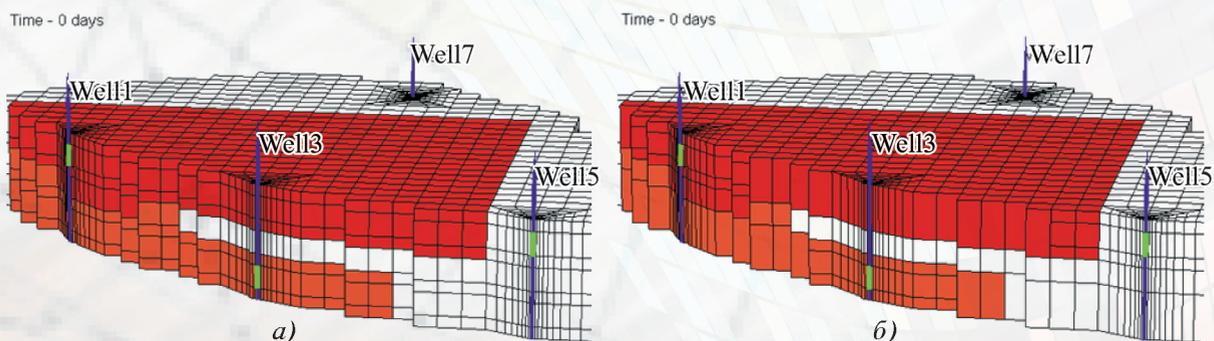


Рис. 6. Вид сеток  $H/2$  (а) и  $H/2_{NC}$  (б) в разрезе

# Программная инженерия

Том 12  
№ 9  
2021  
Пр  
ИН

Учредитель: Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

Издается с сентября 2010 г.

DOI 10.17587/issn.2220-3397

ISSN 2220-3397

## Редакционный совет

Садовничий В.А., акад. РАН  
(*председатель*)  
Бетелин В.Б., акад. РАН  
Васильев В.Н., чл.-корр. РАН  
Жижченко А.Б., акад. РАН  
Макаров В.Л., акад. РАН  
Панченко В.Я., акад. РАН  
Стемпковский А.Л., акад. РАН  
Ухлинов Л.М., д.т.н.  
Федоров И.Б., акад. РАН  
Четверушкин Б.Н., акад. РАН

## Главный редактор

Васенин В.А., д.ф.-м.н., проф.

## Редколлегия

Афонин С.А., к.ф.-м.н.  
Бурдонов И.Б., д.ф.-м.н., проф.  
Борзовс Ю., проф. (Латвия)  
Гаврилов А.В., к.т.н.  
Галатенко А.В., к.ф.-м.н.  
Корнеев В.В., д.т.н., проф.  
Костюхин К.А., к.ф.-м.н.  
Махортов С.Д., д.ф.-м.н., доц.  
Манцивода А.В., д.ф.-м.н., доц.  
Назирова Р.Р., д.т.н., проф.  
Нечаев В.В., д.т.н., проф.  
Новиков Б.А., д.ф.-м.н., проф.  
Павлов В.Л. (США)  
Пальчунов Д.Е., д.ф.-м.н., доц.  
Петренко А.К., д.ф.-м.н., проф.  
Позднеев Б.М., д.т.н., проф.  
Позин Б.А., д.т.н., проф.  
Серебряков В.А., д.ф.-м.н., проф.  
Сорокин А.В., к.т.н., доц.  
Терехов А.Н., д.ф.-м.н., проф.  
Филимонов Н.Б., д.т.н., проф.  
Шапченко К.А., к.ф.-м.н.  
Шундеев А.С., к.ф.-м.н.  
Щур Л.Н., д.ф.-м.н., проф.  
Язов Ю.К., д.т.н., проф.  
Якобсон И., проф. (Швейцария)

## Редакция

Лысенко А.В., Чугунова А.В.

Журнал издается при поддержке Отделения математических наук РАН, Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН, МГУ имени М.В. Ломоносова, МГТУ имени Н.Э. Баумана

## СОДЕРЖАНИЕ

- Khleborodov D. S.** High-Granular Micro-Segmentation in Campus Networks based on Downloadable Access Control Lists ..... 443
- Персова М. Г., Соловейчик Ю. Г., Гриф А. М.** Балансировка потоков на неконформных конечноэлементных сетках при моделировании многофазной фильтрации ..... 450
- Рухович Д. Д.** Проекция изображений в пространство для монокулярной или мультиракурсной трехмерной детекции объектов различных категорий ..... 459
- Туровский Я. А., Борзунов С. В., Вахтин А. А.** Алгоритм оценки результатов статистического анализа данных биомедицинской природы в условиях эффекта множественных сравнений ..... 470
- Качанова О. А., Левоневский Д. К.** Архитектура программного обеспечения автоматизированного тепличного комплекса на основе облачных технологий ..... 475
- Указатель статей, опубликованных в журнале "Программная инженерия" в 2021 г.** ..... 490

Журнал зарегистрирован  
в Федеральной службе  
по надзору в сфере связи,  
информационных технологий  
и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации

ПИ № ФС77-38590 от 24 декабря 2009 г.

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в подписных агентствах (индекс по Объединенному каталогу "Пресса России" — 22765) или непосредственно в редакции.

Тел.: (499) 270-16-52.

Http://novtex.ru/prin/rus E-mail: prin@novtex.ru

Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования и базу данных RSCI на платформе Web of Science.

Журнал входит в Перечень научных журналов, в которых по рекомендации ВАК РФ должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

© Издательство "Новые технологии", "Программная инженерия", 2021

# SOFTWARE ENGINEERING

## PROGRAMMNAYA INGENERIA

Vol. 12

N 9

2021

Published since September 2010

DOI 10.17587/issn.2220-3397

ISSN 2220-3397

### Editorial Council:

SADOVNICHY V. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.),  
Acad. RAS (*Head*)  
BETELIN V. B., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Acad. RAS  
VASIL'EV V. N., Dr. Sci. (Tech.), Cor.-Mem. RAS  
ZHIZHCENKO A. B., Dr. Sci. (Phys.-Math.),  
Acad. RAS  
MAKAROV V. L., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Acad.  
RAS  
PANCHENKO V. YA., Dr. Sci. (Phys.-Math.),  
Acad. RAS  
STEMPKOVSKY A. L., Dr. Sci. (Tech.), Acad. RAS  
UKHLINOV L. M., Dr. Sci. (Tech.)  
FEDOROV I. B., Dr. Sci. (Tech.), Acad. RAS  
CHETVERTUSHKIN B. N., Dr. Sci. (Phys.-Math.),  
Acad. RAS

### Editor-in-Chief:

VASENIN V. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.)

### Editorial Board:

ANTONOV B.I.  
AFONIN S.A., Cand. Sci. (Phys.-Math)  
BURDONOV I.B., Dr. Sci. (Phys.-Math)  
BORZOV JURIS, Dr. Sci. (Comp. Sci), Latvia  
GALATENKO A.V., Cand. Sci. (Phys.-Math)  
GAVRILOV A.V., Cand. Sci. (Tech)  
JACOBSON IVAR, Dr. Sci. (Philos., Comp. Sci.),  
Switzerland  
KORNEEV V.V., Dr. Sci. (Tech)  
KOSTYUKHIN K.A., Cand. Sci. (Phys.-Math)  
MAKHORTOV S.D., Dr. Sci. (Phys.-Math)  
MANCIVODA A.V., Dr. Sci. (Phys.-Math)  
NAZIROV R.R., Dr. Sci. (Tech)  
NECHAEV V.V., Cand. Sci. (Tech)  
NOVIKOV B.A., Dr. Sci. (Phys.-Math)  
PAVLOV V.L., USA  
PAL'CHUNOV D.E., Dr. Sci. (Phys.-Math)  
PETRENKO A.K., Dr. Sci. (Phys.-Math)  
POZDNEEV B.M., Dr. Sci. (Tech)  
POZIN B.A., Dr. Sci. (Tech)  
SEREBRJAKOV V.A., Dr. Sci. (Phys.-Math)  
SOROKIN A.V., Cand. Sci. (Tech)  
TEREKHOV A.N., Dr. Sci. (Phys.-Math)  
FILIMONOV N.B., Dr. Sci. (Tech)  
SHAPCHENKO K.A., Cand. Sci. (Phys.-Math)  
SHUNDEEV A.S., Cand. Sci. (Phys.-Math)  
SHCHUR L.N., Dr. Sci. (Phys.-Math)  
YAZOV Yu. K., Dr. Sci. (Tech)

**Editors:** LYSENKO A.V., CHUGUNOVA A.V.

## CONTENTS

<b>Khleborodov D. S.</b> High-Granular Micro-Segmentation in Campus Networks based on Downloadable Access Control Lists . . . . .	443
<b>Persova M. G., Soloveichik Yu. G., Grif A. M.</b> Flow Balancing in Modeling of Multi-Phase Flow using Non-Conformal Finite Element Meshes . . . . .	450
<b>Rukhovich D. D.</b> 2D-to-3D Projection for Monocular and Multi-View 3D Multi-class Object Detection in Indoor Scenes . . . . .	459
<b>Turovsky Ya. A., Borzunov S. V., Vahtin A. A.</b> An Algorithm for Evaluating the Results of Statistical Analysis of Biomedical Data under the Conditions of the Effect of Multiple Comparisons . . . . .	470
<b>Kachanova O. A., Levonevskiy D. K.</b> Software Architecture of an Automated Greenhouse Complex based on Cloud Technologies . . . . .	475
<b>Index</b> of articles published in the journal "Software Engineering" in 2021 . . . . .	490

---

---

# High-Granular Micro-Segmentation in Campus Networks based on Downloadable Access Control Lists

D. S. Khleborodov, dkhleborodov@gmail.com, Business Ecosystems, Skolkovo, Russia Territory of the Skolkovo innovation center, Moscow, 143026, Russian Federation

*Corresponding author:*

**Khleborodov Denis S.**, PhD in Physics and Mathematics, CEO, Business Ecosystems, Skolkovo, Russia Territory of the Skolkovo innovation center, Moscow, 143026, Russian Federation  
E-mail: dkhleborodov@gmail.com

*Received on April 26, 2021  
Accepted on October 18, 2021*

*Micro-segmentation of local networks is an important element of network security. The main goal of micro-segmentation of network is to reduce a risk of compromising hosts during a cyber-attack.*

*In micro-segmented networks, if one of the hosts has been compromised, the malicious code or attacker will be limited in the "horizontal" actions by the micro-segment to which the compromised host belongs. Existing methods of micro-segmentation of networks have operational drawbacks that impede their effective practical application.*

*This article presents a new method of micro-segmentation of local wired and wireless networks based on downloadable and wireless access control lists, which allows to achieve a high level of granularity of network access policies by minimizing the microsegment, along with high operational characteristics.*

**Keywords:** network segmentation, network micro-segmentation, ACL, wireless ACL, dACL, wACL, downloadable access control lists, wireless access control lists

УДК 004.724

DOI: 10.17587/prin.12.443-449

**Д. С. Хлебобородов**, канд. физ.-мат. наук, ген. директор, dkhleborodov@gmail.com, Business Ecosystems, Сколково, Москва

## Высокогранулярная микросегментация в локальных вычислительных сетях на основе загружаемых и беспроводных списков контроля доступа

*Микросегментация локальных сетей является важным элементом сетевой безопасности. Основная цель микросегментации сети заключается в снижении риска компрометации хостов локальной сети в ходе кибератаки. В микросегментированных сетях, в случае, если один из хостов был скомпрометирован, то вредоносный код или злоумышленник будет ограничен в своих действиях микросегментом, к которому принадлежит скомпрометированный хост. Существующие методы микросегментации имеют эксплуатационные недостатки, которые затрудняют их эффективное практическое использование. В статье изложен новый метод микросегментации локальных проводных и беспроводных сетей на основе загружаемых и беспроводных списков контроля доступа, который позволяет добиться высокого уровня гранулярности политики доступа за счет минимизации микросегмента наряду с высокими эксплуатационными характеристиками.*

**Ключевые слова:** сегментация сетей, сетевая микросегментация, загружаемые списки контроля доступа, беспроводные списки контроля доступа, ACL, dACL, wACL

### Introduction

Network segmentation is commonly understood as the division of a network into broadcast domains [1, 2]. The main purpose of network segmentation is to reduce the amount of broadcast traffic to the network interface of

hosts located in the same local area network by minimizing the broadcast domains [3–6]. In Ethernet-based local area networks, VLAN technology is used for this kind of segmentation. IEEE 802.1Q-based trunk ports are used to reduce the number of links between local network switches in which there is more than one network seg-

ment formed through VLANs. IEEE 802.1Q is an open standard that describes a traffic tagging procedure for sending VLAN membership information between network switches. L3 devices are used to establish communication between VLANs [7, 8]. The network segmentation disadvantage is that access between hosts of the same VLAN is not restricted without additional measures. This disadvantage is exploited by modern types of malicious code to spread inside local networks to infect as many hosts as possible. After traversing a network perimeter, typically using application-layer protocols (HTTP(S), IMAP(S), POP3(S), FTP(S)) that are commonly used by local network users, malicious code attempts to distribute its copy to other hosts, or perform active network activities against these hosts: scanning, applying exploits, trying to gain network access. This is accomplished in one of the available methods, by example, through exploiting vulnerabilities in the network services available on these hosts, by performing authorized anonymous connections, or connecting using previously compromised credentials or access attributes (Pass-the-Hash attacks). All of these methods involve network communication between hosts on a local area network. This type of interaction is also referred to as "horizontal" [9]. Among the malicious code that uses this kind of propagation technique there are modern ransomware types such as Petya, Bad Rabbit, and GoldenEye [10]. Various micro-segmentation techniques are used as measures to protect against the "horizontal" spread of malicious code in campus networks. One of these methods is Security Group Tagging (SGT) based on local firewalling at the network host level [11].

The SGT tag carries the context of information about a particular network access session, and also its parameters, such as listed below:

- access time;
- the type of network access;
- authentication method;
- device type;
- authentication parameters;
- user and its parameters;
- device status evaluation, etc.

This tag is assigned to the network access device by the access control and accounting server, which acts as a RADIUS server. The tag is assigned as a session authorisation result of the endpoint device connected, uniquely identifies it and is carried across the network along with the endpoint's traffic. In effect, endpoint traffic is tagged at the switch port level. Tagging enables each device along the packet path to see and make a decision about how to handle the tagged packet. Such tagging can encode a set of attributes, so it allows for flexible packet processing policies (filtering, logging).

A local network host firewall can be either a simple packet filter, or a full application layer firewall with session state control, or a set of functions that can all together be called an NGFW [12–14]. Almost all known operating systems include or support local firewalls, such as Windows firewall or iptables. Also, many host-level information security tools support firewalling functions.

Both methods described have certain practical disadvantages for performing micro-segmentation, while also being very efficient [15]. The main disadvantages of the SGT-based method are the proprietary nature of the tech-

nology and its support only by certain switch models. Micro-segmentation can be implemented using SGT if a network is built using switches that support this technology. The method that allows this is called SGACL (Security Group Access Control List). SGACL access lists are generated in the Cisco ISE (Identity Service Engine) system. Switches belonging to the TrustSec domain [16, 17] allow micro-segmentation to be implemented by filtering traffic according to SGACL. Unlike dACL, SGACL access lists allow using not IP addresses but labels (numeric identifiers from 0 to 65 535) as access attributes which network hosts receive after their authorisation in a switch port. Tagging allows the IP address not to be used as an access attribute, making it much easier to generate and maintain an IP plan. It also allows an existing IP plan not to be changed. Changing the IP plan can be very time consuming as it will require changing the IP addresses of the hosts on the network and changing the firewall policies based on the IP addresses.

Another important feature of tags is that they can identify not only the host but also the context. Context refers to access time, access type (wired or wireless), authentication method, device type, authentication parameters, user parameters, and device state. A tuple of such parameters can be identified by a tag, whereupon traffic marked with such a tag can be further processed by security devices according to various criteria, thus ensuring high granularity of policy. SGACLs are formed as a matrix, where the intersection of the source label and the destination label indicates the relevant ACL, which defines the interaction between the source device and the target device [18].

The TrustSec domain can operate in networks where only part of the switches support SGT. In case the tagged traffic reaches a device that does not support SGT, the frame is simply discarded as not meeting the IEEE standard. Many people do not have a campus built entirely on the basis of switches that support SGT. In addition, the actual challenge will be the transmission of tags across the corporate network. The SXP protocol was developed to solve these problems.

This protocol operates on top of the TCP transport protocol, with standard port 64999. SXP sessions are established between two devices. SXP solves a simple problem.

SXP sessions are established in a point-to-point topology between devices exchanging tag information. A client session receives a security label from a RADIUS server during the authentication process; this label is stored in the access device database (NAD) along with binding the client's current IP address. This IP $\leftrightarrow$ SGT mapping is exchanged between devices using SXP protocol. An SXP session can be built between different L3 segments that can either filter traffic based on tags or tag or forward further the traffic that has already been tagged.

For server infrastructures, there are several flexible solutions for tagging, both statically and dynamically. Statically, tags can be assigned to an IP/Switch interface/VLAN. Depending on the specific switch model used, different static tagging models may be available. Static tagging can be useful if a dynamic tagging method cannot be implemented, e.g. standalone servers without virtualisation [19].

In the case of hardware frame tagging, the tag is transmitted in trunk channels. The device terminating the trunk must trust an adjacent device to accept tags from it.

---

---

A so-called trust network is created where each switch is logged into the NDG (Network Device Group) device base on a RADIUS server, authenticated by password and automatically assigned a PAC. The switch then authenticates its adjacent device using EAP-FAST via 802.1x protocol resulting in a successful authentication to build the trust network. MACSEC 802.1AE crypto protection can be optionally activated on the trunk between the two switches (if both switches support 802.1AE) to maintain confidentiality, integrity and authenticity of transmitted tags and data. If SXP is used to transfer a tag database between network devices, both SXP session participants are optionally authenticated using pre-set keys. Speaking of network devices that support the TrustSec architecture it is worthwhile to say that, unlike hardware tagging, which only supports a limited number of devices, SXP protocol is supported on a much broader range of equipment.

For SGT-based micro-segmentation method to work, it is essential that the access layer switches and wireless network controllers must have SGT support at a minimum.

A disadvantage of the host-based network access control method is that it can be difficult to implement on all local network endpoints due to the lack of appropriate firewalling features on some hosts in the network. A second, no less significant, disadvantage is the difficulty of organising partial host connectivity. This may be necessary when a number of interactions need to be allowed for applications that have an architecture where interactions take place between hosts on the network to work properly. A third disadvantage is that the local firewall operation can be disrupted if intruders elevate permissions on a host or management server.

Thus, finding a new method that does not have the disadvantages outlined above is an urgent task because it will effectively use micro-segmentation to secure local networks against modern types of attacks.

The main goal of this paper is to present a granular micro-segmentation method for wired and wireless networks and to compare it with existing methods.

### **Micro-segmentation method based on access control lists**

The proposed method is based on downloadable Access Control Lists (dACL) and wireless Access Control Lists (wACL) [20]. Both types of ACLs are widely supported by switches and Wireless LAN Controllers (WLCs). What distinguishes dACLs from other types of network ACLs is that they are configured to a RADIUS server, while wACLs differ in that they are configured to a wireless LAN controller. In this case, after a user or host successfully authenticates by wired means to a switch port, the dACL is fully transferred from the RADIUS server to the switch and is written then to the TCAM (Ternary Content-Addressable Memory) and applies to traffic on that port where the authentication was successfully completed. Other features of dACL are as follows.

- The switch deletes the dACL configuration for each user (host) when the session is ended, if authentication fails or a loss of connection to the switch port occurs.
- The switch does not store the dACLs received from the RADIUS server in the configuration file.

- If a port is not authorized, the switch deletes the dACL for the corresponding port.

- The dACL takes precedence over other ACLs.

In case of successful authentication in wireless networks no ACL is transmitted, the RADIUS server only returns the wACL ID, which is stored on the WLC. Other features of wACL are as follows.

- Each rule has parameters that affect its action.
- If "source" and "destination" attributes are specified as any, the direction in which this wACL is applied can be any.
- If the "source" or "destination" attributes are not specified as any, then the ACL filtering direction must be specified, and a rule must be created that operates in the opposite direction.
- The incoming ACL direction is a network packet coming from a wireless client to the WLC, while the outgoing direction for a network packet is from the WLC to a wireless client.
- The last implicit rule is deny.

The granularity of the policy depends inversely on the micro-segment size. Therefore, the micro-segment size should be minimised to achieve the highest access policy granularity. The smallest micro-segment consists of one host. The technical implementation of the above method is possible through a solution which includes the following components: RADIUS server, DHCP server, 802.1X supplicant (client) on a connecting host, server storing user and workstation credentials (e.g. Active Directory domain controller), Public Key Infrastructure (PKI), firewall with session state control, wireless controller, access point and switch.

The process of gaining access to a computer network by wired means can be described in the diagram shown in fig. 1.

First of all, the network must be divided into secure segments. A security segment should be understood as a set of IP networks, for access to which and from which an interworking policy is applied implemented through a firewall with a session state control function. A security segment can consist of a single VLAN or a group of VLANs depending on the number of hosts. If there are many hosts and it is necessary to reduce their overall broadcast domain, it is advisable to distribute them across several VLANs and communicate between them via a virtual routing table (VRF-lite, Virtual Routing Forwarding). It is important to note that it is advisable that VLANs from the same security segment have the same name (or belong to a named group), as this will further reduce the RADIUS server authorization rules to a single universal authorization profile with the VLAN name. This name, once received by the switch or WLC as part of the RADIUS response, will be converted into the corresponding VLAN number. A session state control firewall is an important component that will enforce the policy of the segment hosts communication with hosts and services outside of the security segment and will also protect against unauthorized access attempts from hosts outside the security segment. A detailed description of network segmentation processes is beyond the scope of this paper. Without reducing generality, three classes of hosts can be identified in the first step of the segmentation process: workstations supporting

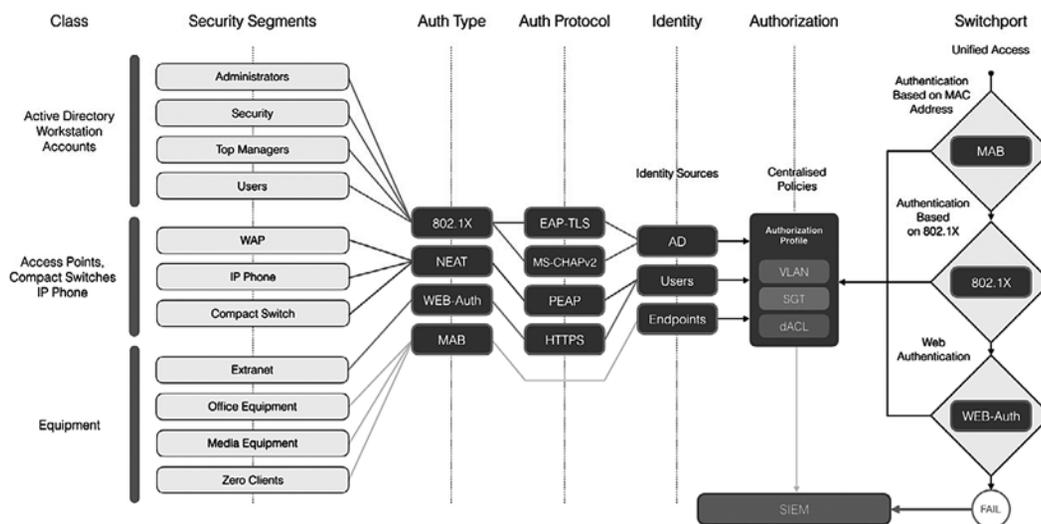


Fig. 1. Authentication process for wired networks

802.1X supplicant, devices supporting 802.1X authentication (such as wireless access points, IP phones, compact switches) and hosts for which network authentication is not possible. For the latter, the decision as to whether they belong to a security segment must be made on the basis of their MAC address. Each host class can also be divided into groups that would correspond to its security segment. The possible authentication types to be used are 802.1X, NEAT (Network Edge Authentication Transport), WEB-authentication and MAB (MAC Authentication Bypass). EAP-TLS, MS-CHAPv2, PEAP and HTTPS should be used as authentication protocols. AD, local user databases and MAC addresses based on the RADIUS server can be used to identify hosts on the network. An authorisation profile must be defined for each security segment. The authorisation profile defines the VLAN name and the dACL contents. Optionally, it can include an SGT tag for the TrustSec domain.

The process for host accessing to the network for a switch consists of attempting to authenticate it in various ways. The sequence of authentication methods can be chosen depending on how often a method is used. For example, a sequence can consist of trying to assign a profile based on MAC address (without authentication), authenticating with 802.1X or through a WEB portal with HTTPS. Public Key Infrastructure is designed to issue user, workstation and RADIUS server certificates for 802.1X protocol authentication.

Although assigning an authorisation profile based on a MAC address is not a secure way of granting access to a network, it is perfectly acceptable. For example, printers without a built-in 802.1X supplicant can be connected in this way. However, these devices do not necessarily need to have network access to any of the hosts on the network, as printing may well be handled by the print server, which will contact the printers acting as an initiator of the network connection. In this case, a session state control firewall will provide zero attack surface area from a segment with access by MAC address. Any attempt by an attacker or malicious code to take active action on such a segment will be detected as requests within the security segment

will be logged by the switch with the use of the dACL rule "deny", and attempts to reach outside the security segment will be logged by the session state control firewall. This type of firewall allows us to limit communications between the given security segment and a simplified access procedure. Using MAB instead of a static configuration additionally provides the following key benefits.

- **Accountability.** MAB ensures the accountability of access to the computing network, as the authentication process logs the device's IP address, MAC address, switch and port. This information is useful as a detective measure for IT security, network forensics, network usage and troubleshooting statistics.

- **Identity-based services.** MAB allows services to be dynamically configured based on a host's MAC address. All dynamic authentication methods that work with IEEE 802.1X authentication will also work with MAB.

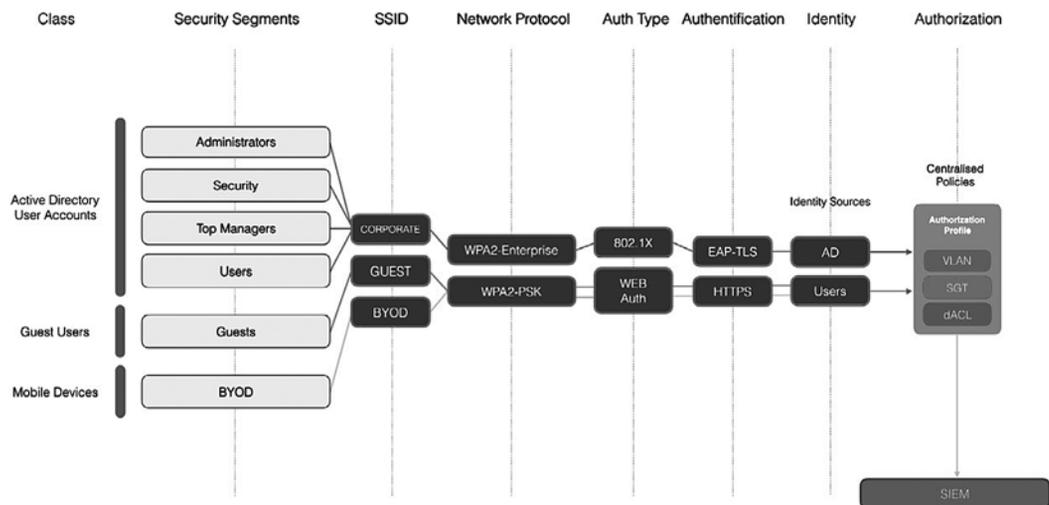
- **Network edge access control.** The MAB operates at the L2, which allows us to control connections to the network at the network access layer.

- **MAC address database.** In order for MAB to work, we must first prepare a database of the MAC addresses of the devices that are allowed to access the network. Creating and maintaining an up-to-date MAC address database is one of the main tasks of a MAB deployment.

Unauthorised access logged on the switch and firewall can be forwarded to the SIEM (Security Information and Event Management) system for further correlation, incident creation and investigation.

When hosts access the network wirelessly (fig. 2), the authenticator will not be the switch, but the WLC. The network protocols can be WPA2-Enterprise when authenticating to a RADIUS server or WPA2-PSK when statically setting authorization parameters to the WLC. The authentication procedure will be different because RADIUS requests have their own identifiers when authenticating from a controller over wireless networks.

Below there are examples of switch and RADIUS server configurations. The Cisco switch port configuration for the technical implementation of the proposed method can be as follows (listing 1).



**Fig. 2. Authentication process for wireless networks**

```
interface GigaEthernet0/1
  switchport mode access
  switchport nonegotiate
  ip arp inspection limit rate 32
  authentication order mab dot1x
  authentication port-control auto
  authentication periodic
  authentication timer reauthenticate server
  authentication violation restrict
  mab
  dot1x pae authenticator
  no mdix auto
  storm-control broadcast level 5.00
  storm-control action trap
  no cdp enable
  ip verify source
```

**Listing 1. Switch port configuration**

The following will be the configuration of the RADIUS server authentication and authorisation rules. The wired network authentication conditions are shown below (listing 2).

```
(Radius:Service-Type EQUALS Framed) AND
(Radius:NAS-Porte EQUALS Ethernet) AND
(Radius:Service-Type EQUALS Framed) AND
(Network Access:EapTunnel EQUALS PEAP) AND
(Network Access:EapAuthentication EQUALS EAP-MSCHAPv2) AND
(DEVICE:Device Type EQUALS All Device Types#SW#ASW)
```

**Listing 2. Authentication conditions in a wired network**

The wireless network authentication conditions are shown in listing 3.

```
(Radius:Service-Type EQUALS Framed) AND
(Radius:NAS-Porte EQUALS Wireless — IEEE 802.11) AND
(DEVICE:Device Type EQUALS All Device Types#WLC)
```

**Listing 3. Wireless Network Authentication Conditions**

The authentication options for wired and wireless networks are shown in listing 4.

```
IF (authentication failed) THEN REJECT
IF (user not found) THEN REJECT
IF (process failed) THEN DROP
```

**Listing 4. Authentication options for wired and wireless networks**

The authentication conditions for a wired network are shown in listing 5.

```
(Radius:Service-Type EQUALS Framed) AND
(Radius:NAS-Porte EQUALS Ethernet) AND
AD:ExternalGroups CONTAINS 802.1X-Wired-Group_W
DEVICE:Location EQUALS All Locations#Location1
DEVICE:Device Type EQUALS All Device Types#SW#ASW
```

**Listing 5. Authorisation conditions for a wired network**

The authorisation conditions for a wireless network are shown in listing 6.

```
(Radius:Service-Type EQUALS Framed) AND
(Radius:NAS-Porte EQUALS Wireless — IEEE 802.11) AND
(AD:ExternalGroups CONTAINS 802.1X-Wired-Group_WL) AND
(Radius:Called-Station-ID ENDS_WITH SSID_NAME) AND
(DEVICE:Location EQUALS All Locations#Location1) AND
(DEVICE:Device Type EQUALS All Device Types#WLC) AND
(CERTIFICATE:Extended Key Usage — OID EQUALS OID_NUMBER)
```

**Listing 6. Authorisation conditions for the wireless network**

The authorisation profile is shown in listing 7.

```
Attributes Details:
Service Template      false
Access Type           ACCESS_ACCEPT
DACL                  ACL_W
Airspace-ACL-Name     ACL_WL
```

**Listing 7. Authorisation profile**

The ACL\_W structure is shown in listing 8.

```

permit tcp any SEC_SEGMENT_NW_AND_MASK range 5000 6000
deny ip any SEC_SEGMENT_NETWORK_AND_MASK
permit ip any any
    
```

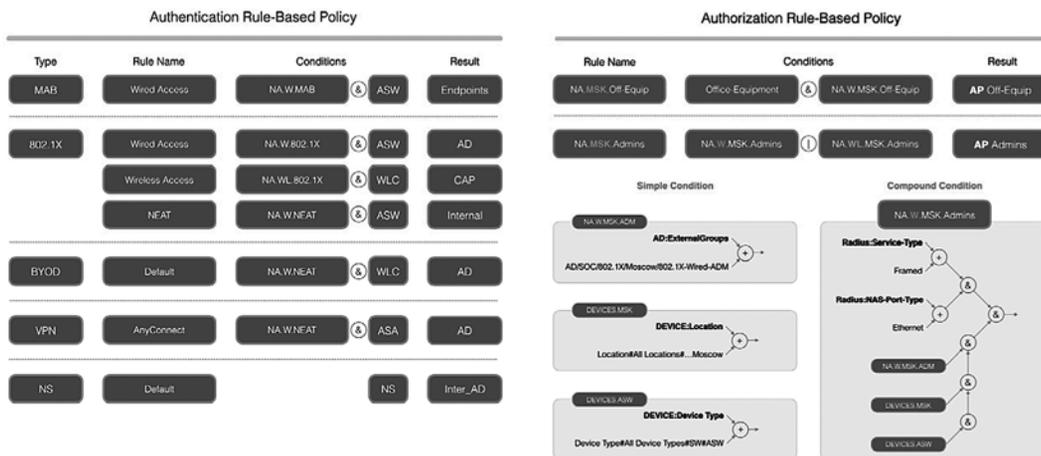
**Listing 8. Structure of the wireless ACL\_W**

The RADIUS server configuration structure is shown in fig. 3. The access policy is divided into two blocks: authentication and authorisation. Authentication rules are divided into types of access to the computer network. The authentication result is the identity source — AD or local RADIUS server databases. Authentication rules should be grouped according to their security segment membership. For this purpose, it is advisable to combine authorisation rules for wired and wireless access to the security segment. In this case, it is possible to use a single authorisation profile for both wired and wireless connection methods as an authorisation result.

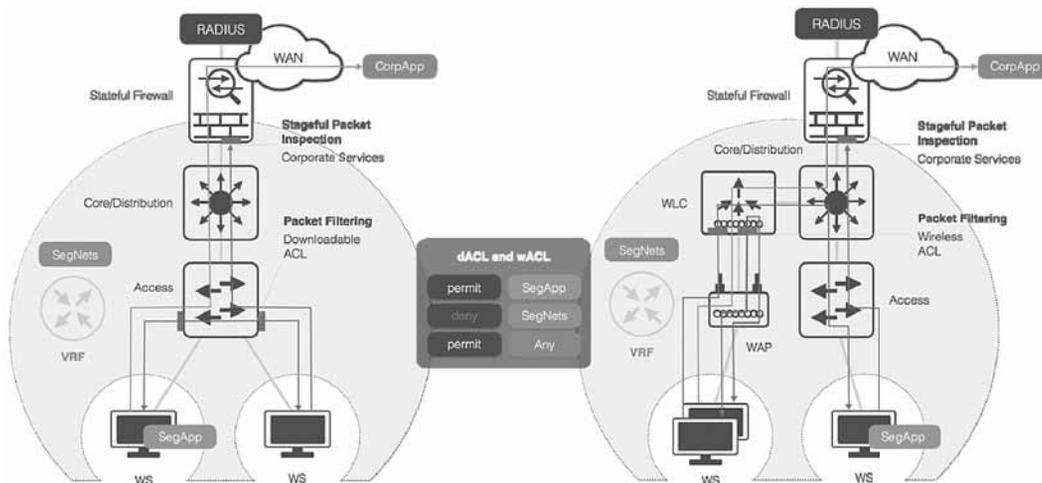
The dACL structure is noteworthy: it consists of three blocks of one line each. The first block is responsible for enabling communications between hosts within a security

segment and can generally consist of a set of lines. The second block always consists of a single entry, which indicates that all communications other than those defined in the first block are prohibited. Finally, the third block, like the second block, always consists of a single entry that is intended to enable communication to hosts outside the security segment. The availability of the third block is due to an implicit default ban on all communications. An illustration of the proposed micro-segmentation method is shown in fig. 4.

The disadvantages of the proposed method for wired networks include the ACEs (Access Control Entry) entries number limitation for dACLs. This is because dACLs are stored in TCAM, which is limited in size. Thus TCAM limits the access control lists and thus the flexibility of the access policy. The access control list length is mainly affected by the heterogeneity of the security segment address space. To solve this problem we propose organizing the IP address space of the segment in such a way as to take advantage of the summarization method, which idea is to identify a set of networks with fewer entries than enumerating all of their addresses. With the right approach to address space organisation, a single identifier



**Fig. 3. RADIUS server configuration structure**



**Fig. 4. Micro-segmentation by dACL and wACL**

## Comparison of micro-segmentation methods for wired and wireless networks

Criterion	Micro-segmentation based on dACL and wACL	Micro-segmentation based on SGT	Micro-segmentation by means of a local firewall host network
Proprietary technology	–	+	–
Volume of configurations during changes	Small	Big	Medium
Partial host connectivity	+	+	+
Level of performance	At network level	On network level	On the host level
Granularity degree of micro-segment interaction policy	High	Medium	High

(summation) can be achieved in many cases. Then, in case if hosts need to be mutually isolated from each other, the dACL will contain two ACEs. This small number of ACEs is not an obstacle for use on any dACL-enabled switch.

### Comparison

A comparison between the proposed and known methods is presented in table.

As shown in table, the proposed approach is not based on proprietary technologies and has a low volume of configurations for access policy changes; it also allows the organisation of partial micro-segment connectivity and operates at the network level and allows the creation of a granular micro-segment interaction policy.

### Conclusion

In this paper, a new method for granular micro-segmentation of wired and wireless networks based on downloaded and wireless access control lists has been presented. A comparative analysis of the proposed method, and the method based on SGT tags as well as the method of micro-segmentation by means of local firewall at the network host level has been carried out. From the results of the analysis, it can be concluded that the proposed method is applicable for micro-segmentation in campus networks and has wider application, since it is not based on proprietary technologies.

### References

1. **Miller L., Soto J.** *Micro-segmentation for Dummies*, VMware, Tech. Rep., 2015.
2. **Fulton III S. M.** *Micro-segmentation: How VMware Addresses the Container Security Issue*, 2016, available at: <https://thenewstack.io/microsegmentation-how-vmware-addresses-the-container-security-issue/>
3. **Pott T.** *Micro-segmentation is the Future*, 2017, available at: <https://virtualizationreview.com/articles/2017/06/28/microsegmentation-is-the-future.aspx>
4. **Radhakrishnan R.** *How to Configure Micro-Segmentation in NSX Data Center for VSphere 6.4*, 2019, available at: <https://vmarena.com/how-to-configure-micro-segmentation-in-nsx-data-center-for-vmware-6-4/>
5. **AlgoSec.** *Network Segmentation*, available at: <https://www.algosec.com/network-segmentation/>

6. **Kindervag J., Ferrara E.** Developing a Framework to Improve Critical Infrastructure Cyber-security, *The National Institute of Science and Technology*, available at: [http://csrc.nist.gov/cyberframework/rfi\\_comments/040813\\_forrester\\_research.pdf](http://csrc.nist.gov/cyberframework/rfi_comments/040813_forrester_research.pdf)

7. **Bigelow S. J.** Micro-segmentation lets software define network security, *Tech Target Search DataCenter*, 2016, available at: <https://searchdatacenter.techtarget.com/feature/Microsegmentation-lets-software-define-network-security>

8. **D'Agostino F.** ACI Surpasses VMware NSX Again with Micro Segmentation & End-Point Granularity, *Cisco Blogs*: <https://blogs.cisco.com/datacenter/aci-surpasses-vmware-nsx-again-with-micro-segmentation-end-point-granularity>

9. **NGMN.** *Alliance Description of Network Slicing Concept*, Tech. Rep., 2016.

10. **Northcutt S.** The Attack Surface Problem, *Security Laboratory, Defense in Depth Series*, available at: <https://www.sans.edu/cyber-research/security-laboratory/article/did-attack-surface>

11. **Geoff Huang.** Three Requirements for True Micro-Segmentation, 2016, available at: <http://www.networkcomputing.com/networking/three-requirements-true-micro-segmentation/1151379004>

12. **Desnitsky V., Kotenko I.** Configuration Based Design of Secure Embedded Devices, *Information Security Problems. Computer Systems*, 2013, no. 1, pp. 44–54.

13. **Krasov A., Levin M., Shterenberg S., Isachenkov P.** Traffic Flow Management Model in Software-Defined Networks with Unequal Load Metric, *H&ES Research*, 2016, vol. 8, no. 4, pp. 70–74.

14. **Krasov A., Levin M., Shterenberg S., Isachenkov P.** Methodology Research on the Efficiency of the Traffic Flow Management Method based on the Information about the Load of Software-Defined Networks with Unequal Route Metric, *Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1. Natural and technical science*, 2016, no. 4, pp. 3–8.

15. **Huang Dijiang, Chowdhary Ankur, Pisharody Sandeep.** Micro-segmentation: From Theory to Practice, *Software-Defined Networking and Security*, CRC Press, 2018, DOI: 10.1201/9781351210768-8.

16. **Kovalev D.** TrustSec on the protection of corporate networks, *Vek kachestva*, 2010, no. 4, pp. 44–45 (in Russian).

17. **Kindervag J.** *Building Security into Your Networks DNA: The Zero Trust Network Architecture*, Forrester Research, Tech. Rep., 2010.

18. **McKeown N., Anderson T., Balakrishnan H., Parulkar G., Peterson L., Rexford J., Shenker S., Turner J.** Openflow: Enabling innovation in campus networks, *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 2008, vol. 38, no. 2, pp. 69–74.

19. **VMware.** Data Center Micro-Segmentation: A Software Defined Data Center Approach for a Zero Trust Security Strategy, Tech. Rep., 2014.

20. **Liang C., Yu F. R.** Wireless network virtualization: A survey, some research issues and challenges, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 2015, vol. 17, no. 1, pp. 358–380.

М. Г. Персова, д-р техн. наук, проф., зав. лабораторией, persova@ami.nstu.ru,  
Ю. Г. Соловейчик, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, soloveychik@ami.nstu.ru,  
А. М. Гриф, аспирант, мл. науч. сотр., grif.2013@stud.nstu.ru,  
Новосибирский государственный технический университет

## Балансировка потоков на неконформных конечноэлементных сетках при моделировании многофазной фильтрации

*Рассмотрен метод балансировки численных конечноэлементных потоков при моделировании процесса многофазной фильтрации с использованием неконформных шестигранных сеток. Проведены исследования для простой конфигурации коллектора и на более сложной модели реального месторождения высоковязкой нефти Республики Татарстан. Результаты расчетов показали, что метод балансировки не только гарантирует выполнение закона сохранения масс, но и позволяет получать достаточно точное решение при использовании неконформных конечноэлементных сеток с крупными ячейками. При этом он свободен от сложностей, обусловленных ориентацией сетки. Используемые неконформные сетки с произвольным числом пристыкованных шестигранников позволяют существенно снижать число степеней свободы при моделировании месторождений. В результате вычислительные затраты сокращаются практически на порядок при сохранении требуемой точности аппроксимации.*

**Ключевые слова:** моделирование нефтегазовых месторождений, многофазная фильтрация в пористых средах, метод конечных элементов, непрерывный метод Галеркина, балансировка потоков, неконформные сетки

### Введение

Качество разработки нефтяных месторождений во многом определяется адекватностью используемых цифровых моделей, способных отражать основные процессы, происходящие в коллекторе [1]. Для моделирования реальных месторождений крайне важным является учет всех значимых неоднородностей среды, а также местоположений и конфигураций скважин и их зон перфорации. Вместе с тем используемые методы моделирования должны не только позволять получать решение, отвечающее заданному уровню точности, но и быть вычислительно эффективными и масштабируемыми [2].

Известно, что метод конечных элементов в постановке Галеркина с непрерывными базисными функциями (CG) не позволяет по распределению давления получить консервативные объемы перетекающей смеси [3, 4]. Поэтому ряд исследователей применяют его модификации в виде комбинаций конечных объемов — конечных элементов [3, 5, 6], смешанных/гибридных методов [5, 6] или специальных процедур постобработки потоков [9–11]. Однако данные методы имеют более ограниченные возможности по описанию сложной геометрии коллектора и использованию для расчетов неконформных конечноэлементных сеток [12, 13]. Они характеризуются высокими вычислительными затратами вследствие большого числа дополнительных пере-

менных [7, 8, 14]. Наблюдается также достаточно сильная зависимость решения задачи от ориентации сетки, которая может быть компенсирована лишь использованием элементов высокого порядка [15].

Кроме того, описанный как возможный к применению на неконформных конечноэлементных сетках метод [9] по своей постановке может давать противоположно направленные потоки смеси на малых гранях, примыкающих к единой большой грани при несогласованной стыковке конечных элементов. Это обстоятельство существенно ухудшает его возможности при моделировании сложных сжимаемых течений со значительным влиянием гравитационных сил. При этом достаточно ограниченными являются и сами неконформные сетки, на которых проводилось моделирование с использованием метода постобработки из работы [9], см. также [16–18]. Для уточнения аппроксимации конечные элементы в них делятся пополам. Это обстоятельство влечет за собой большое число "лишних" элементов при решении практических задач нефтедобычи, когда в сетке необходим учет разномасштабных объектов и точных местоположений зон перфорации, не лежащих целиком в одном слое модели.

В настоящей статье представлено описание метода балансировки потоков при проведении расчетов на неконформных конечноэлементных сетках. Идея этого метода была описана в работе [19]. Он верифицирован на широком классе модельных задач [19–21], на тестах SPE-1, SPE-10 [22] и применен для моде-

лирования, адаптации параметров и оптимизации режимов работы реального месторождения [22, 23]. Далее будет представлено более детальное описание и примеры использования при моделировании на пространственных неконформных конечноэлементных сетках, в которых к грани одного шестигранника может быть пристыковано произвольное число шестигранников [22, 24–26].

## 1. Математическая модель

В задачах нефтедобычи фильтрация флюидов происходит в пористой среде. Скорость фильтрации  $\vec{u}^m$  для каждой фазы с номером  $m = \overline{1, M}$  подчиняется закону Дарси:

$$\vec{u}^m = -\frac{\kappa^m}{\mu^m} \mathbf{K} \left( \text{grad} (P + P_c^m) + (0, 0, \rho^m g)^T \right),$$

где  $\kappa^m$  — относительная фазовая проницаемость;  $\mu^m$  — динамическая вязкость;  $\mathbf{K}$  — структурная проницаемость;  $P$  — давление;  $P_c^m$  — капиллярное давление фазы;  $\rho^m$  — плотность фазы;  $g$  — ускорение свободного падения. Тензор структурной проницаемости  $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{12} & K_{22} & K_{23} \\ K_{13} & K_{23} & K_{33} \end{bmatrix}$  является симметричным

и в самом общем случае все его компоненты могут быть ненулевыми. Но на практике довольно часто (особенно в задачах нефтедобычи) среда имеет два направления анизотропии и тензор  $\mathbf{K}$  может быть определен через значения латеральной проницаемости  $K_{xy}$  и вертикальной проницаемости  $K_z$ , т. е.  $K_{11} = K_{22} = K_{xy}$ ,  $K_{33} = K_z$  и  $K_{ij} = 0$  при  $i \neq j$ . Полностью заполненным ненулевыми элементами тензор  $\mathbf{K}$  становится в случае, когда оси анизотропии не совпадают с осями координат, в которых решается задача. В этом случае этот тензор, как правило, вычисляется путем соответствующего поворота лабораторной системы координат (оси которой совпадают с осями анизотропии и в которой тензор является диагональным) в ту систему координат, в которой выполняется моделирование.

Распределение давления в расчетной области  $\Omega$  описывается краевой задачей для уравнения

$$-\text{div} \left( \sum_{m=1}^M \frac{\kappa^m}{\mu^m} \mathbf{K} \left( \text{grad} (P + P_c^m) + (0, 0, \rho^m g)^T \right) \right) =$$

$$= \sum_{m=1}^M f^{m, \Omega} \quad (1)$$

с краевыми условиями

$$P|_{\Gamma^2} = P^\Gamma, \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^M \frac{\kappa^m}{\mu^m} \mathbf{K} \left( \text{grad} (P + P_c^m) + (0, 0, \rho^m g)^T \right) \Big|_{\Gamma^2} \cdot \vec{n} = f^\Gamma, \quad (3)$$

где  $\Gamma^1$  — границы расчетной области  $\Omega$ , на которых задано давление  $P^\Gamma$ , а  $\Gamma^2$  — границы скважин (зоны перфорации), через которые осуществляется отбор

или нагнетание смеси и на которых  $f^\Gamma = \sum_{m=1}^M f^{m, \Gamma}$

определяет поток смеси, а также непроницаемые границы (на них  $f^\Gamma = 0$ ).

Задача (1)–(3) решается с помощью метода конечных элементов на шестигранных неконформных сетках [22]. В таком случае в сетке могут содержаться элементы, которые имеют грани с примыкающими к ним несколькими конечными элементами. При этом такие "большие" грани, к которым примыкают грани нескольких конечных элементов, будем называть "big", а "малые" грани примыкающих элементов — "small". Если на грани заданы краевые условия (2) или (3), или к ней пристыкован только один элемент, то данные грани являются "обычными" и их будем называть "regular". Вид конечноэлементной сетки в разрезе для модели реального месторождения приведен на рис. 1 (см. вторую сторону обложки). Сетка содержит различные типы граней — "big", "small" и "regular".

Для переноса фаз по полученным скоростям фильтрации  $\vec{u}_{\Gamma_i}$  на гранях  $\Gamma_i$  конечного элемента (КЭ)  $\Omega_e$  рассчитываются объемы перетекающей (втекающей или вытекающей) смеси

$$Q_{\Gamma_i, \Omega_e} = \int_{\Gamma_i} \left[ -\sum_{m=1}^M \frac{\kappa^m}{\mu^m} \mathbf{K} \left( \text{grad} (P + P_c^m) + (0, 0, \rho^m g)^T \right) \right] \times \vec{n}_{\Gamma_i, \Omega_e} d\Gamma, \quad (4)$$

где  $\vec{n}_{\Gamma_i, \Omega_e}$  — единичная внешняя нормаль к грани  $\Gamma_i$  конечного элемента  $\Omega_e$ .

Значение перетекающего объема  $Q_{\Gamma_i}$  через грань  $\Gamma_i$  определяется с помощью взвешенной комбинации объемов (4) для содержащих/образующих грань элементов по приведенным далее правилам.

1. Если грань  $\Gamma_i$  является "regular", т. е. ее содержат элементы  $\Omega_e$  и  $\Omega_k$  ( $\Gamma_i = \Omega_e \cap \Omega_k$ ), тогда объем  $Q_{\Gamma_i}$  определяется в виде

$$Q_{\Gamma_i} = \frac{\lambda_k Q_{\Gamma_i, \Omega_e} - \lambda_e Q_{\Gamma_i, \Omega_k}}{\lambda_k + \lambda_e}. \quad (5a)$$

2. Если грань  $\Gamma_i$  является "big", ее содержит элемент  $\Omega_e$  и образуют элементы  $\{\Omega_k\}$  со "small"-гранями  $\{\Gamma_k\}$  ( $\Gamma_i = \bigcup_k \Gamma_k = \bigcup_k (\Omega_k \cap \Omega_e)$ ), тогда "малые" объемы  $Q_{\Gamma_k}$  определяются в виде

$$Q_{\Gamma_k} = \frac{\lambda_k \frac{\text{mes}(\Omega_k)}{\text{mes}(\Omega_e)} Q_{\Gamma_i, \Omega_e} - \lambda_e Q_{\Gamma_i, \Omega_k}}{\lambda_k + \lambda_e}, \quad (5b)$$

а "большой" объем  $Q_{\Gamma_i}$  вычисляется как сумма "малых" объемов:  $Q_{\Gamma_i} = \sum_k Q_{\Gamma_k}$ .

Здесь  $\text{mes}(\Omega)$  — объем элемента  $\Omega$ , а коэффициенты  $\lambda$  ( $\lambda_k$  для  $\Omega_k$  и  $\lambda_e$  для  $\Omega_e$ ) определяются в виде

$$\lambda = \tilde{K} \sum_{m=1}^M \frac{\kappa^m}{\mu^m}, \quad \text{где } \tilde{K} = \vec{n}_{\Gamma}^T \mathbf{K} \vec{n}_{\Gamma}.$$

Для выполнения закона сохранения масс (обеспечения равенства объемов втекающей и вытекающей смеси для всех конечных элементов) введем ассоциированные с гранями корректирующие добавки  $\delta Q_i$ . Такие добавки должны быть минимальны по абсолютной величине (для обеспечения близости модифицированных объемов  $\tilde{Q}_{\Gamma_i}$  к численным объемам (5а), (5б)) и вместе с тем призваны обеспечивать баланс перетекающей смеси на конечных элементах. Их значения будем находить в результате минимизации по  $\delta Q_i$  следующего функционала:

$$\sum_{e=1}^{N^e} \beta_e \left( \sum_{i \in I_{\Omega_e}} (Sg_{\Gamma_i}^{\Omega_e} \cdot |Q_{\Gamma_i}| + Sg_{\Gamma_i}^{\Omega_e} \cdot \delta Q_i) \right)^2 + \sum_{i=1}^{N^{f,c}} \alpha_i (\delta Q_i)^2, \quad (6)$$

где  $e$  — номер конечного элемента;  $N^e$  и  $N^{f,c}$  — число конечных элементов и граней "regular" и "big" соответственно;  $I_{\Omega_e}$  — множество номеров граней  $\Gamma_i$  конечного элемента  $\Omega_e$ , а  $\beta_e, \alpha_i$  — параметры регуляризации.

Параметры  $\beta_e$  определяют степень небаланса на  $\Omega_e$  объемов смеси. Их необходимо выбирать минимальными, но обеспечивающими выполнение соотношения

$$\sum_{i \in I_{\Omega_e}} (Sg_{\Gamma_i}^{\Omega_e} \cdot |Q_{\Gamma_i}| + Sg_{\Gamma_i}^{\Omega_e} \cdot \delta Q_i) / \max_i |Q_{\Gamma_i}| < \delta V^{e,crit},$$

где  $\delta V^{e,crit}$  — заданное значение, определяющее предельно допустимый небаланс на элементе. Значения же параметров  $\alpha_i$  обеспечивают близость модифицированных объемов смеси к исходным.

Еще раз отметим, что корректирующие добавки определяются из выражения (6) только для граней "regular" и "big". При этом добавки на гранях "small" вычисляются через добавки на соответствующих гранях "big" пропорционально их площади. Это обстоятельство обеспечивает согласованность в направленности и мощности потоков на гранях "small" относительно потоков на гранях "big".

Направление потока через грань  $\Gamma_i$  по отношению к содержащему ее конечному элементу определим величиной  $Sg_{\Gamma_i}^{\Omega_e}$ , значение которой равно 1 при втекании потока  $|Q_{\Gamma_i}|$  в элемент  $\Omega_e$  и  $-1$  при вытекании потока  $|Q_{\Gamma_i}|$  из элемента  $\Omega_e$ .

В результате минимизации функционала (6) по  $\delta Q_i$  получаем систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) вида

$$(\mathbf{B} + \boldsymbol{\alpha}) \mathbf{q} = \mathbf{d}, \quad (7)$$

где  $\mathbf{q}$  — это вектор, составленный из искомых значений  $\delta Q_i$  для граней "regular" и "big";  $\boldsymbol{\alpha}$  — диагональная матрица с элементами  $\alpha_i$  на главной диагонали.

Компоненты матрицы  $\mathbf{B}$  и вектора правой части  $\mathbf{d}$  вычисляются с помощью соотношений

$$B_{ij} = \begin{cases} \sum_{k \in I_{\Gamma_i}} \tilde{\beta}_k, & i = j, \\ \tilde{\beta}_e \cdot Sg_{\Gamma_i}^{\Omega_e} \cdot Sg_{\Gamma_j}^{\Omega_e}, & i, j \in I_{\Omega_e}, i \neq j, e = 1 \dots N^e, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

$$d_i = -\sum_{e=1}^{N^e} \left( \tilde{\beta}_e Sg_{\Gamma_i}^{\Omega_e} \cdot \left( \sum_{j \in I_{\Omega_e}} Sg_{\Gamma_j}^{\Omega_e} |Q_{\Gamma_j}| \right) \right).$$

Добавки  $\delta Q_i$  для граней  $Q_{\Gamma_i} \in \Gamma^2$  для краевого условия (3) необходимо исключить из СЛАУ (7), а соответствующие значения  $Q_{\Gamma_i}$  скорректировать:

$$Q_{\Gamma_i} = \sum_{m=1}^M f^{m,\Gamma_i}.$$

Сбалансированные объемы смеси  $\tilde{Q}_{\Gamma_i}$ , перетекающие через грань  $\Gamma_i$ , определяются в виде

$$\tilde{Q}_{\Gamma_i} = Sg_{\Gamma_i}^{\Omega_e} \cdot |Q_{\Gamma_i}| + Sg_{\Gamma_i}^{\Omega_e} \cdot \delta Q_i.$$

Далее вычисляются перетекающие объемы для каждой фазы и очередное (на конец рассматриваемого интервала) значение насыщенностей фаз в ячейках области. После этого переходим к расчету поля давления, перетоков и насыщенностей на следующем временном шаге.

## 2. Аппроксимация на неконформных сетках

Рассмотрим пример небольшого фрагмента неконформной сетки (рис. 2). На нем изображены четыре конечных элемента, определяемые глобальной нумерацией узлов (подписаны в прямоугольниках):

$$\Omega_1 = \{1, 2, 5, 6, 9, 10, 13, 14\};$$

$$\Omega_2 = \{2, 3, 16, 4, 17, 8, 18, 19\};$$

$$\Omega_3 = \{17, 8, 18, 19, 10, 11, 20, 12\};$$

$$\Omega_4 = \{16, 4, 6, 7, 20, 12, 14, 15\}.$$

В рассматриваемом фрагменте к грани  $\Gamma_1 = \{2, 6, 10, 14\}$  конечного элемента  $\Omega_1$  примыкают три остальных конечных элемента гранями  $\Gamma_3 = \{2, 16, 17, 18\}$ ,  $\Gamma_4 = \{17, 18, 10, 20\}$  и  $\Gamma_5 = \{16, 6, 20, 14\}$  (грань  $\Gamma_1$  является "big", а грани  $\Gamma_3, \Gamma_4$  и  $\Gamma_5$  — "small"). В свою очередь, к грани "big"  $\Gamma_2 = \{16, 4, 20, 12\}$  конечного элемента  $\Omega_4$

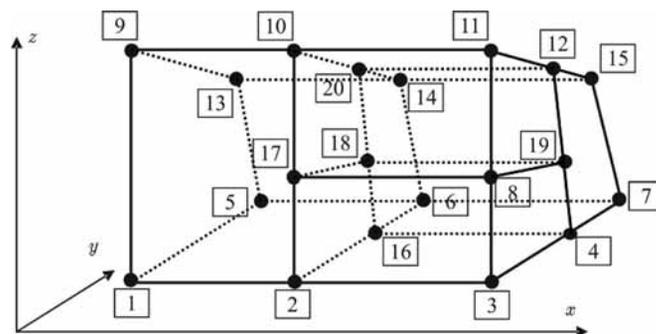


Рис. 2. Фрагмент неконформной сетки

примыкают конечные элементы  $\Omega_2$  и  $\Omega_3$  гранями "small"  $\Gamma_6 = \{16, 4, 18, 19\}$  и  $\Gamma_7 = \{18, 19, 20, 12\}$ .

Корректирующие добавки для граней  $\Gamma_i, i = \overline{3,7}$  в СЛАУ (7) учитываться не будут. Соответствующие значения можно вычислить с использованием информации для граней  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ :

$$\delta Q_i = \begin{cases} mes(\Omega_i)/mes(\Omega_1) \cdot \delta Q_1, i = \overline{3,5}, \\ mes(\Omega_i)/mes(\Omega_2) \cdot \delta Q_2, i \in \{6,7\}. \end{cases}$$

В целом, алгоритм процедуры балансировки потоков на неконформных конечноэлементных сетках имеет представленный далее вид.

### Алгоритм процедуры балансировки на неконформных сетках

- 1: Массив  $Q[f]$  размерности  $N^f$  (несбалансированные потоки на гранях)
- 2: Массив  $Beta[e]$  размерности  $N^e$  ( $\tilde{\beta}_e$  — вес небаланса на элементе) берется с предыдущего шага по времени (на первом шаге инициализирован достаточно большими значениями)
- 3: Массив  $Alpha[f]$  размерности  $N^{f,c}$  ( $\tilde{\alpha}_i$  — параметр регуляризации, определяющий близость к численным потокам) задается в виде осредненного небаланса по всем, содержащим данную грань элементам
- 4:  $M_1$ :
- 5: Сборка матрицы и вектора правой части СЛАУ (7)
- 6: Применение краевых условий для  $\delta Q_{\Gamma_i} |_{\Gamma_i \in \Gamma^2} \triangleright$  исключение Гаусса
- 7: Нахождение вектора решения  $\mathbf{q} \triangleright$  с сохранением факторизации
- 8:  $\chi^\beta \leftarrow true \triangleright$  критерий останова итераций по  $\beta$
- 9: **для** КЭ  $\Omega_e$  **выполнять**
- 10:     Вычисление небаланса на элементе  $\delta V^e = \sum_{i \in I_{\Omega_e}} \tilde{Q}_{\Gamma_i} / \max_i |Q_{\Gamma_i}|$
- 11:     **если**  $\delta V^e > \delta V^{e,crit}$ , **то**  $\triangleright \delta V^{e,crit}$  выбирается достаточно малым
- 12:      $Beta[e] \leftarrow c^\beta Beta[e] \triangleright c^\beta$  — коэффициент изменения  $Beta$
- 13:      $\chi^\beta \leftarrow false$
- 14:     **конец если**
- 15: **конец цикла**
- 16: **если**  $\chi^\beta = false$  **то**
- 17:     **перейти на**  $M_1$
- 18: **конец если**
- 19: **для** граней  $\Gamma_i \in \Gamma^{big}$  **выполнять**  $\triangleright \Gamma^{big}$  содержит все грани "big"
- 20: **для** граней  $\Gamma_j \in \Gamma^{small}$  **выполнять**  $\triangleright$  коррекция на гранях "small"
- 21:      $\delta Q_{\Gamma_j} = (Q_{\Gamma_i} + \delta Q_{\Gamma_i}) mes(\Omega_{\Gamma_j}) / mes(\Omega_{\Gamma_i}) - Q_{\Gamma_j}$
- 22:     **конец цикла**
- 23: **конец цикла**
- 24: **для** граней  $\Gamma_i$  **выполнять**
- 25:     **если**  $\Gamma_i \in \Gamma^2$  **то**
- 26:          $Q_{new}[\Gamma_i] = \sum_{m=1}^M f^{m,\Gamma_i} \triangleright$  присваивание известных из (2) потоков
- 27:     **иначе**
- 28:          $Q_{new}[\Gamma_i] = Q[\Gamma_i] + \delta Q_{\Gamma_i}$
- 29:     **конец если**
- 30: **конец цикла**

Следует отметить, что цикл по подбору параметров  $\tilde{\beta}_e$  довольно часто выполняется только один раз в начале процесса моделирования, а значения параметров  $\tilde{\alpha}_i$  изменяются только при существенном изменении потоков. Поэтому факторизацию матрицы СЛАУ (7) достаточно проводить либо на первом, либо на малом числе временных шагов. Таким образом, временные затраты, связанные с использованием процедуры балансировки потоков, являются достаточно малыми

по сравнению с затратами, требуемыми для решения краевой задачи (1)—(3) и вычисления новых значений насыщенности на каждом временном шаге.

### 3. Вычислительные эксперименты

**Модель трехслойного коллектора.** Рассмотрим модель коллектора, состоящего из трех слоев. Верхний и нижний слои являются проницаемыми, а сред-

Параметры используемых конечноэлементных сеток

Сетка	Число узлов	Число элементов	Число граней "regular" и "big"
H	25 064	21 035	67 048
H/2	70 000	81 936	221 736
H/4	293 840	253 820	801 052
H/2 <sub>NC</sub> , H/2 <sub>Rot,NC</sub>	31 732	42 943	106 361

ний — пропласток с небольшой проницаемой зоной. Фонд скважин состоит из семи единиц. Скважина Well1 осуществляет отбор смеси из верхнего слоя, Well2 — из верхнего и из нижнего слоев, а Well3 — из нижнего слоя. Скважины Well4, Well5 и Well6 нагнетают воду в верхний пласт, а скважина Well7 — в нижний. Зоны перфорации скважин находятся в середине пластов. Данная конфигурация коллектора была использована для анализа взаимовлияния добывающих и нагнетательных скважин [20].

На рис. 3 (см. вторую сторону обложки) приведено распределение начальной нефтенасыщенности и проницаемости в модели.

Расчеты проводили на пяти конечноэлементных сетках: H; H/2; H/4; H/2<sub>NC</sub>; H/2<sub>Rot,NC</sub>. При этом конформные сетки H, H/2 и H/4 задавались почти вложенными по латерали к предыдущим (т. е. H/2 к H, H/4 к H/2). Неконформная сетка H/2<sub>NC</sub> была получена из базовой сетки H/2 путем объединения элементов вне области регулярности, а сетка H/2<sub>Rot,NC</sub> была образована путем поворота по латерали на 30° сетки H/2<sub>NC</sub>. Вид используемых сеток в окрестности скважин изображен на рис. 4. Параметры сеток приведены в табл. 1.

На рис. 5 приведены графики накопленных отборов нефти для скважин Well1, Well2 и Well3 при использовании вложенных конформных сеток.

На рис. 5 видно, что при дроблении сеток накопленные отборы быстро сходятся и даже на сетке H погрешность довольно мала. Соответствующие значения относительной погрешности накопленных отборов нефти для сеток H и H/2 относительно решения на сетке H/4 представлены в табл. 2. Отметим, что такая хорошая точность на довольно грубых сетках была получена во многом благодаря использованию процедуры балансировки. Без ее ис-

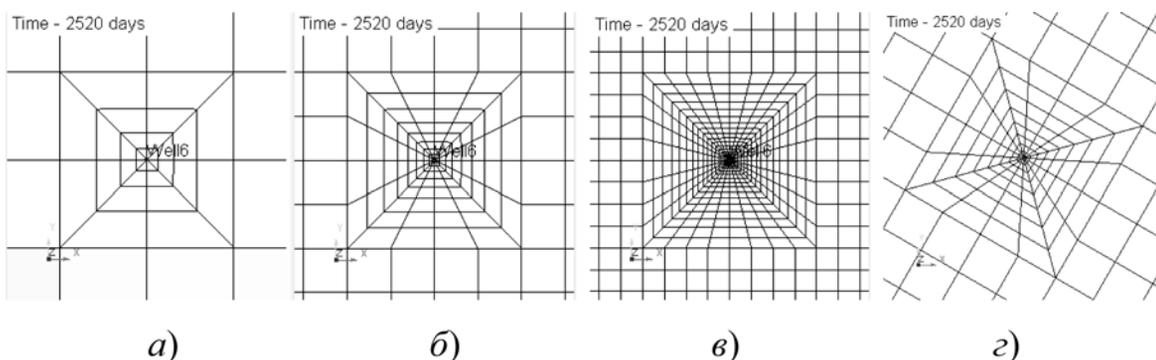


Рис. 4. Вид конечноэлементных сеток H (а), H/2 и H/2<sub>NC</sub> (б), H/4 (в) и H/2<sub>Rot,NC</sub> (г) в окрестности скважин

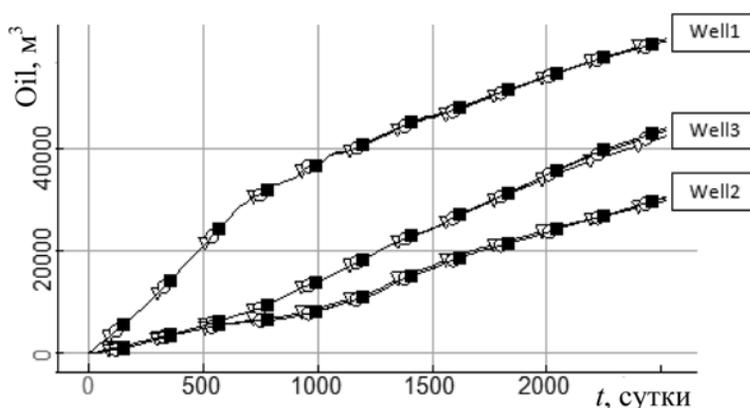


Рис. 5. Графики накопленных отборов нефти для скважин Well1, Well2 и Well3 при использовании конформных сеток H (треугольники), H/2 (кружочки) и H/4 (квадраты)

Таблица 2

Погрешность накопленных отборов нефти, %, относительно решения на подробной сетке

Сетка	Well1	Well2	Well3
H	0,32	2,47	0,84
H/2	0,11	0,17	0,22

пользования аналогичную точность можно получить либо при многократном дроблении сетки, либо при использовании конечных элементов высоких порядков (но и в этом случае сетки должны быть более подробными).

Из данных табл. 2 видно, что уже на сетке H/2 было получено решение с высокой точностью. Поэтому при моделировании с использованием неконформных сеток решение будем сравнивать с результатом, полученным на сетке H/2.

На рис. 6 (см. вторую сторону обложки) приведено сечение сеток H/2 и H/2<sub>NC</sub> в окрестности скважин. Сетка H/2<sub>NC</sub> содержит те же неоднородности, что и H/2, но имеет гораздо меньшее число элементов по вертикали за счет локального учета зон перфорации скважин.

В результате расчетов погрешность при использовании неконформной сетки составила 0,024 % для скважины Well1, 0,029 % для скважины Well2 и 0,0032 % для скважины Well3. Данная погрешность позволяет получать на неконформной сетке сравнимое по точности решение с соответствующей конформной сеткой (отличие решений на сетках H/2 и H/2<sub>NC</sub> является на порядок меньшим, чем отличие решений на сетках H/2 и H/4 — см. табл. 2).

В табл. 3 приведены затраты вычислительного времени на моделирование процесса фильтрации для различных сеток. Расчеты проводились в однопоточном режиме на ПК с процессором Intel Core I7 3,7 ГГц.

Из представленных результатов видно, что для получения сравнимого по точности решения с использованием неконформной сетки H/2<sub>NC</sub> потребовалось в 3 раза меньше вычислительного времени, чем при использовании конформной сетки H/2. При этом затраты на процедуру балансировки потоков составили около 15 % общего времени расчета. Данный результат показывает значительное преимущество применения процедуры балансировки потоков и неконформных конечноэлементных сеток даже при решении достаточно простых модельных задач.

Проверим эффект ориентации сетки. Для этого сравним решение, полученное на исходной конформной сетке H/2, с результатом, вычисленным на повернутой неконформной сетке H/2<sub>Rot,NC</sub>. На рис. 7 приведены графики накопленных отборов нефти для скважин Well1, Well2 и Well3 при использовании сеток H/2 и H/2<sub>Rot,NC</sub>. На рис. 8 (см. третью сторону обложки) представлены распределения поля насыщенности на конец времени моделирования.

Погрешность при расчете на повернутой неконформной сетке H/2<sub>Rot,NC</sub> относительно исходной сетки H/2 составила 0,77 % для скважины Well1, 0,61 % для скважины Well2 и 0,50 % для скважины

Таблица 3

Временные затраты на моделирование процесса фильтрации

Сетка	Балансировка потоков	Общее время расчета
H	19 с	1 мин 30 с
H/2	1 мин 28 с	6 мин 15 с
H/4	8 мин 18 с	32 мин 40 с
H/2 <sub>NC</sub>	22 с	2 мин 13 с

Well3. Таким образом, полученные результаты показывают, что в отличие от методов, рассмотренных в работе [15], предложенный метод моделирования свободен от сложностей, связанных с ориентацией сетки.

**Моделирование реального месторождения трудноизвлекаемой нефти.** Рассмотрим модель месторождения высоковязкой нефти Республики Татарстан (рис. 1, см. вторую сторону обложки). Данная модель состоит из нескольких проницаемых слоев с переменной толщиной, которые частично разделены множеством слабопроницаемых и почти непроницаемых зон. Отбор и нагнетание смеси происходит с помощью 62 скважин. Интервал моделирования составляет 30 лет. Подробное описание конфигурации модели и процесса адаптации параметров на историю разработки приведены в работе [22].

Расчеты проводили на двух конечноэлементных сетках, причем конформная сетка была получена из неконформной с помощью доразбиения пространственных линий в шаблонных координатах. Параметры данных сеток представлены в табл. 4.

Таблица 4

Параметры используемых конечноэлементных сеток

Характеристика	Конформная конечно-элементная сетка	Неконформная конечно-элементная сетка
Число узлов	546 831	164 880
Число элементов	515 928	141 332
Число граней "regular" и "big"	1 580 816	458 366

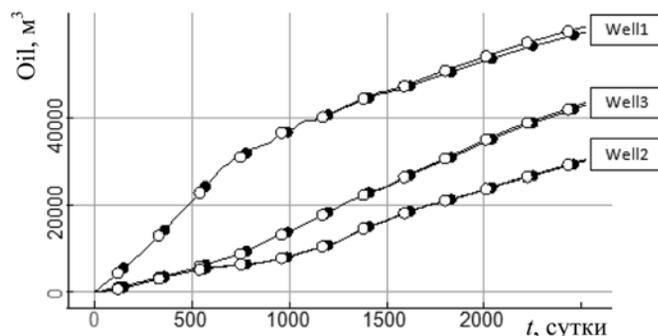


Рис. 7. Графики накопленных объемов нефти при использовании сетки H/2 (белые кружочки) и H/2<sub>Rot,NC</sub> (черные кружочки)

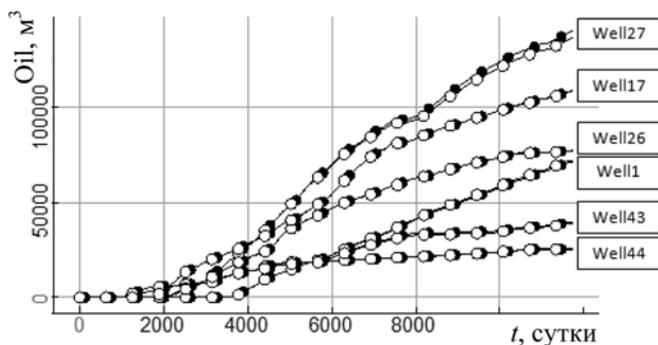


Рис. 9. Графики накопленных объемов нефти при использовании конформной (белые кружочки) и неконформной (черные кружочки) сетки

Таблица 5

Погрешность отборов нефти при использовании различных конечноэлементных сеток

Скважина	Погрешность, %
W1	0,68
W17	0,12
W26	0,13
W27	1,02
W43	1,18
W44	0,22

На рис. 9 приведены графики накопленных отборов нефти для скважин W1, W17, W26, W27, W43 и W44 при использовании двух типов сеток.

Из графиков на рис. 9 следует, что накопленные объемы нефти при использовании различных пространственных сеток достаточно хорошо согласуются. Соответствующие средние погрешности приведены в табл. 5.

Из данных табл. 5 видно, что различие в накопленных объемах нефти при использовании различных типов сеток составляет не более 1,2 %. При этом для неконформной сетки общее время моделирования составило 34 мин 3 с, а время на балансировку потоков — 3 мин 32 с. В свою очередь, при использовании конформной сетки временные затраты составили 3 ч 14 мин и 30 мин 52 с соответственно (расчеты, как и ранее, проводились в однопоточном режиме на ПК с процессором Intel Core I7 3,7 ГГц).

Таким образом, метод балансировки потоков при использовании неконформных конечноэлементных сеток позволяет сократить вычислительные затраты для моделирования участков реальных месторождений практически в 6 раз, сохраняя при этом требуемую точность аппроксимации.

## Заключение

Результаты исследований показали, что метод балансировки позволяет получать консервативное решение при использовании неконформных конеч-

ноэлементных сеток с достаточно крупными ячейками. При этом данный метод полностью свободен от сложностей, связанных с ориентацией сетки, даже для сложных моделей, содержащих зоны с сильно изменяющейся проницаемостью.

Предложенный алгоритм адаптивного выбора параметров позволяет выполнять факторизацию матрицы СЛАУ на достаточно малом числе временных шагов, поэтому вычислительные затраты на процедуру балансировки потоков на порядок меньше затрат, связанных с расчетом поля давления и переносом фаз.

Используемые неконформные конечноэлементные сетки с произвольным числом пристыкованных шестигранников позволяют существенно снизить число степеней свободы при моделировании многофазных потоков в коллекторах со множеством тонких локальных включений и при наличии нескольких зон перфорации. В результате, вычислительные затраты сокращаются практически на порядок, и вместе с тем сохраняется требуемая точность аппроксимации. При увеличении масштабов модели и числа работающих скважин данное преимущество еще более возрастает.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (НИЛ "Моделирование и обработка данных наукоемких технологий", проект FSUN-2020-0012).*

## Список литературы

1. Aziz K. Petroleum reservoir simulation. — Applied Science Publishers, 1979. — 476 p.
2. Bukhtynov V., Volkov O., Durlofsky L. J., Aziz K. Comprehensive framework for gradient-based optimization in closed-loop reservoir management // Computational Geosciences. — 2015. — Vol. 19, No. 4. — P. 877–897.
3. Schmid K. S., Geiger S., Sorbie K. S. Higher order FE–FV method on unstructured grids for transport and two-phase flow with variable viscosity in heterogeneous porous media // Journal of Computational Physics. — 2013. — Vol. 241. — P. 416–444.
4. Zhang R., Zhang L., Luo J., Yang Z., Xu M. Numerical simulation of water flooding in natural fractured reservoirs based on control volume finite element method // Journal of Petroleum Science and Engineering. — 2016. — Vol. 146. — P. 1211–1225.
5. Nick H. M., Matthäi S. K. Comparison of three FE–FV numerical schemes for single- and two-phase flow simulation of fractured porous media // Transport in porous media. — 2011. — T. 90, No. 2. — P. 421–444.
6. Abushaikh A. S., Blunt M. J., Gosselin O. R., Pain C. C., Jackson M. D. Interface control volume finite element method for modelling multi-phase fluid flow in highly heterogeneous and fractured reservoirs // Journal of Computational Physics. — 2015. — Vol. 298. — P. 41–61.
7. Moortgat J., Firoozabadi A. Higher-order compositional modeling of three-phase flow in 3D fractured porous media based on cross-flow equilibrium // Journal of Computational Physics. — 2013. — Vol. 250. — P. 425–445.
8. Moortgat J., Sun S., Firoozabadi A. Compositional modeling of three-phase flow with gravity using higher-order finite element methods // Water Resources Research. — 2011. — Vol. 47, No. 5. DOI:10.1029/2010WR009801.
9. Odsäter L. H., Wheeler M. F., Kvamsdal T., Larson M. G. Postprocessing of non-conservative flux for compatibility with transport in heterogeneous media // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. — 2017. — Vol. 315. — P. 799–830.
10. Larson M. G., Niklasson A. J. A conservative flux for the continuous Galerkin method based on discontinuous enrichment // Calcolo. — 2004. — Vol. 41, No. 2. — P. 65–76.

11. Sun S., Wheeler M. F. Projections of velocity data for the compatibility with transport // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. — 2006. — Vol. 195, No. 7–8. — P. 653–673.
12. Jackson M. D., Gomes M. A., Mostaghimi P. et al. Reservoir modeling for flow simulation using surfaces, adaptive unstructured meshes and control-volume-finite-element methods // SPE Reservoir Simulation Symposium. — OnePetro, 2013. — P. SPE163633.
13. Abd A. S., Abushaikha A. Velocity dependent up-winding scheme for node control volume finite element method for fluid flow in porous media // Scientific reports. — 2020. — Vol. 10, No. 1. — P. 1–13.
14. Amooie M. A., Moortgat J. Higher-order black-oil and compositional modeling of multiphase compressible flow in porous media // International Journal of Multiphase Flow. — 2018. — Vol. 105. — P. 45–59.
15. Scovazzi G., Wheeler M. F., Mikelić A., Lee S. Analytical and variational numerical methods for unstable miscible displacement flows in porous media // Journal of Computational Physics. — 2017. — Vol. 335. — P. 444–496.
16. Lee S., Wheeler M. F. Enriched Galerkin methods for two-phase flow in porous media with capillary pressure // Journal of Computational Physics. — 2018. — Vol. 367. — P. 65–86.
17. Xu Z., Yang Y. The hybrid dimensional representation of permeability tensor: A reinterpretation of the discrete fracture model and its extension on nonconforming meshes // Journal of Computational Physics. — 2020. — Vol. 415. — P. 109523.
18. Schädle P., Zulian P., Vogler D. et al. 3D non-conforming mesh model for flow in fractured porous media using Lagrange multipliers // Computers & Geosciences. — 2019. — Vol. 132. — P. 42–55.
19. Persova M. G., Soloveichik Yu. G., Grif A. M., Patrushev I. I. Flow balancing in FEM modelling of multi-phase flow in porous media // 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). — IEEE, 2018. — P. 205–211.
20. Grif A. M., Persova M. G., Soloveychik Y. G. Determination of the effect of injection wells on production wells in their work dynamics by using hydrodynamic modeling // Science bulletin of the Novosibirsk state technical university. — 2019. — Vol. 77, No. 4. — P. 31–44.
21. Persova M. G., Soloveichik Yu. G., Patrushev I. I., Grif A. M. Numerical modeling of multi-phase flow for various junctions of water and oil saturated layers in 3-D porous media // 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). — IEEE, 2018. — P. 212–215.
22. Persova M. G., Soloveichik Yu. G., Vagin D. V. et al. The design of high-viscosity oil reservoir model based on the inverse problem solution // Journal of Petroleum Science and Engineering. — 2021. — Vol. 199. — P. 108245.
23. Persova M. G., Soloveichik Yu. G., Vagin D. V. et al. Oil Production Optimization Based on the Finite-Element Simulation of the Multi-Phase Flow in Porous Media and Inverse Problem Solution // GeoBaikal 2020. — European Association of Geoscientists & Engineers. — 2020. — No. 1. — P. 1–6.
24. Persova M. G., Soloveichik Y. G., Vagin D. V. et al. Finite element solution to 3-D airborne time-domain electromagnetic problems in complex geological media using non-conforming hexahedral meshes // Journal of Applied Geophysics. — 2020. — Vol. 172. — P. 103911.
25. Persova M. G., Soloveichik Y. G., Vagin D. V. et al. Three-dimensional inversion of airborne data with applications for detecting elongated subvertical bodies overlapped by an inhomogeneous conductive layer with topography // Geophysical Prospecting. — 2020. — Vol. 68, No. 7. — P. 2217–2253.
26. Soloveichik Y. G., Persova M. G., Domnikov P. A. et al. Finite-element solution to multidimensional multisource electromagnetic problems in the frequency domain using non-conforming meshes // Geophysical Journal International. — 2018. — Vol. 212, No. 3. — P. 2159–2193.

## Flow Balancing in Modeling of Multi-Phase Flow using Non-Conformal Finite Element Meshes

M. G. Persova, persova@ami.nstu.ru, Yu. G. Soloveichik, soloveychik@ami.nstu.ru, A. M. Grif, grif.2013@stud.nstu.ru, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

*Corresponding author:*

**Grif Alexander M.**, Junior Researcher, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Russian Federation  
E-mail: alexgrif@inbox.ru

*Received on September 14, 2021  
Accepted on October 13, 2021*

*The method of balancing numerical finite element flows in modeling a process of multiphase flow using non-conformal hexagonal meshes is considered. Studies have been carried out for a simple reservoir configuration and on a more complex model of a real field of high-viscosity oil in the Tatarstan. The research results showed that the balancing method allows one to obtain a conservative solution when using non-conformal finite element meshes with sufficiently large cells. At the same time, this method is completely free of problems associated with grid orientation, even for complex models containing zones with highly variable permeability. The proposed algorithm for the adaptive choice of parameters allows to do the factorization of the SLAE matrix at sufficiently small number of time steps; therefore, the computational costs of the flow balancing procedure are an order of magnitude less than the costs associated with calculating the pressure field and phase transfer. The used non-conformal finite element meshes with an arbitrary number of docked hexagons can significantly reduce the number of degrees of freedom when modeling multiphase flows in reservoirs with much small local heterogeneity and in the presence of several perforated zones. As a result, computational costs are reduced by almost an order of magnitude, and, at the same time, the required approximation accuracy is maintained. With an increase in the scale of the model and the number of operating wells, this advantage increases even more.*

**Keywords:** modeling of oil and gas reservoirs; multiphase flow in porous media; finite element method; continuous Galerkin method; balancing flows; non-conformal meshes

**Acknowledgements:** This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Research Laboratory "Modeling and data processing of high technologies", the project code is FSUN-2020-0012)

For citation:

**Persova M. G., Soloveichik Yu. G., Grif A. M.** Flow Balancing in Modeling of Multi-Phase Flow using Non-Conformal Finite Element Meshes, *Programmnaya Ingeneria*, 2021, vol. 12, no. 9, pp. 450–458.

DOI: 10.17587/prin.12.450-458

## References

1. **Aziz K.** *Petroleum reservoir simulation*, Applied Science Publishers, 1979, 476 p.
2. **Bukshtynov V., Volkov O., Durlafsky L. J., Aziz K.** Comprehensive framework for gradient-based optimization in closed-loop reservoir management, *Computational Geosciences*, 2015, vol. 19, no. 4, pp. 877–897.
3. **Schmid K. S., Geiger S., Sorbie K. S.** Higher order FE–FV method on unstructured grids for transport and two-phase flow with variable viscosity in heterogeneous porous media, *Journal of Computational Physics*, 2013, vol. 241, pp. 416–444.
4. **Zhang R., Zhang L., Luo J., Yang Z., Xu M.** Numerical simulation of water flooding in natural fractured reservoirs based on control volume finite element method, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, vol. 146, pp. 1211–1225.
5. **Nick H. M., Matthäi S. K.** Comparison of three FE–FV numerical schemes for single- and two-phase flow simulation of fractured porous media, *Transport in porous media*, 2011, vol. 90, no. 2, pp. 421–444.
6. **Abushaikh A. S., Blunt M. J., Gosselin O. R., Pain C. C., Jackson M. D.** Interface control volume finite element method for modelling multi-phase fluid flow in highly heterogeneous and fractured reservoirs, *Journal of Computational Physics*, 2015, vol. 298, pp. 41–61.
7. **Moortgat J., Firoozabadi A.** Higher-order compositional modeling of three-phase flow in 3D fractured porous media based on cross-flow equilibrium, *Journal of Computational Physics*, 2013, vol. 250, pp. 425–445.
8. **Moortgat J., Sun S., Firoozabadi A.** Compositional modeling of three-phase flow with gravity using higher-order finite element methods, *Water Resources Research*, 2011, vol. 47, no. 5, DOI:10.1029/2010WR009801.
9. **Odsæter L. H., Wheeler M. F., Kvamsdal T., Larson M. G.** Postprocessing of non-conservative flux for compatibility with transport in heterogeneous media, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2017, vol. 315, pp. 799–830.
10. **Larson M. G., Niklasson A. J.** A conservative flux for the continuous Galerkin method based on discontinuous enrichment, *Calcolo*, 2004, vol. 41, no. 2, pp. 65–76.
11. **Sun S., Wheeler M. F.** Projections of velocity data for the compatibility with transport, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2006, vol. 195, no. 7–8, pp. 653–673.
12. **Jackson M. D., Gomes M. A., Mostaghimi P., Percival J. R., Tollit B. S., Pavlidis D., Pain C. C., El-Sheikh A. H., Muggeridge A. H., Blunt M. J.** Reservoir modeling for flow simulation using surfaces, adaptive unstructured meshes and control-volume-finite-element methods, *SPE Reservoir Simulation Symposium*, OnePetro, 2013, pp. SPE163633.
13. **Abd A. S., Abushaikh A.** Velocity dependent up-winding scheme for node control volume finite element method for fluid flow in porous media, *Scientific reports*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 1–13.
14. **Amoie M. A., Moortgat J.** Higher-order black-oil and compositional modeling of multiphase compressible flow in porous media, *International Journal of Multiphase Flow*, 2018, vol. 105, pp. 45–59.
15. **Scovazzi G., Wheeler M. F., Mikelić A., Lee S.** Analytical and variational numerical methods for unstable miscible displacement flows in porous media, *Journal of Computational Physics*, 2017, vol. 335, pp. 444–496.
16. **Lee S., Wheeler M. F.** Enriched Galerkin methods for two-phase flow in porous media with capillary pressure, *Journal of Computational Physics*, 2018, vol. 367, pp. 65–86.
17. **Xu Z., Yang Y.** The hybrid dimensional representation of permeability tensor: A reinterpretation of the discrete fracture model and its extension on nonconforming meshes, *Journal of Computational Physics*, 2020, vol. 415, pp. 109523.
18. **Schädle P., Zulian P., Vogler D., Bhopalam S. R., Nestola M., Ebigo A., Krause R., Saar M. O.** 3D non-conforming mesh model for flow in fractured porous media using Lagrange multipliers, *Computers & Geosciences*, 2019, vol. 132, pp. 42–55.
19. **Persova M. G., Soloveichik Yu. G., Grif A. M., Patrushev I. I.** Flow balancing in FEM modelling of multi-phase flow in porous media, *2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*, IEEE, 2018, pp. 205–211.
20. **Grif A. M., Persova M. G., Soloveichik Y. G.** Determination of the effect of injection wells on production wells in their work dynamics by using hydrodynamic modeling, *Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, vol. 77, no. 4, pp. 31–44.
21. **Persova M. G., Soloveichik Yu. G., Patrushev I. I., Grif A. M.** Numerical modeling of multi-phase flow for various junctions of water and oil saturated layers in 3-D porous media, *2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*, IEEE, 2018, pp. 212–215.
22. **Persova M. G., Soloveichik Yu. G., Vagin D. V., Grif A. M., Kiselev D. S., Patrushev I. I., Nasybullin A. V., Ganiev B. G.** The design of high-viscosity oil reservoir model based on the inverse problem solution, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 199, pp. 108245.
23. **Persova M. G., Soloveichik Yu. G., Vagin D. V., Grif A. M., Patrushev I. I., Ovchinnikova A. S.** Oil Production Optimization Based on the Finite-Element Simulation of the Multi-Phase Flow in Porous Media and Inverse Problem Solution, *GeoBaikal 2020, European Association of Geoscientists & Engineers*, vol. 2020, no. 1, pp. 1–6.
24. **Persova M. G., Soloveichik Y. G., Vagin D. V., Kiselev D. S., Koshkina Y. I.** Finite element solution to 3-D airborne time-domain electromagnetic problems in complex geological media using non-conforming hexahedral meshes, *Journal of Applied Geophysics*, 2020, vol. 172, pp. 103911.
25. **Persova M. G., Soloveichik Y. G., Vagin D. V., Kiselev D. S., Grif A. M., Koshkina Y. I., Sivenkova A. P.** Three-dimensional inversion of airborne data with applications for detecting elongated subvertical bodies overlapped by an inhomogeneous conductive layer with topography, *Geophysical Prospecting*, 2020, vol. 68, no. 7, pp. 2217–2253.
26. **Soloveichik Y. G., Persova M. G., Domnikov P. A., Koshkina Y. I., Vagin D. V.** Finite-element solution to multidimensional multisource electromagnetic problems in the frequency domain using non-conforming meshes, *Geophysical Journal International*, 2018, vol. 212, no. 3, pp. 2159–2193.

Д. Д. Рухович, аспирант, daniel-rukhovich@yandex.ru, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

# Проекция изображений в пространство для монокулярной или мультиракурсной трехмерной детекции объектов различных категорий

*Предложен новый метод трехмерной детекции объектов различных категорий. Предложенный метод превосходит все существующие методы трехмерной детекции объектов по монокулярным изображениям на наборах данных SUN RGB-D и ScanNet, собранных в жилых, административных, учебных и производственных помещениях. Впервые задача трехмерной детекции объектов решена на основе мультиракурсных входов на данных, собранных в помещениях.*

*Предложенный метод трехмерной детекции объектов может найти применение в составе систем управления мобильными робототехническими устройствами. Результаты настоящего исследования могут быть использованы при решении различных задач, в частности, для навигации робототехнического устройства в помещениях, для планирования траектории движения, для захвата и манипуляции различными объектами сцены, а также для построения трехмерной реконструкции сцен с нанесенной семантической разметкой объектов.*

**Ключевые слова:** машинное обучение, глубокое обучение, трехмерная детекция объектов

## Введение

Процедура детекции в контексте настоящей статьи заключается в обнаружении объектов, классификации объектов по наперед заданным категориям и определении местоположения и ориентации этих объектов. Методы визуальной детекции объектов [1–4] оценивают расположение объекта на изображении. Методы трехмерной детекции объектов [5–7] решают задачу определения расположения объектов в пространстве, а также их геометрических параметров — пространственных размеров и ориентации в пространстве. Ориентация в пространстве, как правило, задается угловыми координатами, а именно азимутальным углом и углом между оптической осью камеры и пространственным вектором, направленным из центра камеры на центр объекта.

Источниками информации об окружающем пространстве могут служить данные, поступающие с различных датчиков записывающей установки, например, изображения в формате RGB, полученные с помощью обычной камеры. Изображения являются доступным и универсальным источником информации об окружающем пространстве. Это обусловлено тем обстоятельством, что камеры относительно дешевы, долговечны, обладают малой массой и габаритными размерами. Как следствие, они могут быть легко смонтированы практически в любом месте мобильного робототехнического устройства любого размера, дизайна и назначения. Преимущества изображений как источника информации о сцене в значительной мере определили и продолжают

определять направление развития методов анализа и обработки трехмерных сцен.

В последние годы обозначился общий тренд [8–11] на решение задач анализа трехмерных данных исключительно на основе визуальной информации. В частности, в рамках этого тренда ведутся активные исследования в области трехмерной детекции объектов на основе изображений в формате RGB.

Тем не менее при решении задачи трехмерной детекции объектов возникает ряд сложностей, обусловленных особенностями изображений как источника данных. Изображения описывают сцену и находящиеся в ней объекты, однако они не содержат полной информации о трехмерной геометрии сцены и абсолютном масштабе данных, а также о местоположении объекта в сцене или о его размерах в абсолютных значениях. В силу этого задача трехмерной детекции объектов по изображениям является недоопределенной задачей. Во-первых, по единственному входному изображению нельзя оценить масштаб данных. Кроме этого, геометрия сцены не может быть однозначно оценена из изображений, поскольку некоторые участки сцены могут находиться за пределами области видимости камеры. Тем не менее даже с учетом указанных ограничений использование нескольких изображений одной и той же сцены позволяет получить больше информации об этой сцене по сравнению с использованием единственного изображения. На этом очевидном факте основано устройство некоторых современных методов трехмерной детекции объектов [12, 13]. Такие методы на этапе тестирования используют мультиракурсные

входы, состоящие из нескольких монокулярных изображений сцены, снятых с разных ракурсов. Размер, расположение и ориентация объектов в пространстве оцениваются для каждого изображения независимо, а затем полученные оценки агрегируются для получения финального предсказания.

В настоящей работе описан новый нейросетевой метод одновременной трехмерной детекции объектов на основе монокулярных или мультиракурсных входов, получивший название ImVoxelNet-Indoor. Предложенный метод превосходит все существующие методы трехмерной детекции объектов по монокулярным изображениям на наборе данных SUN RGB-D [14], содержащем отдельные изображения помещений. На наборе данных ScanNet [15], содержащем видеопоследовательности, предложенный метод демонстрирует работоспособность в мультиракурсном режиме. Данные обоих наборов собраны в различных жилых, административных, учебных и производственных помещениях. В совокупности они покрывают широкий диапазон возможных сценариев применения метода.

Предложенный метод трехмерной детекции объектов может найти применение в составе систем управления робототехническими устройствами. Результаты настоящего исследования могут быть применены при решении различных задач, а именно:

- навигации робототехнического устройства на сцене;
- планировании траектории движения робототехнического устройства по сцене;
- захвате и манипуляции объектами сцены;
- построении трехмерной реконструкции сцен с нанесенной семантической разметкой объектов.

Постановка задачи трехмерной детекции дана в разд. 1. Разд. 2 посвящен обзору тематических публикаций. Он содержит классификацию существующих методов трехмерной детекции, а также сравнительный анализ преимуществ и недостатков различных методов. В разд. 3 описан новый нейросетевой метод трехмерной детекции объектов. Разд. 4 содержит описание условий экспериментальной проверки предложенного метода. В разд. 5 приведены результаты экспериментов в виде сводных таблиц, графиков и других способов их визуализации. Было проведено сравнение результатов предложенного метода с результатами других существующих методов, решающих аналогичную задачу, и на этом основании дана оценка предложенному методу.

## 1. Постановка задачи

Нейросетевой метод трехмерной детекции объектов представляет собой алгоритм, отображающий цифровое трехканальное изображение  $I \in R^{w \times h \times 3}$  во множество *ограничивающих параллелепипедов объектов*  $B = \{(x_k, y_k, z_k, w_k, l_k, h_k, \theta_k)\}_{k=1}^n$ , соответствующих объектам, содержащимся на этом изображении. Каждый ограничивающий параллелепипед объекта представляет собой трехмерный параллелепипед, который задается координатами центра параллелепипеда  $(x, y, z)$  шириной  $w$ , длиной  $l$ , высотой  $h$  и углом поворота  $\theta$  относительно оси  $x$ .

Подразумевается, что ось  $z$  направлена перпендикулярно опорной плоскости, на которой размещены объекты, в данном случае это поверхность пола внутри помещений. В свою очередь, опорной плоскости параллельны все ограничивающие параллелепипеды объектов и параллелепипед самого помещения. Ось  $x$  направлена вперед по лучу зрения камеры, а ось  $y$  перпендикулярна осям  $x$  и  $z$ , составляя с ними правую тройку векторов.

В настоящей работе дополнительно рассматривается постановка задачи, в которой метод трехмерной детекции объектов принимает на вход не одно изображение  $I$ , а некоторое множество изображений  $\{I_k\}_{k=1}^m$  одного помещения. Далее данная постановка задачи будет называться мультиракурсной.

## 2. Обзор публикаций по теме

Первый подраздел данного раздела содержит обзор современных нейросетевых методов трехмерной детекции объектов. Во втором подразделе рассматриваются методы, одновременно решающие задачу трехмерной детекции и другие задачи семантического анализа и обработки трехмерных сцен. К их числу относятся задачи определения геометрии сцены, построения трехмерных реконструкций объектов и др.

### 2.1. Методы трехмерной детекции объектов

Данный подраздел содержит обзор современных нейросетевых методов трехмерных объектов, разбитых на группы в соответствии с набором датчиков, используемых в качестве источника информации о сцене.

#### 2.1.1. Методы, использующие облака точек

Разреженные облака точек — одно из возможных представлений сцены, совокупность точек сцены в трехмерном пространстве. Облака точек могут быть построены, например, с использованием датчиков глубины.

Методы трехмерной детекции объектов [5, 7, 16] этой группы решают задачу обнаружения объектов посредством преобразования разреженных облаков точек в различные представления.

Небольшие пространственные размеры сцен помещений позволяют использовать трехмерные сверточные модели для трехмерной детекции объектов. Для каждой точки облака точек сцены методы трехмерной детекции объектов генерируют гипотезы об объекте, к которому может принадлежать эта точка с разной степенью достоверности. Однако объекты, располагающиеся в помещениях, могут обладать специфической особенностью, не позволяющей использовать простые алгоритмы генерирования гипотез о размерах, расположении и ориентации объектов. Некоторые объекты не являются выпуклыми: геометрический центр таких объектов может не принадлежать этим объектам. Например, геометрический центр стола или стула может находиться между ножками. Данная особенность объектов создает сложности для использования методов трехмерной детекции, поскольку в этих методах при

генерировании гипотез для каждой точки в облаке точек предполагается, что данная точка принадлежит некоторому объекту. Исходя из этого предположения, методы трехмерной детекции генерируют гипотезы о размере, расположении и ориентации этого объекта. Однако если центральная точка объекта не принадлежит объекту, то гипотеза о размере, расположении и ориентации объекта, соответствующая его центральной точке, может быть нерелевантна. Поэтому для решения задачи трехмерной детекции объектов в помещениях вводится специальный голосующий модуль, который выполняет так называемое глубокое голосование Хафа [5, 16], агрегируя информацию со всех видимых точек объекта для определения расположения его центра.

Другие методы, такие как VoxelNet [17] и 3D-SIS [7], работают с представлением трехмерного пространства в виде трехмерного параллелепипеда вокселей. Для этого область трехмерного пространства, где располагаются наблюдаемые объекты, разбивается на более мелкие области пространства трехмерной сеткой, параллельной координатным осям. Эти области пространства называются *вокселями* (сокр. от англ. *volumetric pixel*, буквально — "объемный пиксел").

### 2.1.2. Методы, использующие облака точек и изображения

За последние несколько лет были разработаны различные способы объединения облаков точек и изображений с камеры [6, 18, 19]. Эти методы могут быть разделены на перечисленные далее три группы.

Методы первой группы [18] выполняют детекцию объектов на изображении. Они используют полученные двумерные предсказания, чтобы определить область трехмерного пространства, где, предположительно, находится объект. Из всего облака точек выбирается подмножество точек, находящихся в заданной области. Это подмножество точек поступает на вход нейросетевой модели, решающей задачу трехмерной детекции объектов на основе облака точек.

Методы второй группы сначала генерируют трехмерные гипотезы о расположении объектов на основе облаков точек. Затем эти гипотезы проецируются на изображение, определяя таким образом область видимости объекта. Из изображения вырезается соответствующий участок, и из него затем извлекаются признаки с помощью нейросетевой модели. Полученные двумерные признаки далее используются для получения финальных предсказаний. К подобным методам можно отнести, например, метод Deep Sliding Shapem [19].

Методы третьей группы одновременно используют как двумерные признаки, так и трехмерные признаки изображений для генерации гипотез о расположении объекта в пространстве. Эти признаки объединяют на ранних этапах вычислений внутри нейросетевой модели. Такой подход позволяет использовать максимальное количество информации из разных источников. Так устроены, например, методы MVXNet [20] и 3D-SIS [7]. Метод 3D-SIS [7] кроме облака точек использует и мультиракурсные изображения с камер. В методе ImVoteNet [6] для обработки двумерных и трехмерных признаков изобра-

жений используются три параллельные ветви нейросетевой модели. На вход первой ветви поступают двумерные признаки изображений, на вход второй ветви — трехмерные признаки изображений, а третья ветвь обрабатывает двумерные и трехмерные признаки, конкатенированные в один тензор.

### 2.1.3. Методы, использующие монокулярные изображения

Трехмерная детекция объектов на основе единственного изображения является наиболее сложной задачей из рассмотренных.

Стандартным подходом к созданию метода трехмерной детекции объектов является добавление к методу детекции объектов на изображении дополнительной ветви нейросетевой модели, которая оценивает позу объекта в пространстве [13, 21–23]. Предсказанные нейросетевой моделью значения затем оптимизируются в целях получения наиболее правдоподобной комбинации значений. В частности, широко используется минимизация разницы между проекцией предсказанного ограничивающего параллелепипеда на плоскость изображения и истинной ограничивающей рамкой объекта на изображении (OFTNet [13], 3D-RCNN [21]).

Ряд исследований посвящен способам создания априорных гипотез о расположении объектов в пространстве. Например, при создании подобных гипотез могут быть задействованы данные других модальностей (семантическая сегментация изображений и контуры объектов, как в методе [22]), или данные из сторонних источников (трехмерные CAD-модели из дополнительного аннотированного набора данных в методе DeepMANTA [23]).

Резюмируя изложенное выше, можно сделать вывод, что многие современные методы трехмерной детекции объектов решают целевую задачу в несколько этапов, включающих этап оптимизации. Чтобы ограничить область предсказанных значений, эти методы применяют сложные эвристические алгоритмы или используют дополнительные данные. По сравнению с большинством описанных методов трехмерной детекции объектов, недавно представленный метод ImVoxelNet [24] отличается простым устройством. В то же время этот метод показывает лучшие результаты по трехмерной детекции автомобилей в уличных сценах. Кроме этого, ImVoxelNet решает задачу трехмерной детекции объектов в мультиракурсной постановке. Однако метод ImVoxelNet был специально разработан для применения в уличных сценах, которые значительно отличаются от сцен помещений. Так, в задаче детекции автомобилей в уличных сценах объекты принадлежат единственной категории. При этом наблюдается низкая вариативность размеров, внешнего вида этих объектов и их расположения в сцене. Задача трехмерной детекции объектов внутри помещений является более сложной, поскольку содержит больше неопределенности, а именно объекты не только принадлежат различным категориям, но также их внешний вид, форма и другие параметры могут значительно различаться даже для объектов, принадлежащих одной категории. Кроме того, взаимное расположение объектов вну-

три помещений носит более произвольный характер: в отличие от автомобилей, объекты могут находиться на разной высоте относительно опорной плоскости и даже располагаться друг на друге. Тем не менее использование метода ImVoxelNet в качестве базового метода для решения задачи трехмерной детекции объектов различных категорий внутри помещений представляется перспективным.

## 2.2. Методы одновременной детекции объектов и решения других задач анализа сцены

В ряде современных методов трехмерной детекции объектов задача трехмерной детекции объектов интерпретирована как подзадача комплексной задачи анализа сцены. Эти методы не только выполняют трехмерную детекцию объектов, но и параллельно решают другие задачи.

Например, в методе Holistic3D [9] нейросетевая модель обучается строить трехмерную реконструкцию помещения через минимизацию разницы между исходными кадрами и изображениями репроецированной реконструкции, а также разницу между исходными и репроецированными семантическими картами. При этом реальные объекты сцены моделируются в трехмерной реконструкции с помощью САД-моделей, что значительно ограничивает область применения этого метода.

Лучшие результаты по трехмерной детекции объектов внутри помещений принадлежат методу Total3DUnderstanding. Метод Total3DUnderstanding одновременно решает задачу трехмерной детекции объектов, а также определения трехмерной плани-

ровки помещений и оценки углов поворота камеры, а именно тангажа и крена. Задача определения трехмерной планировки помещения состоит в нахождении плоскостей, линий и углов, задающих физические границы помещения, а также в оценке пространственных размеров помещения. С использованием метода Total3DUnderstanding решается задача определения трехмерной планировки помещения в предположении, что помещение представляет собой параллелепипед. Таким образом, данный метод представляет собой алгоритм, отображающий цифровое трехканальное изображение  $I \in \mathbb{R}^{w \times h \times 3}$  в параллелепипед  $L = (x, y, z, w, l, h, \theta)$ , где  $(x, y, z)$  — координаты центра параллелепипеда;  $w$  — ширина;  $l$  — длина;  $h$  — высота;  $\theta$  — угол поворота относительно оси  $x$ .

## 3. Предлагаемый метод

Схема реализации предложенного метода монокулярной или мультиракурсной трехмерной детекции объектов ImVoxelNet-Indoor наследует основные положения метода трехмерной детекции объектов ImVoxelNet. Как следствие, общий принцип работы ImVoxelNet-Indoor аналогичен принципу работы ImVoxelNet. Так, вначале из изображений с помощью предварительно обученной нейросетевой модели извлекаются двумерные признаки, которые затем отображаются в трехмерное пространство. Полученные таким образом трехмерные признаки подаются в заключительные слои нейросетевой модели, возвращающие итоговые предсказания.

На рис. 1 изображена принципиальная схема предложенного метода.

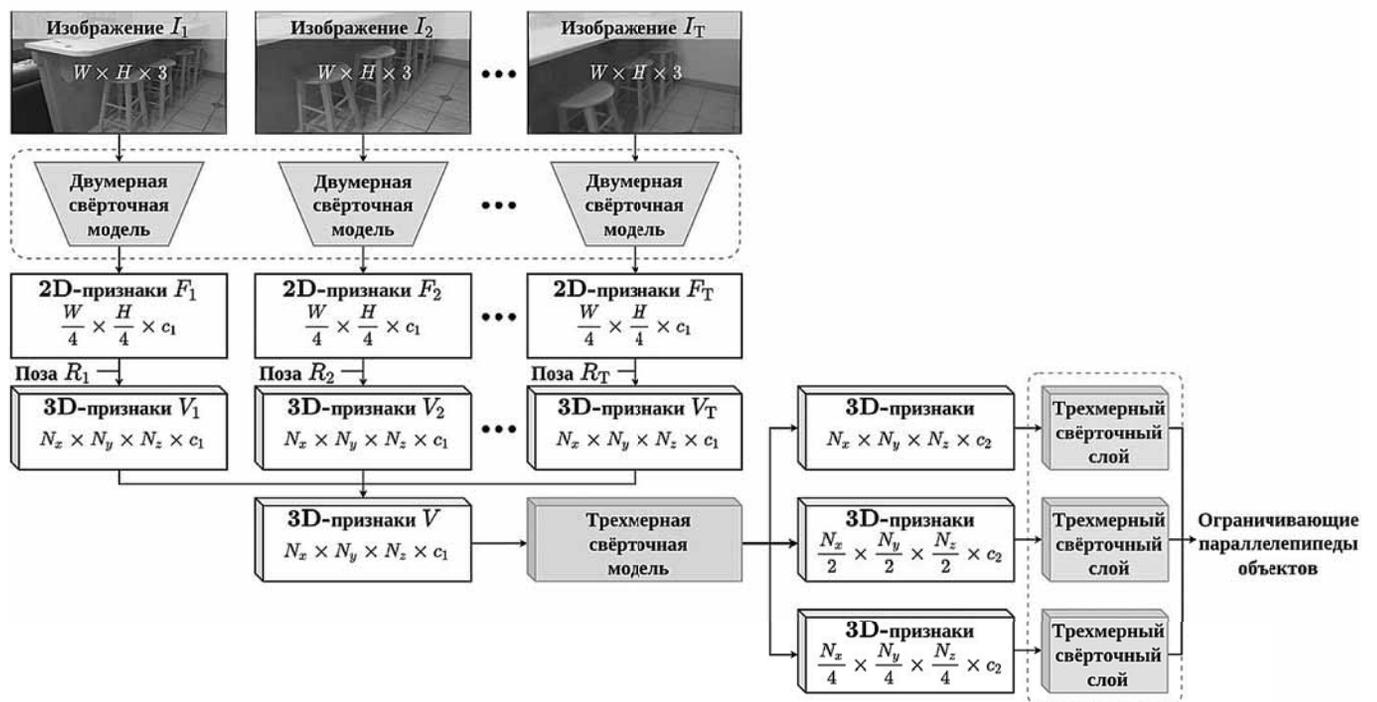


Рис. 1. Схема предложенного метода трехмерной детекции объектов:

$H$  и  $W$  — высота и ширина входного изображения в пикселях;  $c_1$  — число каналов в тензоре двумерных признаков изображения;  $N_x$ ,  $N_y$  и  $N_z$  — число вокселей по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ;  $R$  — поза камеры, состоящая из матрицы поворота камеры и вектора смещения камеры относительно начала координат

### 3.1. Извлечение двумерных признаков из изображений

Первый этап работы предложенного метода заключается в извлечении признаков из изображений с помощью предварительно обученной нейросетевой модели. Схема его реализации аналогична первому этапу работы ImVoxelNet [24] и заимствована без каких-либо модификаций.

### 3.2. Отображение двумерных признаков в трехмерный параллелепипед вокселей

Для каждого набора данных может быть определена рабочая область пространства, в которой располагаются видимые объекты. Как и любую конечную область пространства, рабочую область пространства в рамках предлагаемого подхода можно ограничить параллелепипедом с фиксированными размерами сторон по каждой из осей. Данный параллелепипед может быть задан через минимальную и максимальную координаты в метрах по трем осям. Обозначим эти координаты как  $X_{\min}$  и  $X_{\max}$ ,  $Y_{\min}$  и  $Y_{\max}$ ,  $Z_{\min}$  и  $Z_{\max}$ . Значения этих координат зависят от типа и свойств присутствующих в наборе данных сцен. Так, при работе внутри помещений определенно назначены значения возможно наперед приблизительно оценить длины сторон ограничивающего параллелепипеда, например, около 5 м для жилых комнат, 10...15 м — для учебных аудиторий, и т. д. Для простоты зададим одинаковые ограничения для всех помещений обоих наборов данных, используемых для экспериментальной проверки.

Для простоты рассмотрим регулярную воксельную сетку, в которой каждый воксел имеет одинаковые измерения по трем координатным осям. Обозначим размеры каждого вокселя в метрах как  $S$ . Если число вокселей по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$  составляет  $N_x$ ,  $N_y$  и  $N_z$ , то  $N_x S = X_{\max} - X_{\min}$ ,  $N_y S = Y_{\max} - Y_{\min}$  и  $N_z S = Z_{\max} - Z_{\min}$ .

Для каждого трехмерного вокселя искомое признаковое описание определяется однозначно. Для оставшихся вокселей в качестве признакового описания назначается вектор, состоящий из нулей. В случае мультиракурсного входа некоторым вокселям может быть назначено несколько признаковых описаний, полученных из двумерных признаков нескольких входных изображений. Для таких вокселей итоговое признаковое описание определяется как покоординатное среднее признаковых описаний.

### 3.3. Получение трехмерных признаков

На предыдущем шаге каждому видимому вокселу было назначено признаковое описание, полученное из двумерных признаков исходных изображений. Далее эти признаковые описания подаются на вход нейросетевой модели, вычисляющей трехмерные признаки вокселей.

На этом этапе необходимо учитывать специфику сцен. Так, пространственные размеры объектов, находящихся внутри помещений, могут отличаться в несколько раз. Например, в наборе данных ScanNet присутствуют объекты категорий "картина" и "кро-

вать". Также объекты могут находиться на разной высоте относительно уровня пола. Таким образом, для объектов внутри помещений характерна значительная вариативность пространственных размеров объектов и их расположений относительно сцены. Для получения признакового описания подобных объектов в методах детекции объектов на изображениях [3, 4] и методах трехмерной детекции объектов [20] используются ветвящиеся нейросетевые модели, вычисляющие признаки в разных масштабах. Обычно вычисляются признаки в трех различных масштабах [3, 4], соответственно, рабочая область пространства, разбитая на воксели размера  $N_x \times N_y \times N_z \times c_1$ , где  $c_1$  — число каналов в тензоре двумерных признаков изображения, отображается в три тензора с размерами  $N_x/4 \times N_y/4 \times N_z/4 \times c_2$ ,  $N_x/2 \times N_y/2 \times N_z/2 \times c_2$  и  $N_x \times N_y \times N_z \times c_2$ . При этом  $c_2$  устанавливается равным  $c_1$ , чтобы ограничить объем памяти, занимаемый тензором признаков.

### 3.4. Получение итоговых предсказаний

Многие современные методы трехмерной детекции объектов внутри помещений, такие как VoteNet [5], ImVoteNet [6], H3DNet [16], выполняют глубокое голосование Хафа для разреженного представления признаков в виде облака точек. Напротив, в ImVoxelNet-Indoor, аналогично методам Atlas [25] и 3D-SIS [7], используется воксельное представление признаков. В методе ImVoxelNet для получения итоговых предсказаний используется нейросетевая модель, которая именуется "голова". Такая модель принимает на вход трехмерные признаки в одном масштабе и предсказывает набор ограничивающих параллелепипедов объектов. Однако, насколько известно автору настоящего исследования, на момент написания данной работы в литературе не была описана "голова" для трехмерной детекции объектов, принимающая на вход трехмерные признаки в нескольких масштабах.

Итак, в рамках данного исследования для получения финальных предсказаний была спроектирована и реализована нейросетевая "голова", схема реализации во многом была обусловлена положениями популярного метода FCOS [4], предназначенного для детекции объектов на изображении. Однако оригинальная модель FCOS принимает на вход двумерные признаки изображения и, соответственно, содержит только стандартные двумерные сверточные слои для обработки двумерных признаков. Для использования в задаче трехмерной детекции объектов "голова" должна принимать на вход трехмерные признаки и использовать трехмерные сверточные слои для их обработки. Требуемые свойства могут быть получены путем тривиальной замены всех двумерных сверточных слоев в оригинальной модели FCOS на трехмерные сверточные слои. Полученная таким образом "голова" для трехмерной детекции объектов состоит из трех трехмерных сверточных слоев для классификации, местоположения и оценки центральности, соответственно. Веса сверточных слоев одинаковы для всех трех масштабов признаков.

Для каждого расположения  $(x^a, y^a, z^a)$  в каждом из трех масштабов "голова" оценивает вероятность  $p$ ,

расстояние до центра объекта  $c$ , а также ограничивающий параллелепипед объекта, параметризованный семью значениями:

$$\Delta x_{\min} = x_{\min}^{gt} - x^a, \quad \Delta x_{\max} = x_{\max}^{gt} - x^a,$$

$$\Delta y_{\min} = y_{\min}^{gt} - y^a, \quad \Delta y_{\max} = y_{\max}^{gt} - y^a,$$

$$\Delta z_{\min} = z_{\min}^{gt} - z^a, \quad \Delta z_{\max} = z_{\max}^{gt} - z^a, \quad \theta,$$

где  $x_{\min}^{gt}$ ,  $x_{\max}^{gt}$ ,  $y_{\min}^{gt}$ ,  $y_{\max}^{gt}$ ,  $z_{\min}^{gt}$ ,  $z_{\max}^{gt}$  обозначают минимальную и максимальную координаты по каждой из осей для истинного ограничивающего параллелепипеда объекта. Оценки, полученные из признаков в различных масштабах, объединяются. Последним шагом получения итоговых предсказаний, как и при решении задачи детекции объектов на изображении, является алгоритм подавления немаксимумов. Для этого ограничивающие параллелепипеды обнаруженных объектов проецируются на опорную плоскость. Далее алгоритм подавления немаксимумов применяется к проекциям на опорную плоскость.

### 3.5. Оценка трехмерной планировки помещения и углов поворота камеры

На момент написания настоящей статьи лучшие результаты на наборе данных SUN RGB-D показывал метод Total3DUnderstanding [11], одновременно решающий задачу трехмерной детекции объектов, а также определяющий трехмерную планировку помещения и оценивающий углы поворота камеры. Таким образом, Total3DUnderstanding решает более сложную комплексную задачу. Как следствие, сравнение предложенного метода с методом Total3DUnderstanding, основанное исключительно на точности решения задачи трехмерной детекции объектов, являлось бы некорректным. Для проведения корректного сравнения к ImVoxelNet-Indoor была добавлена нейросетевая "голова" для определения трехмерной планировки помещения и углов поворота камеры, аналогичная той, что использовалась для этих целей в Total3DUnderstanding. На вход дополнительная "голова" принимает тензор признаков, полученный простым усреднением по каждому из каналов карты признаков. Добавленная "голова" состоит из двух параллельно расположенных полносвязных слоев. Один из полносвязных слоев возвращает трехмерную планировку помещения, параметризованную семью значениями, а именно — координатами центра параллелепипеда ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), шириной  $w$ , длиной  $l$ , высотой  $h$  и углом поворота  $\theta$  относительно оси  $x$ . Другой полносвязный слой предсказывает углы поворота камеры — крен  $\beta$  и тангаж  $\gamma$ .

## 4. Эксперименты

Экспериментальная проверка была проведена на данных, собранных внутри помещений различного размера и назначения.

### 4.1. Наборы данных

#### 4.1.1. SUN RGB-D

Набор SUN RGB-D [14] является одним из первых и наиболее известных наборов данных, пред-

назначенных для решения различных задач анализа и обработки трехмерных сцен. Набор SUN RGB-D содержит 10 335 изображений различных помещений. Из них 5285 изображений отнесены к обучающей части и 5050 — к валидационной части. Разметка включает 58 657 трехмерных объектов. Кроме этого, для каждого кадра указана трехмерная планировка помещения.

#### 4.1.2. ScanNet

Набор данных ScanNet [15] содержит 1513 видеопоследовательностей, покрывающих более 700 различных сцен: жилые, учебные и технические помещения. Из них 1201 видеопоследовательность отнесена к обучающей части набора данных и 312 — к валидационной части. Всего набор данных содержит более 2,5 млн изображений с соответствующими позициями камер, а также восстановленные облака точек. Для облаков точек подготовлена семантическая разметка, а именно каждая точка размечена вручную в соответствии с категорией объекта сцены, к которому она принадлежит. При использовании набора данных ScanNet для обучения и тестирования методов трехмерной детекции разметка трехмерных объектов была сгенерирована из доступной трехмерной семантической разметки облаков точек согласно стандартному протоколу.

### 4.2. Оценка точности предсказаний (метрики качества)

Для оценки качества работы методов трехмерной детекции объектов используется метрика, называемая *средней точностью* (AP, *average precision*).

В случае детекции объектов из нескольких различных категорий, AP считается по каждой категории отдельно, а полученные значения усредняются. Результат подобного усреднения называется *усредненной средней точностью* и обозначается mAP (*mean average precision*). Метрика mAP может быть вычислена при различных порогах IoU (*intersection over union*): при указании значений данной метрики значение порога будет указано после символа @. Так, например, mAP@50 означает, что на значение IoU установлен порог в 50 %. Все предсказанные объекты, для которых значение IoU составляет меньше 50 %, не учитываются при вычислении метрики mAP@50.

Точность оценки трехмерной планировки помещения измеряется с помощью метрики IoU, вычисленной для истинного и предсказанного трехмерных параллелепипедов помещения.

### 4.3. Протокол экспериментов

#### 4.3.1. Предварительная обработка данных

Изображения наборов данных SUN RGB-D и ScanNet масштабируются до размера 640 на 480 пикселей, как было предложено в работе [25].

На этапе тестирования не используются аугментации изображений. На этапе обучения используются две аугментации: случайное горизонтальное отражение и случайное изменение размера в пределах 25 %. Реализация протоколов экспериментов на всех наборах данных взята из библиотеки MMDetection3D [26].

### 4.3.2. Процедура обучения

Задача детекции объектов заключается в предсказании расположения объекта (область значений целевой переменной непрерывна; соответственно, решается задача регрессии) и определении категории объекта (дискретная целевая переменная принимает значение из наперед заданного ограниченного множества; следовательно, решается задача классификации).

Для обучения ImVoxelNet-Indoor используется функция потерь из оригинального метода FCOS [4], адаптированная для задачи трехмерной детекции объектов. Функция потерь представляет собой взвешенную сумму нескольких компонентов, а именно  $L_{cls}$  — штрафа за ошибку классификации объекта,  $L_{cntr}$  — штрафа за ошибку в определении удаленности от центра объекта и  $L_{loc}$  — штрафа за ошибку оценки ограничивающего параллелепипеда объекта. Значение  $L_{cls}$  вычисляется как перекрестная энтропия. Штраф  $L_{loc}$  представляет собой трехмерную IoU, вычисляемую с учетом угла поворота. Для каждой гипотезы о расположении объекта в пространстве ImVoxelNet-Indoor предсказывает шесть расстояний до сторон ограничивающего параллелепипеда объекта, а также угол поворота. Соответственно, истинное расстояние до центра объекта вычисляется по формуле

$$c^{gt} = \sqrt{\frac{\min(\Delta x_{\min}, \Delta x_{\max}) \min(\Delta y_{\min}, \Delta y_{\max}) \min(\Delta z_{\min}, \Delta z_{\max})}{\max(\Delta x_{\min}, \Delta x_{\max}) \max(\Delta y_{\min}, \Delta y_{\max}) \max(\Delta z_{\min}, \Delta z_{\max})}},$$

где  $\Delta x_{\min}$ ,  $\Delta x_{\max}$ ,  $\Delta y_{\min}$ ,  $\Delta y_{\max}$ ,  $\Delta z_{\min}$  и  $\Delta z_{\max}$  — расстояния до минимально и максимально удаленных точек по каждой из трех осей.  $L_{cntr}$  вычисляется как перекрестная энтропия между истинным расстоянием до центра объекта  $c^{gt}$  и предсказанным расстоянием до центра  $c$ .

Для обучения дополнительной "головы", оценивающей трехмерную планировку помещений и углы поворота камеры, к функции потерь добавляются новые компоненты  $L_{layout}$  и  $L_{pose}$ . Эти компоненты штрафуют за ошибки оценки трехмерной планировки помещения и углов поворота камеры, соответственно. Штраф  $L_{layout}$  вычисляется как трехмерная IoU между истинной и предсказанной трехмерной планировкой помещения с учетом угла поворота. Таким образом, ошибка оценки трехмерной планировки вычисляется так же, как и ошибка оценки ограничивающего параллелепипеда объекта. В свою очередь,  $L_{pose}$  вычисляется по формуле

$$L_{pose} = |\sin(\beta^{gt} - \beta)| + |\sin(\gamma^{gt} - \gamma)|,$$

где  $\beta^{gt}$  и  $\gamma^{gt}$  — истинные значения углов крена и тангажа, соответственно, а  $\beta$  и  $\gamma$  — значения этих углов, предсказанные предложенным методом. В итоговой функции потерь  $L_{layout}$  и  $L_{pose}$  учитываются с весами  $\lambda_{layout} = 0,1$  и  $\lambda_{pose} = 1,0$ . Таким образом, для обучения дополнительной "головы" к функции потерь добавляется  $L_{extra} = \lambda_{layout} L_{layout} + \lambda_{pose} L_{pose}$ .

Предложенная модель ImVoxelNet-Indoor на всех наборах данных обучается методом оптимизации

Adam с начальной скоростью обучения 0,0001. При обучении на протяжении  $N$  эпох скорость обучения уменьшается в 10 раз после  $[8N/12]$ -й эпохи и  $[11N/12]$ -й эпохи. Используемые наборы данных различаются по объему данных, числу категорий и степени вариативности внешнего вида, расположения и размеров объектов. Соответственно, для разных наборов данных используется различное число эпох обучения. Так, на наборе данных SUN RGB-D число эпох обучения равно 12, а на ScanNet — 36.

### 4.3.3. Детали реализации

Программный код для проведения всех экспериментов по обнаружению объектов реализован на языке Python на основе библиотеки MMDetection3D [26], которая, в свою очередь, использует инструментальные средства библиотеки глубокого обучения PyTorch [27]. Большая часть гиперпараметров инициализирована значениями по умолчанию из MMDetection3D. В качестве предварительного обучения базовой нейросетевой модели для извлечения признаков используется ResNet-50.

Размеры параллелепипеда вокселей задаются константными, но зависящими от специфики набора данных. Для наборов данных ScanNet и SUN RGB-D размеры выбраны такими же, как и в работе [36], а именно  $X_{\min} = -3,2$ ,  $X_{\max} = 3,2$ ,  $Y_{\min} = 0$ ,  $Y_{\max} = 6,4$ ,  $Z_{\min} = -2,28$ ,  $Z_{\max} = 0,28$ . Размеры вокселя по трем осям одинаковы и составляют 0,08 м, таким образом, каждый воксел представляет собой куб со стороной 0,08 м.

Аналогично методам FCOS [4] и ATSS [28], при обучении ImVoxelNet-Indoor выполняется предварительный отбор гипотез о расположении, ориентации и размерах трехмерных объектов. В указанных работах для каждого расположения объекта было отобрано 9 (3×3) гипотез-кандидатов. Однако, поскольку ImVoxelNet-Indoor решает задачу обнаружения объектов в трехмерном пространстве, число гипотез для ImVoxelNet-Indoor ограничивается 27 для каждого объекта (3×3×3).

Для обучения и тестирования нейросетевых моделей были задействованы восемь графических процессоров NVidia P40.

## 5. Результаты

В настоящем разделе приведены результаты экспериментов в виде сводных таблиц и проведен анализ полученных результатов.

### 5.1. Результаты на ScanNet

Согласно стандартному протоколу обучения и тестирования методов трехмерной детекции объектов на наборе данных ScanNet точность обнаружения объектов была измерена на множестве размеченных объектов из 18 категорий: 1) шкаф, 2) кровать, 3) стул, 4) софа, 5) обеденный стол, 6) дверь, 7) окно, 8) книжная полка, 9) картина, 10) бар, 11) письменный стол, 12) штора, 13) холодильник, 14) душевая занавеска, 15) унитаз, 16) раковина, 17) ванна, 18) урна для мусора. Результаты экспериментов по

Результаты экспериментов по трехмерной детекции объектов на основе мультиракурсных входов из набора данных ScanNet

Метод	Входные данные		Категория объекта																		mAP@25	mAP@50
	RGB	Облако точек	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14	K15	K16	K17	K18		
3D-SIS [7, 16]	Да	Да	19,8	69,7	66,2	71,8	36,1	30,6	10,9	27,3	0,0	10,0	46,9	14,1	53,8	36,0	87,6	43,0	84,3	16,2	40,2	22,5
3D-SIS [7, 16]	Нет	Да	12,8	63,1	66,0	46,3	26,9	8,0	2,8	2,3	0,0	6,9	33,3	2,5	10,4	12,2	74,5	22,9	58,7	7,1	25,4	—
Votenet [5]	Нет	Да	36,6	87,9	88,7	89,6	58,8	47,3	38,1	44,6	7,8	56,1	71,7	47,2	45,4	57,1	94,9	54,7	92,1	37,2	58,7	33,5
H3Dnet [16]	Нет	Да	<b>49,4</b>	<b>88,6</b>	<b>91,8</b>	<b>90,2</b>	<b>64,9</b>	<b>61,0</b>	<b>51,9</b>	<b>54,9</b>	<b>18,6</b>	<b>62,0</b>	<b>75,9</b>	<b>57,3</b>	<b>57,2</b>	<b>75,3</b>	<b>97,9</b>	<b>67,4</b>	<b>92,5</b>	<b>53,6</b>	<b>67,2</b>	<b>48,1</b>
ImVoxelNet-Indoor	Да	<b>Нет</b>	25,8	87,1	72,8	71,8	49,1	29,3	12,1	40,5	2,1	46,7	61,1	20,0	48,0	17,5	87,8	48,3	67,9	35,0	45,7	20,8

Примечание: По категориям приведены значения метрики mAP@25. Приведенные в этой и последующих таблицах значения метрик являются безразмерными.

трехмерной детекции объектов на наборе данных ScanNet приведены в табл. 1. Столбцы таблицы соответствуют перечисленным категориям. Здесь и далее в таблицах лучшие результаты выделены полужирным шрифтом.

Все существующие конкурирующие методы решают задачу трехмерной детекции объектов на основе облаков точек, дающих более точное, полное и геометрически корректное описание сцены. Таким образом, ImVoxelNet-Indoor стал первым нейросетевым методом, не использующим облака точек и решающим задачу трехмерной детекции объектов на основе монокулярных изображений из набора данных ScanNet. Соответственно, на момент написания статьи у предложенного метода нет прямых конкурентов, поскольку сравнить результаты методов некорректно. Результаты на наборе данных ScanNet приводятся исключительно для полноты картины. В то же время настоящее исследование задает новую планку качества для будущих исследований в области трехмерной детекции объектов.

Во время обучения выбирается  $T = 50$  различных изображений одной сцены, как было предложено в работе [25]. Оптимальное число изображений, выбираемых из всех изображений сцены при тестировании метода, было найдено в ходе дополнительной экспериментальной проверки. Результаты данного исследования приведены в табл. 2. Для определения искомого значения предложенный метод был запущен 5 раз, и в каждом запуске изображения выбирались случайно и независимо. В табл. 2 приводятся усредненные по пяти запускам результаты с доверительным интервалом 0,95. Как можно было ожидать, эксперименты показывают, что увеличение числа изображений влечет за собой повышение точности. Самый ресурсоемким этапом метода является обработка объема вокселей с помощью трехмерных сверточных слоев, в то время как время вычислений и объем вычислительных ресурсов, потраченные на извлечение двумерных признаков, незначительны.

Таблица 2

Результаты экспериментов по трехмерной детекции объектов на основе мультиракурсных входов из набора данных ScanNet

Число изображений	mAP@0.25	Время работы, с
1	8,20 ± 0,87	0,31
5	25,92 ± 0,85	0,42
10	34,50 ± 0,82	0,45
50	44,91 ± 0,14	1,28
100	<b>45,72 ± 0,34</b>	2,53

Следовательно, с увеличением числа выбираемых изображений сцены время выполнения увеличивается сублинейно, что является заслуживающим внимания практическим результатом. Так, при большом числе изображений амортизированная оценка времени выполнения предложенного метода позволяет говорить о работе в режиме реального времени.

Примеры объектов, обнаруженных предложенным методом на изображениях набора данных ScanNet, приведены на рис. 2 (см. четвертую сторону обложки).

## 5.2. Результаты на SUN RGB-D

Для этого набора данных исторически сложились два стандартных протокола экспериментов. Эти протоколы различаются подмножеством размеченных объектов, выбранных для измерения точности.

Первый протокол предусмотрен для методов трехмерной детекции объектов, принимающих в качестве входных данных монокулярные изображения. Подмножество объектов содержит объекты из десяти категорий: 1) кровать, 2) стул, 3) софа, 4) обеденный стол, 5) письменный стол, 6) комод, 7) ночник, 8) раковина, 9) шкаф, 10) лампа. Результаты экспериментов по трехмерной детекции объектов по монокулярным изображениям из набора данных SUN RGB-D

Результаты экспериментов по трехмерной детекции объектов на основе монокулярных изображений из набора данных SUN RGB-D. Метрика — AP@15

Метод	Категория объекта										mAP
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	
3DGP [8]	5,62	2,31	3,24	1,23	—	—	—	—	—	—	—
HoPR [9]	58,29	13,56	28,37	12,12	4,79	13,71	8,80	2,18	0,48	2,41	14,47
Coop [10]	63,58	17,12	41,22	26,21	9,55	4,28	6,34	5,34	2,63	1,75	17,80
T3dU [11]	59,03	15,98	43,95	35,28	23,65	19,20	6,87	14,40	11,39	3,46	23,32
ImVoxelNet-Indoor	<b>77,64</b>	<b>63,20</b>	<b>63,03</b>	<b>50,09</b>	<b>29,26</b>	<b>35,81</b>	<b>33,15</b>	<b>40,76</b>	<b>19,12</b>	<b>14,81</b>	<b>42,69</b>

Таблица 4

Результаты экспериментов по определению трехмерной планировки помещения и оценки углов поворота камеры на основе монокулярных изображений из набора данных SUN RGB-D

Метод	Планировка <sup>↑</sup>	Углы поворота камеры, °	
		Тангаж <sup>↓</sup>	Крен <sup>↓</sup>
3DGP [8]	19,2	—	—
HoPR [9]	54,9	7,60	3,12
Coop [10]	56,9	3,28	2,19
T3dU [11]	57,6	3,68	2,59
ImVoxelNet-Indoor	<b>59,3</b>	<b>2,63</b>	<b>1,96</b>

приведены в табл. 3. Столбцы таблицы соответствуют перечисленным категориям. Прочерки в таблице обозначают отсутствие экспериментальных данных в цитируемых статьях.

Метод ImVoxelNet-Indoor превосходит все существующие методы трехмерной детекции объектов, принимающие на вход монокулярные изображения.

А именно ImVoxelNet-Indoor демонстрирует более высокую точность обнаружения объектов каждой из категорий. Кроме этого, как показано в табл. 4, ImVoxelNet-Indoor превосходит Total3DUnderstanding в точности определения трехмерной планировки помещения и в точности оценки углов поворота камеры.

Второй протокол предназначен для измерения точности методов трехмерной детекции объектов на основе облаков точек. В этом протоколе участвуют следующие категории объектов: 1) ванна, 2) кровать, 3) книжная полка, 4) стул, 5) письменный стол, 6) комод, 7) ночник, 8) софа, 9) обеденный стол, 10) туалет. Результаты экспериментов по трехмерной детекции объектов на основе облаков точек набора данных SUN RGB-D приведены в табл. 5. Столбцы таблицы соответствуют перечисленным категориям.

Комментируя сравнительные результаты экспериментов по данному протоколу, следует подчеркнуть, что методы, использующие облака точек, предполагают более точной и полной информацией. Поэтому напрямую сравнивать результаты их работы с результатами работы предложенного метода некорректно.

Примеры объектов, обнаруженных предложенным методом на изображениях набора данных SUN RGB-D, приведены на рис. 3 (см. четвертую сторону обложки).

Таблица 5.

Результаты экспериментов по трехмерной детекции объектов на основе монокулярных изображений из набора данных SUN RGB-D. Метрика — AP@0.25

Метод	Входные данные		Категория объекта										mAP
	RGB	Облака точек	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	
F-Point Net [18]	Да	Да	43,3	81,1	33,3	64,2	24,7	32,0	58,1	61,1	51,1	<b>90,9</b>	54,0
Votenet [5]	Нет	Да	74,7	83,0	28,8	75,3	22,0	29,8	62,2	64,0	47,3	90,1	57,7
H3Dnet [16]	Нет	Да	73,8	85,6	31,0	76,7	<b>29,6</b>	33,4	65,5	66,5	50,8	88,2	60,1
ImVote Net [6]	Да	Да	<b>75,9</b>	<b>87,6</b>	<b>41,3</b>	<b>76,7</b>	28,7	<b>41,4</b>	<b>69,9</b>	<b>70,7</b>	<b>51,1</b>	90,5	<b>63,4</b>
ImVoxelNet-Indoor	Да	Нет	33,6	70,3	5,4	45,0	17,0	17,0	33,3	48,3	36,0	74,9	38,1

## Заклучение

В настоящей работе представлен новый метод одновременной монокулярной или мультиракурсной трехмерной детекции объектов ImVoxelNet-Indoor. Этот метод превосходит по точности все существующие методы трехмерной детекции объектов внутри помещений, что подтверждено результатами экспериментов на наборе данных SUN RGB-D. В работе впервые была поставлена задача мультиракурсной трехмерной детекции объектов различных категорий внутри помещений и предложено решение этой задачи. Экспериментальная проверка на наборе данных ScanNet показала, что предложенное решение показывает точность, сравнимую с точностью методов, решающих аналогичную задачу с использованием дополнительных данных других модальностей — облаков точек, карт глубины и т. д.

## Список литературы

1. Рухович Д. Д. Итеративный метод обнаружения объектов // Программная инженерия. — 2021. — Т. 12, № 1. — С. 31—39.
2. Ren S., He K., Girshick R. et al. Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks // Advances in neural information processing systems. — 2015. — P. 91—99.
3. Lin T., Goyal P., Girshick R. et al. Focal loss for dense object detection // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. — 2017. — P. 2980—2988.
4. Tian Z., Shen C., Chen H. et al. Fcos: Fully convolutional one-stage object detection // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. — 2019. — P. 9627—9636.
5. Qi C. R., Litany O., He K. et al. Deep hough voting for 3D object detection in point clouds // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. — 2019. — P. 9277—9286.
6. Qi C. R., Chen X., Litany O. et al. Imvotenet: Boosting 3D object detection in point clouds with image votes // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. — 2020. — P. 4404—4413.
7. Hou J., Dai A., Nießner M. 3D-sis: 3D semantic instance segmentation of rgb-d scans // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. — 2019. — P. 4421—4430.
8. Choi W., Chao Y., Pantofaru C. et al. Understanding indoor scenes using 3D geometric phrases // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. — 2013. — P. 33—40.
9. Huang S., Qi S., Zhu Y. et al. Holistic 3D scene parsing and reconstruction from a single rgb image // Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV). — 2018. — P. 187—203.
10. Huang S., Qi S., Xiao Y. et al. Cooperative holistic scene understanding: Unifying 3D object, layout, and camera pose estimation // Proceedings of the 32nd International Conference on Neural Information Processing Systems. — 2018. — P. 206—217.
11. Nie Y., Han X., Guo S. et al. Total3dunderstanding: Joint layout, object pose and mesh reconstruction for indoor scenes from a single image // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. — 2020. — P. 55—64.
12. Simonelli A., Bulo S., Porzi L. et al. Disentangling Monocular 3D Object Detection: From Single to Multi-Class Recognition // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. — 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/1905.12365>
13. Roddick T., Kendall A., Cipolla R. Orthographic feature transform for monocular 3D object detection // 30th British Machine Vision Conference 2019, BMVC 2019. URL: <https://arxiv.org/pdf/1811.08188.pdf>
14. Song S., Lichtenberg S. P., Xiao J. Sun rgb-d: A rgb-d scene understanding benchmark suite // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. — 2015. — P. 567—576.
15. Dai A., Chang A., Savva M. et al. Scannet: Richly-annotated 3D reconstructions of indoor scenes // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. — 2017. — P. 5828—5839.
16. Zhang Z., Sun B., Yang H. et al. H3dnet: 3D object detection using hybrid geometric primitives // European Conference on Computer Vision. — Springer, Cham, 2020. — P. 311—329.
17. Zhou Y., Tuzel O. Voxelnet: End-to-end learning for point cloud based 3D object detection // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. — 2018. — P. 4490—4499.
18. Qi C. R., Liu W., Wu C. et al. Frustum pointnets for 3D object detection from rgb-d data // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. — 2018. — P. 918—927.
19. Song S., Xiao J. Deep sliding shapes for amodal 3D object detection in rgb-d images // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. — 2016. — P. 808—816.
20. Sindagi V. A., Zhou Y., Tuzel O. Mvx-net: Multimodal voxelnet for 3d object detection // 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). — IEEE, 2019. — P. 7276—7282.
21. Kundu A., Li Y., Rehg J. M. 3D-rcnn: Instance-level 3D object reconstruction via render-and-compare // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. — 2018. — P. 3559—3568.
22. Mousavian A., Anguelov D., Flynn J. et al. 3D bounding box estimation using deep learning and geometry // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. — 2017. — P. 7074—7082.
23. Chabot F., Chaouch M., Rabarisoa J. et al. Deep manta: A coarse-to-fine many-task network for joint 2D and 3D vehicle analysis from monocular image // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. — 2017. — P. 2040—2049.
24. Рухович Д. Д. Проекция изображений в пространство для монокулярной и мультиракурсной трехмерной детекции объектов в уличных сценах // Программная инженерия. — 2021. — Т. 12, № 7. — С. 373—384.
25. Murez Z., van As T., Bartolozzi J. et al. Atlas: End-to-end 3D scene reconstruction from posed images // Computer Vision—ECCV 2020: 16th European Conference, Glasgow, UK, August 23—28, 2020, Proceedings, Part VII. — 2020. — P. 414—431.
26. Chen K., Wang J., Pang J. et al. Mmdetection: Open mmlab detection toolbox and benchmark // arXiv preprint arXiv:1906.07155. — 2019.
27. Paszke A., Gross S., Massa F. et al. Pytorch: An imperative style, high-performance deep learning library // Advances in neural information processing systems. — 2019. — P. 8026—8037.
28. Zhang S., Chi C., Yao Y. et al. Bridging the gap between anchor-based and anchor-free detection via adaptive training sample selection // In Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. — 2019. — P. 9759—9768.

# 2D-to-3D Projection for Monocular and Multi-View 3D Multi-class Object Detection in Indoor Scenes

D. D. Rukhovich, daniel-rukhovich@yandex.ru, Faculty of Mechanics and Mathematics, Moscow State University, Moscow, 119234, Russian Federation

*Corresponding author:*

**Rukhovich Danila D.**, Postgraduate Student, Faculty of Mechanics and Mathematics, Moscow State University, Moscow, 119234, Russian Federation  
E-mail: daniel-rukhovich@yandex.ru

In this paper, we propose a novel method of joint 3D object detection and room layout estimation. The proposed method surpasses all existing methods of 3D object detection from monocular images on the indoor SUN RGB-D dataset. Moreover, the proposed method shows competitive results on the ScanNet dataset in multi-view mode. Both these datasets are collected in various residential, administrative, educational and industrial spaces, and altogether they cover almost all possible use cases.

Moreover, we are the first to formulate and solve a problem of multi-class 3D object detection from multi-view inputs in indoor scenes.

The proposed method can be integrated into the controlling systems of mobile robots. The results of this study can be used to address a navigation task, as well as path planning, capturing and manipulating scene objects, and semantic scene mapping.

**Keywords:** machine learning, deep learning, 3D object detection

For citation:

**Rukhovich D. D.** 2D-to-3D Projection for Monocular and Multi-View 3D Multi-class Object Detection in Indoor Scenes, *Programmnyaya Ingeneria*, 2021, vol. 12, no. 9, pp. 459–469.

DOI: 10.17587/prin.12.459-469

## References

1. **Rukhovich D. D.** Iterative Scheme for Object Detection in Crowded Environments, *Programmnyaya Ingeneria*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 31–39 (in Russian).
2. **Ren S., He K., Girshick R., Sun J.** Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks, *Advances in neural information processing systems*, 2015, pp. 91–99.
3. **Lin T., Goyal P., Girshick R., He K., Dollar P.** Focal loss for dense object detection, *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 2017, pp. 2980–2988.
4. **Tian Z., Shen C., Chen H., He T.** Fcos: Fully convolutional one-stage object detection, *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 2019, pp. 9627–9636.
5. **Qi C. R., Litany O., He K., Guibas L. J.** Deep hough voting for 3D object detection in point clouds, *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, 2019, pp. 9277–9286.
6. **Qi C. R., Chen X., Litany O., Guibas L. J.** Imvotenet: Boosting 3D object detection in point clouds with image votes, *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, 2020, pp. 4404–4413.
7. **Hou J., Dai A., Nießner M.** 3D-sis: 3D semantic instance segmentation of rgb-d scans, *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019, pp. 4421–4430.
8. **Choi W., Chao Y., Pantofaru C., Savarese S.** Understanding indoor scenes using 3D geometric phrases, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2013, pp. 33–40.
9. **Huang S., Qi S., Zhu Y., Xiao Y., Xu Y., Zhu S. C.** Holistic 3D scene parsing and reconstruction from a single rgb image, *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 2018, pp. 187–203.
10. **Huang S., Qi S., Xiao Y., Zhu Y., Wu Y. N., Zhu S. C.** Cooperative holistic scene understanding: Unifying 3D object, layout, and camera pose estimation, *Proceedings of the 32nd International Conference on Neural Information Processing Systems*, 2018, pp. 206–217.
11. **Nie Y., Han X., Guo S., Zheng Y., Chang J., Zhang J. J.** Total-3d understanding: Joint layout, object pose and mesh reconstruction for indoor scenes from a single image, *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2020, pp. 55–64.
12. **Simonelli A., Bulò S., Porzi L., Antequera M. L., Kotschieder P.** Disentangling Monocular 3D Object Detection: From Single to Multi-Class Recognition, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2020, available at: <https://arxiv.org/abs/1905.12365>
13. **Roddick T., Kendall A., Cipolla R.** Orthographic feature transform for monocular 3D object detection, *30th British Machine Vision Conference 2019, BMVC 2019*? available at: <https://arxiv.org/pdf/1811.08188.pdf>
14. **Song S., Lichtenberg S. P., Xiao J.** Sun rgb-d: A rgb-d scene understanding benchmark suite, *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2015, pp. 567–576.
15. **Dai A., Chang A., Savva M., Halber M., Funkhouser T., Nießner M.** Scannet: Richly-annotated 3D reconstructions of indoor scenes, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2017, pp. 5828–5839.
16. **Zhang Z., Sun B., Yang H., Huang Q.** H3dnet: 3D object detection using hybrid geometric primitives, *European Conference on Computer Vision*, 2020, pp. 311–329.
17. **Zhou Y., Tuzel O.** Voxelnet: End-to-end learning for point cloud based 3d object detection, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018, pp. 4490–4499.
18. **Qi C. R., Liu W., Wu C., Su H., Guibas L. J.** Frustum pointnets for 3d object detection from rgb-d data, *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2018, pp. 918–927.
19. **Song S., Xiao J.** Deep sliding shapes for amodal 3d object detection in rgb-d images, *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016, pp. 808–816.
20. **Sindagi V. A., Zhou Y., Tuzel O.** Mvx-net: Multimodal voxelnet for 3D object detection, *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2019, pp. 7276–7282.
21. **Kundu A., Li Y., Rehg J. M.** 3d-rcnn: Instance-level 3d object reconstruction via render-and-compare, *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2018, pp. 3559–3568.
22. **Mousavian A., Anguelov D., Flynn J., Kosecka J.** 3D bounding box estimation using deep learning and geometry, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2017, pp. 7074–7082.
23. **Chabot F., Chaouch M., Rabarisoa J., Teuliere C., Chateau T.** Deep manta: A coarse-to-fine many-task network for joint 2D and 3D vehicle analysis from monocular image, *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2017, pp. 2040–2049.
24. **Rukhovich D. D.** Projection for Monocular and Multi-View 3D Object Detection in Outdoor Scenes, *Programmnyaya Ingeneria*, 2021, vol. 12, no. 7, pp. 373–384 (in Russian).
25. **Murez Z., van As T., Bartolozzi J., Sinha A., Badrinarayan V., Rabinovich A.** Atlas: End-to-end 3d scene reconstruction from posed images, *Computer Vision—ECCV 2020: 16th European Conference, Glasgow, UK, August 23–28, 2020, Proceedings, Part VII*, 2020, pp. 414–431.
26. **Chen K., Wang J., Pang J., Cao Y., Xiong Y., Li X., Sun S., Feng W., Liu Z., Xu J., Zhang Z., Cheng D., Zhu C., Cheng T., Zhao Q., Li B., Lu X., Zhu R., Wu Y., Dai J., Wang J., Shi J., Ouyang W., Loy C. C., Lin D.** Mmdetection: Open mmlab detection toolbox and benchmark, *arXiv preprint arXiv:1906.07155*, 2019.
27. **Paszke A., Gross S., Massa F., Lerer A., Bradbury J., Chanan G., Killeen T., Lin Z., Gimelshein N., Antiga L., Desmaison A., Kopf A., Yang E., De Vito Z., Raison M., Tejani A., Chilamkurthy S., Steiner B., Fang L., Bai J., Chintala S.** Pytorch: An imperative style, high-performance deep learning library, *Advances in neural information processing systems*, 2019, pp. 8026–8037.
28. **Zhang S., Chi C., Yao Y., Lei Z., Li S. Z.** Bridging the gap between anchor-based and anchor-free detection via adaptive training sample selection, *In Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, 2019, pp. 9759–9768.

Я. А. Туровский<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук, канд. мед. наук, доц., Yaroslav\_turovsk@mail.ru,  
С. В. Борзунов<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук, доц., А. А. Вахтин<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук, доц.

<sup>1</sup> Институт проблем управления РАН им. В. А. Трапезникова, Москва

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО Воронежский государственный университет

# Алгоритм оценки результатов статистического анализа данных биомедицинской природы в условиях эффекта множественных сравнений\*

*Предложен алгоритм оценки значимости различий в задаче управления дизайном медико-биологического исследования в условиях эффекта множественных сравнений. На примере задачи сравнения данных, поступающих с парных каналов электроэнцефалографа, описано применение алгоритма.*

**Ключевые слова:** множественные сравнения, оценка значимости, электроэнцефалограмма, дизайн исследования

## Введение

Одной из традиционных задач, связанных с обработкой информации, полученной в ходе медико-биологических исследований, является статистическая обработка полученных результатов, включающая использование определенного, в целом достаточно небольшого набора критериев, применяемых согласно разработанному исследователем дизайну эксперимента. Однако в подавляющем большинстве современных экспериментальных планов происходит более чем одно сравнение выборок, что, как правило, необходимо для максимально всестороннего анализа факторов в исследовании. В этом случае проявляет себя эффект множественных сравнений, заключающийся в росте риска ложного отклонения гипотезы  $H_{(1)}$ . Рассмотрим ситуацию поиска нервных центров, связанных с тем или иным видом деятельности, подразумевающая наличие межполушарной асимметрии. Взяв стандартный 21-канальный электроэнцефалограф, получим восемь пар сравнения (по восемь электродов на каждом полушарии). Пусть различия существуют только для одной пары электродов, так как только на один из них проецируется система нейронов, отвечающая за исследуемый феномен. Очевидно, согласно формуле Бернулли вероятность того, что при альфа-уровне в 5 % будет хотя бы одно ложноположительное решение составляет  $1 - (1 - \alpha)^8 = 0,3366$ , что достаточно велико, чтоб не пренебречь. Следовательно, если выявлено различие между одной парой электродов, т. е. между только одними участками головного мозга, то приходится отклонять гипотезу об их различии, что на практике может оказаться не так, при условии широко известной локализации и асимметрии мозговых функций.

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-01156\_мк.

Как известно, многократное применение критериев статистических сравнений приводит к значительному возрастанию вероятности ошибочного установления различий в тех случаях, когда они статистически незначимы [1]. Для борьбы с этим эффектом был разработан целый ряд подходов [2, 3]. Тем не менее значительная часть из них, базирующаяся и на FWER (*family-wise error rate*) и для FDP (*false discovery proportion*) имеет ряд недостатков, связанных не только с возрастанием риска ошибки второго рода, но и с практическим применением полученных в ходе статистической обработки результатов. Действительно, для FDP, строго следуя данному подходу, даже зная долю ложноположительных решений, исследователь не может в большинстве случаев высказать предположение о том, какие конкретно результаты сравнений следует отнести к более "высокорисковым" в плане ошибки. Аналогично, для FWER требуется, например, в следующей процедуре ранжировать результаты по показателю  $p$ . При этом он и только он служит маркером того, что данный результат был статистически значим.

Обозначим через  $p_{(1)}, \dots, p_{(m)}$  — уровни значимости  $p_i$ , упорядоченные по неубыванию;  $H_{(1)}, \dots, H_{(m)}$  — соответствующие  $p_{(i)}$  гипотезы.

1. Если  $p_{(1)} \geq \alpha/m$ , принять гипотезы  $H_{(1)}, \dots, H_{(m)}$  и остановиться. Иначе, если  $p_{(1)} < \alpha/m$ , отвергнуть гипотезу  $H_{(1)}$  и продолжить проверку оставшихся гипотез на уровне значимости  $\alpha/(m - 1)$ .

2. Если  $p_{(2)} \geq \alpha/(m - 1)$ , принять гипотезы  $H_{(2)}, \dots, H_{(m)}$  и остановиться. Иначе, если  $p_{(2)} < \alpha/(m - 1)$ , отвергнуть гипотезу  $H_{(2)}$  и продолжить проверку оставшихся гипотез на уровне значимости  $\alpha/(m - 1)$ .

Известно, что в этом случае повышаются риски отклонения уже альтернативной гипотезы, что может привести к "необнаружению" эффекта, в случае если этот эффект присутствует.

Следует отметить, что в наиболее распространенных подходах по устранению неоднозначностей, обусловленных эффектом множественных сравнений, не учитывается широко известный факт: в многофакторных статистических исследованиях одна и та же выборка содержит в себе результирующие воздействия разных факторов. В этом случае графически подобный экспериментальный план можно представить как совокупность осей в  $n$ -мерном пространстве, каждая из которых является той или иной переменной. Тогда очевидно, что если выявленные статистически значимые различия являются ложноположительным результатом, то в указанном пространстве они должны быть распределены достаточно равномерно, в то время как истинно положительные значения в ряде случаев могут формировать группы различий, в которых была отклонена нулевая гипотеза  $H_0$ .

Таким образом, целью исследования, результаты которого представлены в настоящей статье, была разработка и апробация метода управления дизайном исследования, основанном на оценке доли сравнений от общего числа отклонений  $H_0$  в пространстве сравнения переменных.

### Методы множественных сравнений

Как известно, многократное применение критерия парных сравнений приводит в значительному возрастанию вероятности ошибочного установления различий в тех случаях, когда они статистически незначимы [1]. Среди известных методов работы с множественными сравнениями часто применяют следующие: поправка Бонферрони, критерий Ньюмена—Кейлса, критерий Тьюки.

Метод, основанный на поправке Бонферрони, требует отклонить те гипотезы, для которых уровень значимости не удовлетворяет неравенству

$$p' < p/n, \quad (1)$$

где  $p$  — уровень значимости, соответствующий применяемому попарному критерию;  $n$  — число попарных сравнений. Из этого неравенства непосредственно следует особенность метода при достаточно большом числе сравнений. Его суть в том, что  $p'$  очень мало, и даже масштабные различия признаются статистически незначимыми. Другими словами, метод является излишне "строгим", и шансы отклонить ошибочные гипотезы падают. Кроме того, не учитываются данные о возможной группировке серий сравнений в кластеры — группы сравнений, близких в некотором смысле согласно медико-биологической основе эксперимента. Из общих соображений ясно, что группировка в кластеры является существенным свидетельством в пользу того, что выявленные различия не случайны.

Более сложные методы, использующие критерии Ньюмена—Кейлса, Тьюки и др., также выявляют значимые различия без использования изначально данных о кластеризации сравнений.

Обобщим метод парных сравнений, дополнив его влиянием расстояния в абстрактном пространстве попарных сравнений. Последовательность из неза-

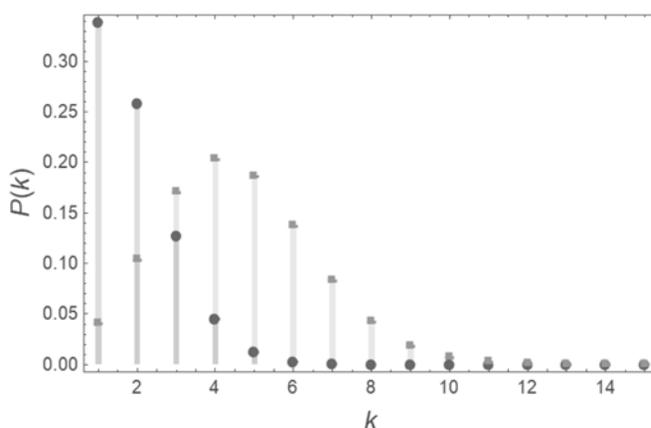


Рис. 1. Биномиальное распределение  $n = 30$  испытаний с вероятностью успеха  $p_1 = 0,05$  (кружки),  $p_2 = 0,15$  (квадраты)

висимых  $n$  сравнений, каждое из которых приводит к положительному результату с вероятностью  $p$ , имеет вероятностное распределение вида

$$p_B(k) = C(n, k)p^k(1 - p)^{n-k}, \quad (2)$$

т. е. биномиальное распределение с вероятностью успеха, равной  $p$ . В формуле (2) величина  $p_B(k)$  определяет вероятность реализации ровно  $k$  благоприятных исходов в серии из  $n$  опытов (индекс "B" означает Бернулли, Bernoulli);  $C(n, k) = n!/(k!(n - k)!)$  — комбинаторное число сочетаний из  $n$  по  $k$  без повторов. Предположим, что в серии из  $n$  испытаний ровно  $s$  из них привели к успешному исходу. Согласно свойствам биномиального распределения среднее значение случайной величины  $s$  в случае попарной независимости исходов равно математическому ожиданию  $s_0 = pn$  (рис. 1).

В терминах планирования эксперимента  $s_0$  определяет число ложноположительных сравнений. Приблизительно равенство значений  $s_0$  и  $s$  свидетельствует о независимости результатов испытаний в ходе данного эксперимента. В свою очередь, неравенство  $s_0 > pn$  свидетельствует о наличии сравнений, превышающих математическое ожидание числа ложноположительных сравнений.

### Алгоритм оценки значимости различий

В настоящем разделе представлен авторский алгоритм, устанавливающий значимость множественных сравнений выделением из множества всевозможных результатов эксперимента подмножеств на основе дизайна эксперимента. Такие подмножества  $U_i$  (где  $i = 1, 2, \dots, M$ ) универсального множества  $U$  будем называть блоками испытаний. Число таких блоков  $M$  будет определено в процессе работы алгоритма (см. ниже). Заметим, что множество  $U$  может быть рассмотрено как пространство исходов анализируемого эксперимента.

Рассмотрим два варианта развития событий:

А) число выявленных различий при  $p < 0,05$  без учета эффекта множественных сравнений много больше значения, к которому стремится их число при только ложноположительных значениях статистики;

Б) число выявленных различий при  $p < 0,05$  без учета эффекта множественных сравнений сравнимо с числом, к которому стремится их число при только ложноположительных значениях статистики.

Первый шаг алгоритма заключается в оценке вероятности положительного исхода конкретного одиночного опыта  $p^*$  в предположении равномерного распределения положительных исходов в множестве, согласно формуле  $p^* = s/n$ , где  $s$  — число выявленных в эксперименте положительных исходов;  $n = |U|$  — мощность универсального множества. Далее определим порог  $\Pi$  числа ложноположительных решений, воспользовавшись неравенством

$$\sum_{i=0}^{\Pi} (p)^i (1-p)^{n-i} > 1 - p_0, \quad (3)$$

где  $p_0$  — уровень значимости, соответствующий применяемому попарному критерию, например,  $p_0 = 0,05$ . Значение числа положительных исходов, превышающее  $\Pi$ , трактуется как наличие в результатах исследования положительных результатов, которые не являются ложными.

На основе сведений о конкретных деталях реализации эксперимента выполним всевозможные группировки элементарных опытов в подмножествах блоков  $U_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, M$ . Элементы объединяют в блоки на основе дизайна эксперимента. Например, их объединяют согласно мере близости параметров той или иной серии опытов, как соответствие электродов тем или иным областям головного мозга.

Рассмотрим некоторый блок  $U_k$ , для которого вычислим число положительных результатов  $s_k$  и вероятность в предположении равномерного распределения  $p_k = s_k/n_k$ , в знаменателе введено обозначение  $n_k = |U_k|$  для числа элементов в блоке. В качестве критерия случайного распределения исходов в подмножестве  $U_k$  выберем выполнение условия

$$C_{n_k}^{s_k} (p_k)^{s_k} (1-p_k)^{n_k-s_k} < p_0, \quad (4)$$

которое имеет смысл сравнения вероятности реализации ровно  $s_k$  исходов в серии  $n_k$  независимых испытаний с уровнем значимости критерия.

В результате получаем множество блоков

$$W = \{U_{k_1}, U_{k_2}, \dots, U_{k_h} : \text{для } U_{k_j} \text{ (4) истинно}\}, \quad (5)$$

вероятности положительных исходов в которых значимо выше по сравнению с равномерным распределением, значение  $h$  определяется условием справедливости критерия (4): как только в ходе выполнения алгоритма условие (4) перестает выполняться,  $h$  фиксируется, и становится известным число блоков. Набор полученных множеств позволяет сделать обоснованные выводы об истинно положительных результатах в условиях, когда классические тесты математической статистики не позволяют это оценить [3, 4]. Заметим, при формировании кластеров индивидуальные опыты трактуются как независимые.

Преимуществом предлагаемого метода является использование информации о дизайне исследования, другими словами — информации об отношении

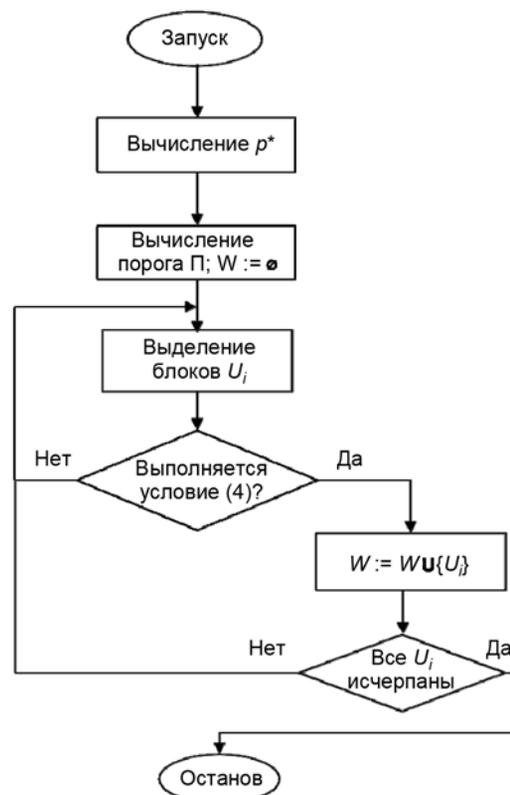


Рис. 2. Блок-схема алгоритма

ях между сравниваемыми переменными. Указанные выше методы не используют такую информацию и, таким образом, потенциально могут иметь более высокие вероятности ошибок второго рода.

Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.

*Пример.* Предположим, что в результате серии экспериментов из  $n = 100$  индивидуальных опытов получен вектор исходов

$$\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_n), a_1 = a_2 = \dots = a_{17} = 1, a_{18} = a_{19} = \dots = a_{100} = 0,$$

где используется общепринятое бинарное обозначение результата (1 — положительный исход; 0 — отрицательный). Выполним шаги алгоритма, предположив, что выделены, например, два блока:  $U_1 = (a_2, a_3, \dots, a_9)$  и  $U_2 = (a_{16}, a_{17}, \dots, a_{23})$ . Как легко вычислить,  $\Pi = 23$ . Для блока  $U_1$  неравенство (4) выполняется, поскольку  $p_1^* = 17/100$ ,  $n_1 = 8$  и  $s_1 = 7$ , следовательно, результаты, сгруппированные в первом блоке, демонстрируют значимые различия. Напротив, для блока  $U_2$  условие (4) не выполняется, поскольку  $n_2 = 8$ ,  $s_2 = 2$ , следовательно, эти результаты не значимы.

Рассмотрим алгоритм на описанном выше примере с электроэнцефалограммой (ЭЭГ). В этом случае у нас есть следующий экспериментальный план. Испытуемый совершает мысленные и реальные движения конечностями, результаты которых регистрируются электродами, расположенными в следующих позициях согласно схеме 10—20: T3, T4, F7, F8, F3, F4. При этом на основе паттернов ЭЭГ определяются особенности частотной модуляции сигнала в зависимости от команды: вперед, стоп, поворот налево, поворот на-

### Результаты применения критерия Краскела—Уоллиса

Низкие частоты		Команды	T3-T4	F7-F8	F3-F4
Реальные движения	Достижение цели	Вперед	–	–	–
		Право	–	–	–
		Лево	–	–	–
		Стоп	–	–	–
	Недостижение цели	Вперед	–	–	–
		Право	–	–	–
		Лево	–	–	–
		Стоп	–	–	–
Мысленные движения	Достижение цели	Вперед	–	–	–
		Право	+	+	–
		Лево	–	–	+
		Стоп	–	–	+
	Недостижение цели	Вперед	–	–	–
		Право	–	–	–
		Лево	–	–	–
		Стоп	–	–	+
Высокие частоты					
Реальные движения	Достижение цели	Вперед	–	–	+
		Право	–	–	–
		Лево	–	–	+
		Стоп	–	–	+
	Недостижение цели	Вперед	+	–	+
		Право	–	–	–
		Лево	–	–	+
		Стоп	+	–	+
Мысленные движения	Достижение цели	Вперед	+	–	–
		Право	+	–	–
		Лево	–	–	–
		Стоп	–	–	–
	Недостижение цели	Вперед	–	–	–
		Право	–	–	–
		Лево	–	–	–
		Стоп	–	–	–

Примечание: "–" — отсутствие статистических различий при  $p < 0,05$ ; "+" — наличие статистических различий при  $p < 0,05$ .

право. Таким образом, наш экспериментальный план содержит в себе следующие факторы: высокочастотная или низкочастотная модуляция ЭЭГ, достижение или не достижение цели, выполняемые команды, пары симметричных отведений (каналов) ЭЭГ, между которыми происходит сравнение (см. таблицу).

Отклонение нулевой гипотезы произошло в 15 случаях. Общее число тестов 96. Таким образом, можем оценить по формуле Бернулли число ложноположительных результатов. Для девяти результатов сумма вероятности превысит порог в 95 %. Следовательно, оставшиеся шесть результатов, давших отклонение нулевой гипотезы, могут представлять собой истинно положительные решения. Как отмечалось выше, вопрос заключается в том, чтобы определить на экспериментальном плане, какие именно решения можно с должной вероятностью отнести к истинно положительным. Обратим внимание, что для области высокочастотной модуляции и реально выполняемых движений из восьми тестов для пары электродов F3-F4 видим шесть ситуаций, когда была отклонена нулевая гипотеза. Оценим вероятность такого исхода, допустив, что все 15 положительных исходов являются ложными. Вероятность такого исхода составляет 0,000417, т. е. достаточно мала, чтобы можно было принять решение об отнесении всех указанных решений к истинно положительным. Проведем такую же процедуру для высокочастотной модуляции и мысленных движений. Три положительных решения из восьми дадут в сумме вероятность в 0,1, что не позволяет признать появление какой-либо закономерности в этой области пространства экспериментального плана. Аналогичная ситуация при мысленных движениях и команде "право" (0,069).

Получаем, что к истинно положительным решениям можно отнести различия для каналов F3-F4 в случае реальных движений и высокочастотной модуляции. Таким образом, получается шесть решений, которые оценили как истинно положительные, девять — как ложноположительные.

### Заключение

Разработан алгоритм управления дизайном медико-биологического исследования, основанный на оценке доли сравнений от общего числа отклонений  $H_0$  в пространстве сравнения переменных. Использование данных не только о результатах статистического сравнения, но и об их распределении в рамках экспериментального плана исследования позволяет выделить группы реакций, в которых при сохранении мощности критерия снижается вероятность принятия ложноположительных гипотез.

### Список литературы

1. Гланц С. Медико-биологическая статистика. — М.: Практика, 1998. — 459 с.
2. Рунион Р. Справочник по непараметрической статистике: Современный подход. — М.: Финансы и статистика, 1982. — 198 с.
3. Hochberg Y., Tamhane A. C. Multiple comparison procedures. — New York: Wiley, 1987. — 482 p.
4. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. — 4-е изд. — М.: Высшая школа, 1972. — 368 с.

---

---

# An Algorithm for Evaluating the Results of Statistical Analysis of Biomedical Data under the Conditions of the Effect of Multiple Comparisons

Ya. A. Turovsky<sup>1,2</sup>, Yaroslav\_turovsk@mail.ru, S. V. Borzunov<sup>2</sup>, sborzunov@gmail.com, A. A. Vahtin<sup>2</sup>, alvahtin@gmail.com

<sup>1</sup> V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997, Russian Federation

<sup>2</sup> Voronezh State University, Voronezh, 394018, Russian Federation

*Corresponding author:*

**Turovsky Yaroslav A.**, Principal Researcher, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences Moscow, 117997, Russian Federation, Head of Lab., Voronezh State University, Voronezh, 394018, Russian Federation

E-mail: Yaroslav\_turovsk@mail.ru

*Received on September 06, 2021*

*Accepted on October 15, 2021*

*The paper proposes an algorithm for assessing the significance of differences in the problem of managing research design under the conditions of the effect of multiple comparisons. Using the example of the problem of comparing data coming from paired channels of an electroencephalograph, the application of the algorithm is described.*

**Keywords:** multiple comparisons, significance assessment, electroencephalogram, study design

**Acknowledgements:** *The reported study was funded by RFBR according to the research project no. 19-29-01156\_мк*

*For citation:*

**Turovsky Ya. A., Borzunov S. V., Vahtin A. A.** An Algorithm for Evaluating the Results of Statistical Analysis of Biomedical Data under the Conditions of the Effect of Multiple Comparisons, *Programmная Ingeneria*, 2021, vol. 12, no. 9, pp. 470—474.

DOI: 10.17587/prin.12.470-474

## References

1. **Glantz S. A.** *Primer of Biostatistics*, McGraw-Hill, 2011, 320 p.
2. **Runyon R. P.** *Nonparametric Statistics: A Contemporary Approach*, Addison-Wesley Publishing Company, 1977, 218 p.
3. **Hochberg Y., Tamhane A. C.** *Multiple Comparison Procedures*, New York, Wiley, 1987, 482 p.
4. **Gnurman V. E.** *Probability Theory and Mathematical Statistics*, 4th ed., Moscow, Vishaya shekola, 1972, 368 p. (in Russian).

---

---

## ИНФОРМАЦИЯ

### Международная школа молодых ученых "Моделирование и оптимизация сложных систем" МОС-2022

30 июня—5 июля 2022 г., г. Суздаль, Владимирская область

Участниками Школы могут стать студенты старших курсов, аспиранты и молодые ученые в возрасте до 35 лет. Участникам будет предоставлена возможность представить собственный доклад в рамках тематики Школы.

#### Тематика лекций

- Математическое моделирование и управление в экономике и общественных науках
- Математическое моделирование и управление в технике
- Общие вопросы

*По всем вопросам относительно Школы вы можете связаться с Организационным комитетом по электронной почте [diff@vlsu.ru](mailto:diff@vlsu.ru)*

**О. А. Качанова**, программист, kachanova.o@iiias.spb.su,  
**Д. К. Левоневский**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., DLewonewski.8781@gmail.com,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Санкт-Петербургский  
Федеральный исследовательский центр Российской академии наук",  
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук

## Архитектура программного обеспечения автоматизированного тепличного комплекса на основе облачных технологий

*Рассмотрена архитектура облачного сервиса для управления вертикальными фермами, которая позволяет организовать надежную двустороннюю передачу данных между модулями теплицы и оператором, она может быть использована для организации выращивания культур как в вертикальных гидропонных установках, так и в одноуровневых теплицах закрытого грунта. На базе разработанной архитектуры реализовано программное обеспечение, которое успешно протестировано в задачах управления тепличным комплексом и получения данных о микроклимате.*

**Ключевые слова:** облачные сервисы, архитектура ПО, автоматизированные тепличные комплексы, киберфизические системы, управление микроклиматом

### Введение

Для выращивания любых культур в тепличных комплексах необходимо поддерживать требуемые для этих культур микроклиматические условия — вентиляцию, температурный режим, освещение и полив. Необходимо выполнять мониторинг микроклиматических условий в теплице, так как даже кратковременное их нарушение может привести к негативным последствиям вплоть до гибели растений и повлечь значительный ущерб для предприятия.

Операции, которые необходимо выполнять для поддержания требуемых условий в теплице, определяются технологией выращивания конкретной культуры. Многие операции, такие как регулировка освещения, температуры, необходимо выполнять регулярно или в соответствии с некоторым алгоритмом. Ручное выполнение всех необходимых операций в больших тепличных комплексах несет риск совершения ошибок, связанных с человеческим фактором. При этом многие из этих операций могут быть автоматизированы. Для автоматизации выращивания необходимо решить ряд следующих подзадач: построение формальных моделей технологий выращивания, проектирование тепличных комплексов, оснащенных датчиками и исполнительными механизмами для выполнения указанных операций, разработка алгоритмов управления фермами, создание клиентских приложений для инженеров и технологов. Таким образом, задача автоматизации выращивания растений в тепличных комплексах является комплексной и актуальной.

Для автоматизации выращивания требуется как аппаратное, так и программное обеспечение. К аппаратным средствам относятся датчики и модули, регулирующие микроклимат в теплице (исполнительные механизмы). В процессе автоматизации возникает задача обеспечения связи этих компонентов с управляющими модулями системы — программными средствами. Часто такие средства реализуются в виде облачных сервисов. Подобные системы позволяют удаленно собирать данные о микроклимате среды выращивания, хранить их и предоставлять авторизованным пользователям через Интернет или внутреннюю сеть предприятия. Кроме того, через интерфейс облачной системы пользователи могут в рамках своих полномочий дистанционно управлять основными параметрами микроклимата теплицы, такими как температура, влажность, освещенность, а также включать и отключать модули, регулирующие микроклимат. Такой подход существенно упрощает процессы обработки информации и управления.

Процесс передачи данных от модулей теплицы до точки доступа оператора состоит из трех этапов, а именно: передача данных от клиентского приложения исполнительного устройства до локального сервера облачной системы; передача данных от локального сервера до центрального облачного сервера; передача данных от центрального облачного сервера до клиентского устройства оператора.

На первом этапе необходимо обеспечить передачу данных внутри тепличного комплекса. Это можно реализовать через локальную сеть, организованную на основе беспроводной передачи данных через

модули беспроводной связи, либо на основе передачи с помощью кабельной инфраструктуры. Беспроводная передача данных, в отличие от проводной, позволяет свободно организовывать модули беспроводной связи в тепличном комплексе и перемещать их без необходимости построения и поддержания проводной инфраструктуры, для которой требуется прокладка кабель-каналов. При необходимости перемещения каких-либо модулей в проводной сети потребуются также и ее модификация, а возможности использования мобильных роботов в такой конфигурации крайне ограничены.

На втором этапе сложность представляет сбор данных с теплиц в центральное хранилище. Зачастую тепличные комплексы расположены в районах с низким качеством связи, и необходимо обеспечивать полноту получаемых данных и их синхронизацию в имеющихся условиях, а отсутствие связи на протяжении некоторого времени не должно приводить к потере данных. Это обуславливает целесообразность облачной архитектуры сервиса для управления роботизированными вертикальными фермами, в рамках которой можно выбрать и реализовать такие протоколы и алгоритмы передачи данных, которые обеспечивают наблюдаемость и управляемость тепличных комплексов и учитывают их расположение, доступные способы связи и возможные сложности, связанные с перебоем в сети и выходом оборудования из строя. Такая архитектура должна предусматривать наличие точек доступа, локальных и центральных серверов, способных накапливать данные в случае сбоя и передавать их при первой возможности.

В исследовании, результаты которого представлены в статье, ставится цель разработки подобной архитектуры на примере автоматизации вертикальных гидропонных ферм, предназначенных для выращивания микрозелени, зелени и неплодовых растений. Вертикальные теплицы позволяют выращивать больше продукции, чем в традиционных теплицах аналогичной площади. Они позволяют лучше масштабировать размеры теплицы под производственную нужное количества продукта. При этом снижаются расходы на субстрат и воду за счет их циркуляции в гидравлической системе теплицы. Так как вертикальные теплицы менее требовательны к условиям окружающей среды, их можно применять не только в сельской местности, но и в городской среде.

### Состояние исследований

Проанализируем современное состояние исследований и разработок в области автоматизации тепличных комплексов. Необходимыми условиями для автоматизации являются наличие средств мониторинга микроклимата тепличных комплексов и воздействия на него. Такой подход позволяет реализовать контур управления тепличным комплексом для автоматизированного выращивания культур в соответствии с заданной технологией.

Примером решения для сбора данных с датчиков через беспроводную сенсорную сеть является работа [1]. В ней описан сетевой модуль Micaz, главная особенность которого — низкое энергопотребление. Авторами разработан протокол маршрутизации, используемый в приложении для отслеживания параметров, получаемых с датчиков. Разработанная авторами [1] система проверялась в реальных условиях и показала работу без сбоев и ошибок. Используемый в ней протокол маршрутизации направлен на минимизацию энергопотребления сенсорной сетью.

Авторами работы [2] также было предложено решение, направленное на реализацию системы удаленного мониторинга за состоянием микроклимата теплицы. В ней предложена связка из микроконтроллера MSP430 с беспроводным сенсорным модулем Ez430-RF2500 для передачи сообщений с датчиков температуры и влажности. Используется сетевой протокол SimpliciTI, преимуществом которого является малая потребность в памяти и поддержка спящих режимов работы системы. Согласно полученным авторами работы [2] результатам для полноценной работы системы достаточно литиевых батарей на 3,3 В. При этом, однако, не предполагается мониторинг уровня освещенности и параметров циркуляции воздушных потоков в помещении.

В работе [3] авторы предлагают использовать систему, основанную на микроконтроллере NetDuino3 для мониторинга уровня влажности, освещенности и температуры в теплице. Преимуществами такого решения являются возможности подключения к wi-fi, использования различных датчиков — влажности почвы, температуры и влажности помещения, освещенности и потоков воздуха, поступающего в теплицу. Получаемые с датчиков данные передаются на мобильное устройство.

Кроме систем мониторинга микроклимата, существует отдельный вид систем для полноценного автоматизированного управления микроклиматом в закрытых тепличных комплексах. В работе [4] представлена автоматическая система управления теплицей для снижения расхода воды при поливе растений. Система круглосуточно контролирует параметры микроклимата теплицы, включая влажность почвы, и в случае отклонения какого-либо параметра микроконтроллер управляет работой исполнительных устройств для нормализации микроклимата. Предложенная в работе [4] автоматическая система орошения сочетает в себе капельный полив и распылитель, что позволило добиться экономии воды в 48,78 % по сравнению с ручным поливом.

Описанная в работе [5] система включает три датчика — освещенности, влажности и температуры. Такие системы применяют в теплицах, где выращивают разные виды растений. С учетом этого авторы описали правила, по которым выставляются необходимые пороговые значения на различных датчиках для поддержания здорового роста растений. Проведенные эксперименты доказали эффективность использования нечеткой логики для автоматизации

системы орошения за счет снижения уровня потребления воды. С помощью разработанной системы удалось добиться поддержания в пределах нормы значения температуры теплицы. Система, представленная в работе [6], отличается от рассмотренной выше тем, что в нее дополнительно заложена техническая возможность автоматического управления дверьми с помощью инфракрасного датчика. Такое дополнение позволяет предотвратить нарушения температурного режима внутри теплицы.

В статье [7] авторы предложили адаптивную систему управления микроклиматом теплицы, в которой одновременно используется нейронная сеть для прогнозирования климатического состояния теплицы, а также подход на основе нечеткой логики для регулирования скорости воздушных потоков и температуры теплицы. Система реализована на основе инструментальных средств MATLAB. Ее авторами был сделан вывод, что согласованное управление скоростью воздушных потоков и температурой теплицы позволяет добиться более эффективного использования энергетических ресурсов.

В современных научных исследованиях также предложены проекты, представленные в работе [8], применяющие в качестве беспроводной сенсорной сети технологию ZigBee. Такой подход, по мнению авторов [8], зарекомендовал себя для применения в сельском хозяйстве в качестве недорогой технологии обеспечения беспроводной связи. В работах [8, 9] авторы предлагают использовать такой протокол для сбора данных и управления микроклиматом теплицы. Работа систем вентиляции и орошения основана на алгоритме интервального управления. Для сокращения энергопотребления авторы предлагают вводить узлы системы в спящий режим в период их бездействия. Результаты тестирования предложенного решения показали, что эффективная работа такой системы с точки зрения доли потерянных пакетов возможна лишь при малом объеме помех между сенсорами и управляющим модулем, а также на относительно малых расстояниях между ними.

Авторами работы [10] было предложено веб-приложение для удаленного управления микроклиматом теплицы. В качестве протокола связи с сенсорными устройствами также выбрана технология ZigBee. Эксперименты проводили для теплицы малой площади с малым числом датчиков, что обусловлено упомянутыми выше недостатками данной технологии.

Для передачи данных между контроллером и управляющим сервером в работе [11] была использована технология GSM-GPRS — более надежная и быстрая по сравнению с ZigBee и радиочастотными модулями. Для удаленного мониторинга и анализа данных с датчиков, установленных в теплице, в предлагаемой системе используется концепция интернета вещей, которая, по мнению ее авторов, является наиболее перспективной технологией для подключения полевых устройств к беспроводным интернет-сетям или к устройствам с дистанционным

управлением [12, 13]. Микроконтроллер ATmega328 контролирует работу системы и управляет нагревателями/охладителями, распылителями, лампами и водными насосами для поддержания требуемого микроклимата для роста растений. Аprobация системы проводилась на небольшой вертикальной теплице. Проведенные эксперименты показали работоспособность решения. Однако при тестировании системы точность мониторинга параметров среды оказалась низкой в связи со сложностью оптимального позиционирования сенсорных элементов в рамках вертикальных тепличных комплексов. Такой эффект объясняется тем, что конструктивные особенности такого решения приводят к возникновению существенных отклонений параметров микроклимата в различных точках теплиц.

Управление аналогичным набором параметров в работе [14] также осуществлялось с помощью микроконтроллера ATmega328. Основное отличие данной системы от рассмотренных выше заключается в применении проводной инфраструктуры, что осложняет использование таких систем в работающих тепличных комплексах. Аналогичные сложности характерны для теплиц большого размера, несмотря на несомненные преимущества в скорости и стабильности связи сенсорных и управляющих модулей.

В ряде других работ [15—19] также предлагается системы мониторинга и управления микроклиматом тепличных комплексов, в основе которых лежит использование инструментария нечеткой логики или иных управляющих моделей. Предложенные решения отличаются архитектурой программного обеспечения, используемым оборудованием и технологиями передачи данных, а также набором датчиков и исполнительных устройств. Тем не менее для них так же, как и для подавляющего большинства представленных выше решений характерно то, что они разрабатывались в целях обеспечения автоматизированного управления микроклиматом в одноуровневых теплицах закрытого грунта. С учетом особенностей комплексов данного класса, в центре внимания исследователей находились не столько задачи по увеличению числа управляемых параметров, сколько задачи минимизации энергопотребления.

Современные вертикальные тепличные комплексы, исследованные и представленные в работе [20], обладают рядом особенностей. К их числу относятся: высокая плотность размещения культур; расположение опорных конструкций по всему объему помещения; многоуровневость. Эти особенности повышают уровень помех в помещении и сокращают радиус устойчивой передачи сигнала вследствие наличия большего количества растительной массы и других препятствий. Такие вертикальные конструкции оказывают серьезное влияние на структуру микроклимата в помещениях, что приводит к образованию зон локального отклонения параметров микроклимата. Устранение этих недостатков требует увеличения плотности размещения сенсорных устройств для

сохранения высокого уровня точности отслеживания параметров микроклимата.

В работе [21] рассмотрена роботизация процессов мониторинга микроклимата в тепличных комплексах. Авторами предложена модель службы интеллектуального управления роботами для работы в автоматической вертикальной теплице. Робот локально отслеживает процессы окружающей среды с помощью различных датчиков и цифровых камер. Собранная информация о текущем состоянии микроклимата и насаждений передается пользователю, управляющему теплицей. Недостатком данного решения является низкий уровень автоматизации — робот действует исключительно по команде пользователя и автономно реализует лишь отдельные низкоуровневые операции.

Таким образом, автоматизация процессов мониторинга микроклимата вертикальных тепличных комплексов является перспективным и активно развивающимся направлением. Однако существующие решения либо рассчитаны на использование в ручном режиме, либо не учитывают специфические особенности вертикальных теплиц, вследствие чего их применение в данном классе теплиц без существенной модернизации сопряжено со сложностями. Можно выделить следующие требования для архитектурных решений: масштабируемость, автономность тепличных комплексов, поддержка сенсорных и мобильных устройств с высокой плотностью размещения, устойчивость к обрывам связи, возможность удаленного централизованного управления комплексами.

В настоящей статье предлагается решение на основе облачной архитектуры, предназначенное для управления роботизированными вертикальными фермами. Системы, построенные на основе предлагаемой архитектуры, позволяют выполнять мониторинг микроклимата и состояния оборудования ферм, обеспечивают надежную двустороннюю передачу данных между модулями теплицы, серверами и операторами и предоставляют последним возможность дистанционно управлять процессом выращивания. Такие системы могут быть использованы для выращивания культур как в вертикальных гидропонных установках, так и в одноуровневых теплицах закрытого грунта. Указанные возможности достигаются благодаря поддержке беспроводной передачи данных. Решение позволяет выполнять сбор данных о микроклимате тепличного комплекса с помощью робототехнических средств и передавать эти данные в облако посредством локальных серверов.

### Архитектура сервиса

Для управления тепличным комплексом используется подход облачных вычислений, который заключается в размещении данных и служб на серверах (как локальных, связанных с отдельными теплицами, так и центрального облачного сервера) и их предоставлении по запросу от авторизованных поль-

зователей и компонентов системы. Такое решение позволяет организовать сбор данных со всех теплиц в иерархическую систему хранилищ и предоставить технологам единый интерфейс управления тепличным комплексом.

Центральной идеей разработанного сервиса является использование конфигураций. Конфигурация содержит описание контейнера — конкретного набора узлов (датчиков, исполнительных механизмов), функционирующих в некотором тепличном комплексе. Кроме того, конфигурация содержит настройки для всех сенсорных устройств. Конфигурация включает также программу управления исполнительными устройствами, обеспечивающую корректность технических процессов выращивания. Поскольку в статье рассматривается создание тепличных комплексов для выращивания микрозелени, зелени и неплодовых растений, эта программа состоит из простых условий, не привязанных к временным рамкам роста растений, а также не разделяется на дневную и ночную.

Для эффективного управления тепличным комплексом необходимо обеспечить возможность выполнения следующих действий: получение и анализ информации о микроклимате; управление процессом выращивания; получение уведомлений о внештатных ситуациях, отказах работы датчиков. Полученные данные о датчиках и управляющих устройствах, об их состояниях, отказах работы и других событиях поступают на локальный сервер теплицы, к которой они привязаны, а затем на центральный сервер. Управление процессом выращивания происходит через личный кабинет пользователя, доступный через веб-приложение облачного сервиса. Всего в тепличном комплексе есть три роли пользователей:

- **главный технолог** — администратор системы, имеет доступ ко всем данным теплиц, хранящихся в облаке; он задает состав контейнера и рекомендуемой технологии выращивания, назначает технологов для управления параметрами теплиц и конфигурациями выращивания;
- **технолог** — имеет доступ только к своей теплице, назначенной ему главным технологом; он задает детальную конфигурацию выращивания с использованием набора датчиков и исполнительных устройств контейнера, заданного главным технологом;
- **инженер** — имеет доступ только к своей теплице, назначенной главным технологом; через мобильное приложение он запрашивает состав контейнеров и конфигураций, созданных главным технологом, и отправляет полученные данные на управляющее устройство (ESP).

Управление теплицами, конфигурацией выращивания и микроклиматом выполняется главным технологом и технологами отдельных теплиц. Диаграммы прецедентов для главного технолога и технолога теплицы представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

Обобщенная структура системы управления автоматизированными тепличными комплексами, позволяющая реализовать описанные действия, изо-



Рис. 1. Диаграмма прецедентов для главного технолога



Рис. 2. Диаграмма прецедентов для технолога теплицы

бражена на рис. 3. Решение состоит из центрального модуля, который представляет собой облачный сервис, и множества тепличных комплексов, оснащенных локальными серверами, выполняющими сбор данных и взаимодействие с облачным сервисом.

Чтобы упростить изложение, в статье будет рассматриваться система с одним подключенным тепличным комплексом. Облачная архитектура для этого случая представлена на рис. 4. Она состоит из четырех основных блоков: облачный сервер, веб-

клиент в клиентском устройстве оператора, локальный сервер объекта (ЛСО) и локальный веб-клиент устройства, функционирующего в теплице. К одному облачному серверу может подключаться несколько ЛСО. Локальный сервер объекта является главным устройством теплицы, на которое поступает информация о состоянии датчиков и исполнительных устройств. Облачный сервис хранит данные о микроклимате, собираемые со всех ЛСО теплиц. Репликация данных с локального устройства на облако позволяет

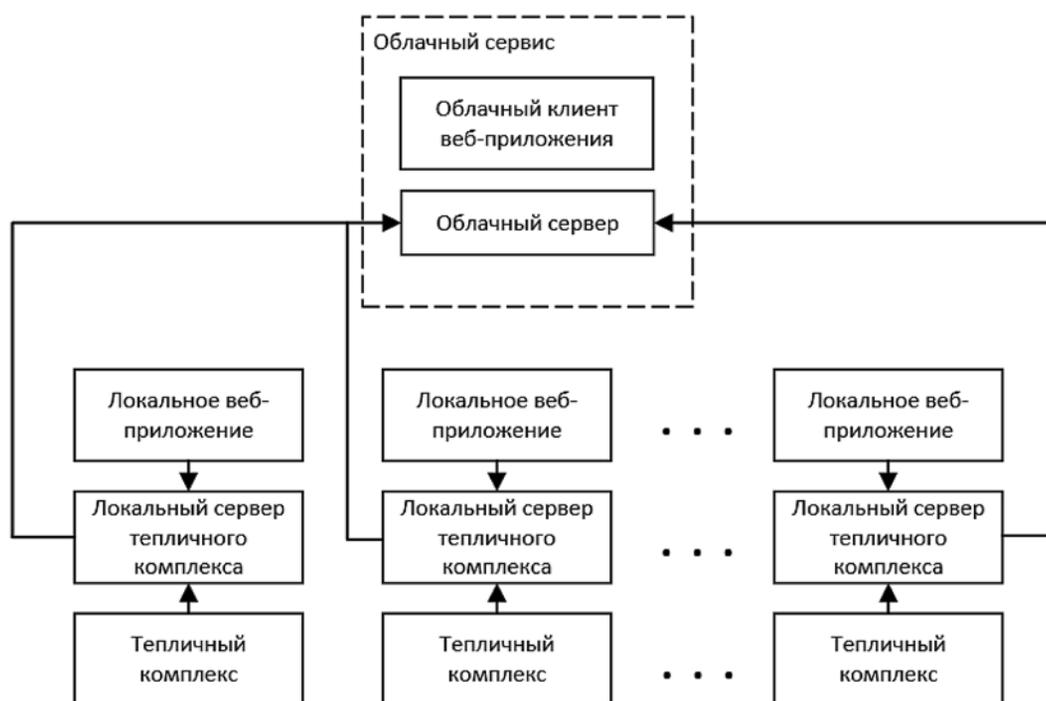


Рис. 3. Общая структура системы



Рис. 4. Упрощенная архитектура облака

повысить надежность работы тепличного комплекса и снизить риск недоступности данных при перебоях в сети. При отсутствии доступа к облаку показания записываются в базу данных (БД) локального устройства, а при восстановлении связи ЛСО синхронизирует показания с базой данных облачного сервиса.

Рассмотрим более подробно некоторые компоненты предлагаемой архитектуры.

Модуль анализа данных, находящийся и на облачном сервере, и на ЛСО теплиц, позволяет получить отчет о соответствии показателей микрокли-

мата параметрами выращивания, заданным главным технологом. Такой модуль позволяет оценить целесообразность данной программы выращивания и надежность выбранных составляющих контейнера выращивания, а также дать оценку динамики роста растений. Модуль анализа оценивает соответствие информации, получаемой с датчиков, и технологии выращивания, зарегистрированной под конкретный тип продукции главным технологом. При этом могут быть выявлены нарушения, например, несоответствие фактического температурного режима в теплице

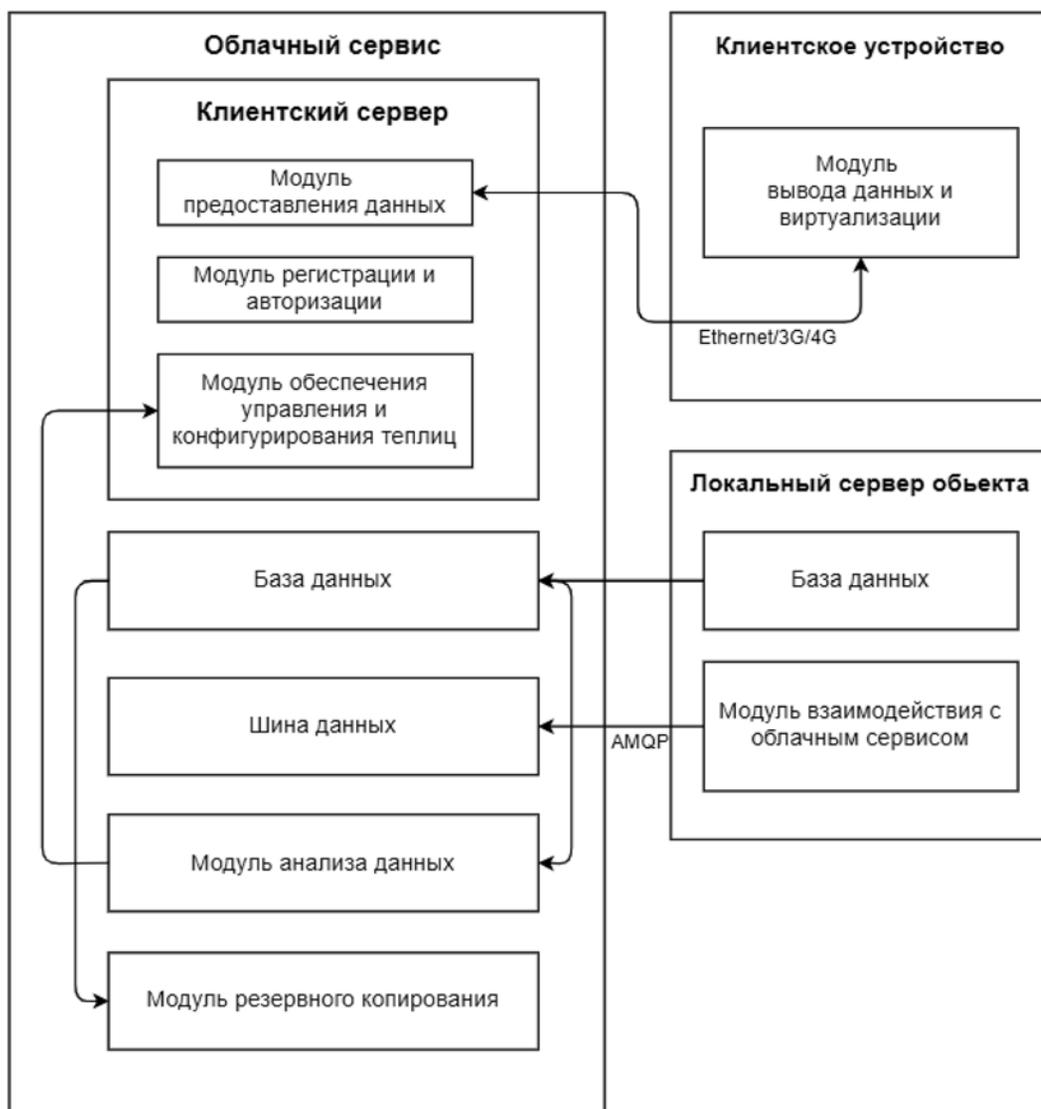


Рис. 5. Архитектура облачного сервера

це требуемому режиму, несоответствие внешних параметров растений нормативным, что можно оценить методами компьютерного зрения. Если подобные нарушения найдены, пользователю отправляется сообщение в его личном кабинете.

На рис. 5 и 6 представлены архитектуры облачного и локального сервисов теплиц. Данные сервисы схожи по своим функциям, отличие заключается в том, что облачный сервис в большей степени выполняет функции хранения информации и ее обработки, тогда как локальный сервис агрегирует новые данные, поступающие от устройства управления группой (ESP) — микроконтроллера, и передает их на облачный сервер через шину данных по протоколу AMQP (Advanced Message Queuing Protocol). Это устройство также отвечает за работу датчиков и других устройств в тепличном комплексе на аппаратном уровне. Данные с ESP поступают на

модуль преобразования данных от сенсоров и исполнительных устройств в локальном сервере тепличного комплекса.

Рассмотрим процесс работы облачного сервера с другими компонентами. Взаимодействие с инженерами и технологами выполняется через мобильное приложение. Состав интерфейса этого приложения приведен на рис. 7.

На рис. 8 приведена диаграмма классов, характеризующая типы и свойства программных объектов, описывающих взаимодействие компонентов веб-приложения между собой.

Бизнес-процессы взаимодействия инженеров с тепличным комплексом приведены на рис. 9 и 10. Через клиентское приложение пользователь с ролью "инженер" запрашивает у облачного сервера данные о контейнерах и конфигурациях выращивания. После этого он настраивает устрой-



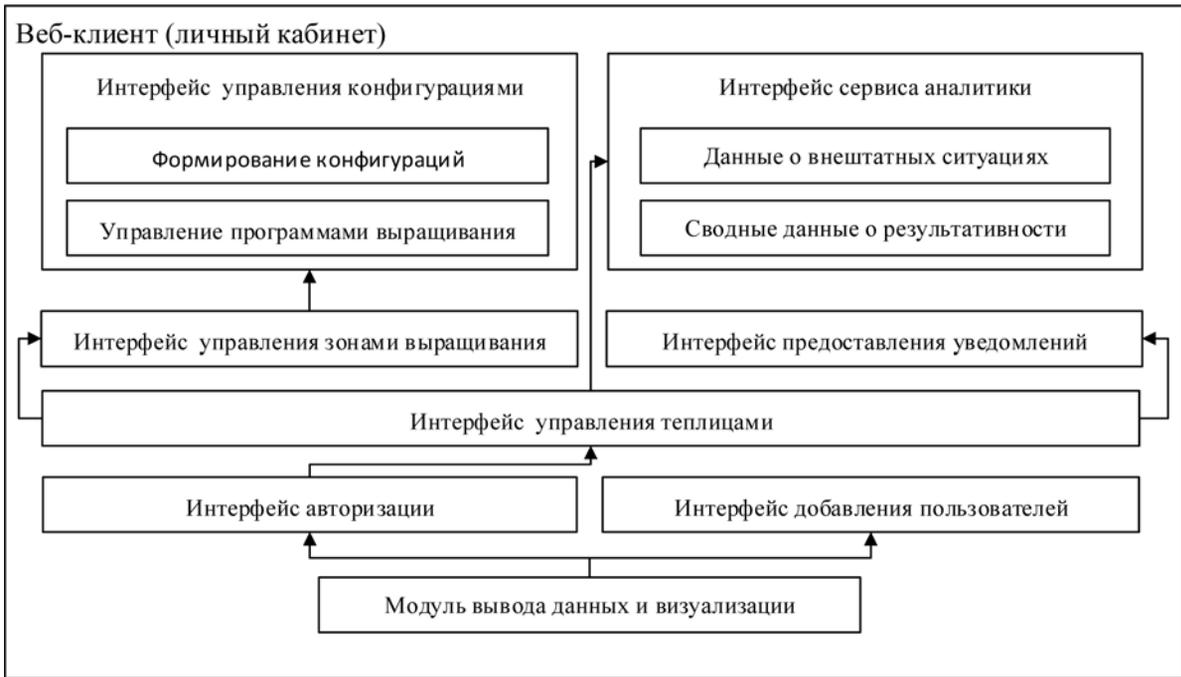


Рис. 7. Структура пользовательского интерфейса мобильного приложения

действия для налаживания или корректировки процесса выращивания. Бизнес-процессы применимы как для облачного сервера, так и для локального сервера теплицы.

Представленные бизнес-процессы позволяют понять и оценить принципы организации мониторинга и управления выращиванием в тепличном комплексе с использованием предложенной архитектуры.

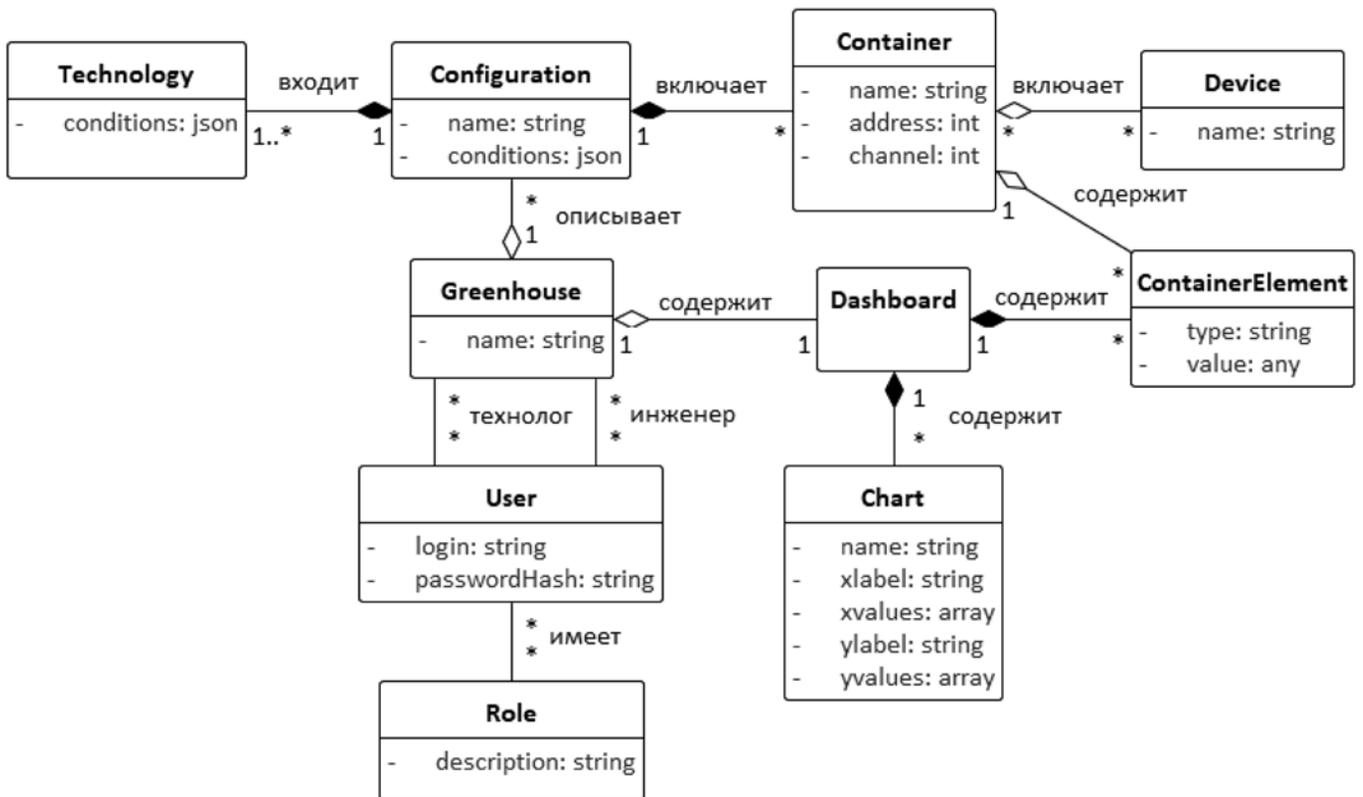


Рис. 8. Диаграмма классов, описывающая программные объекты веб-приложения

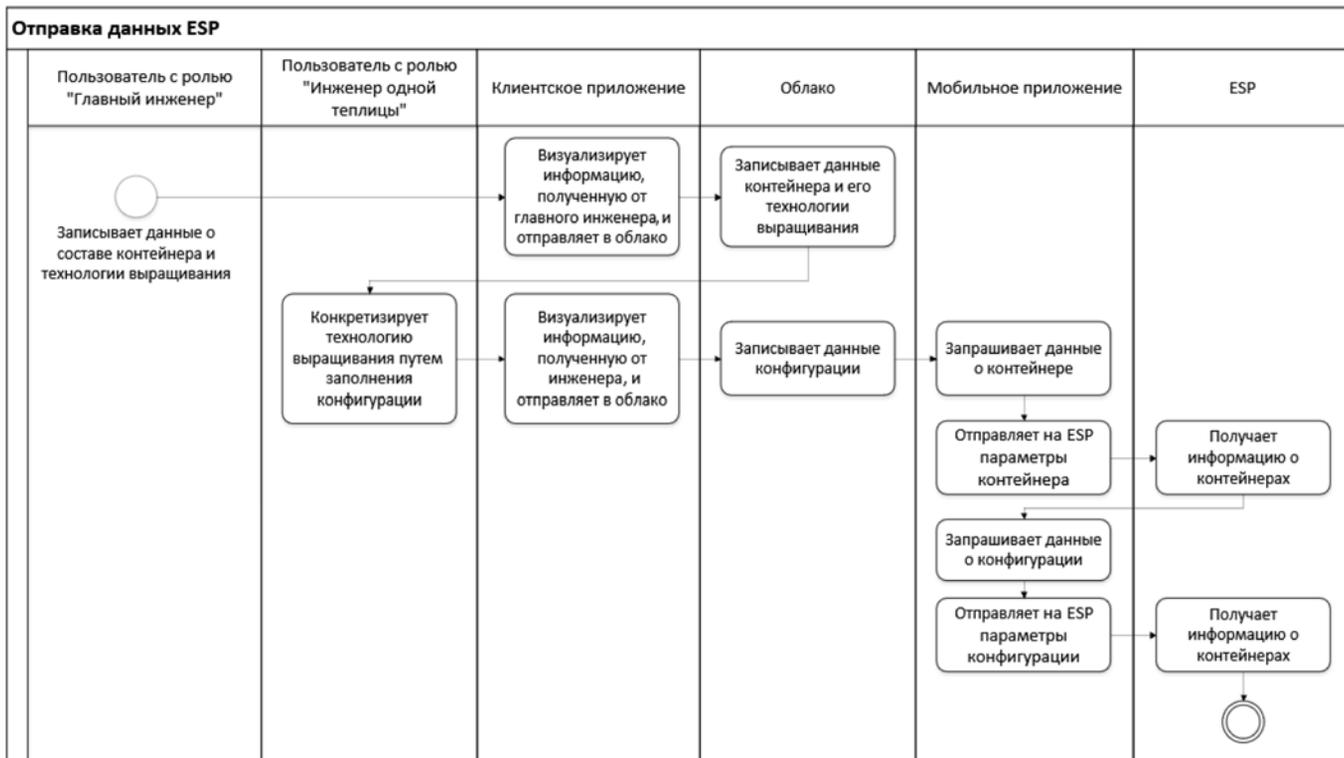


Рис. 9. Бизнес-процесс отправки конфигурации выращивания на устройство управления группами (ESP)

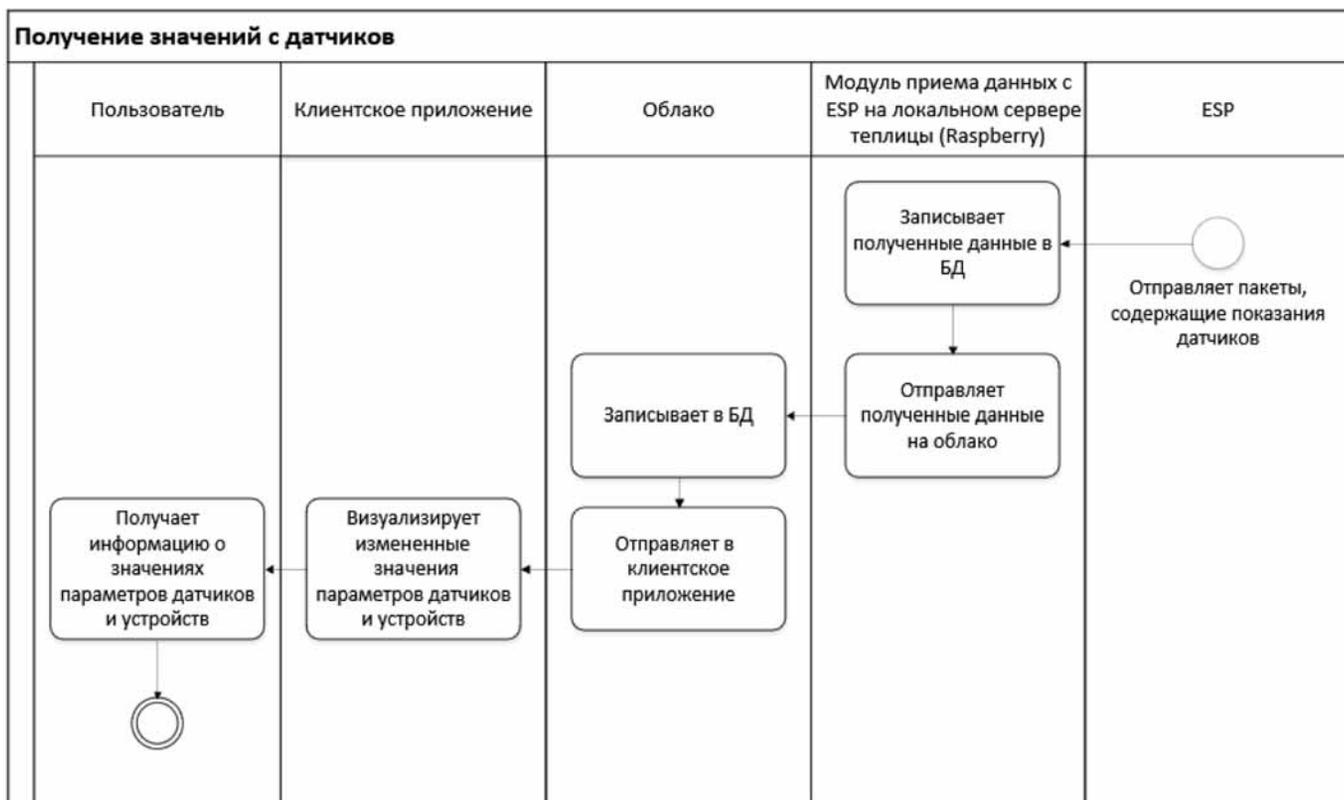


Рис. 10. Бизнес-процесс получения данных с датчиков тепличного комплекса

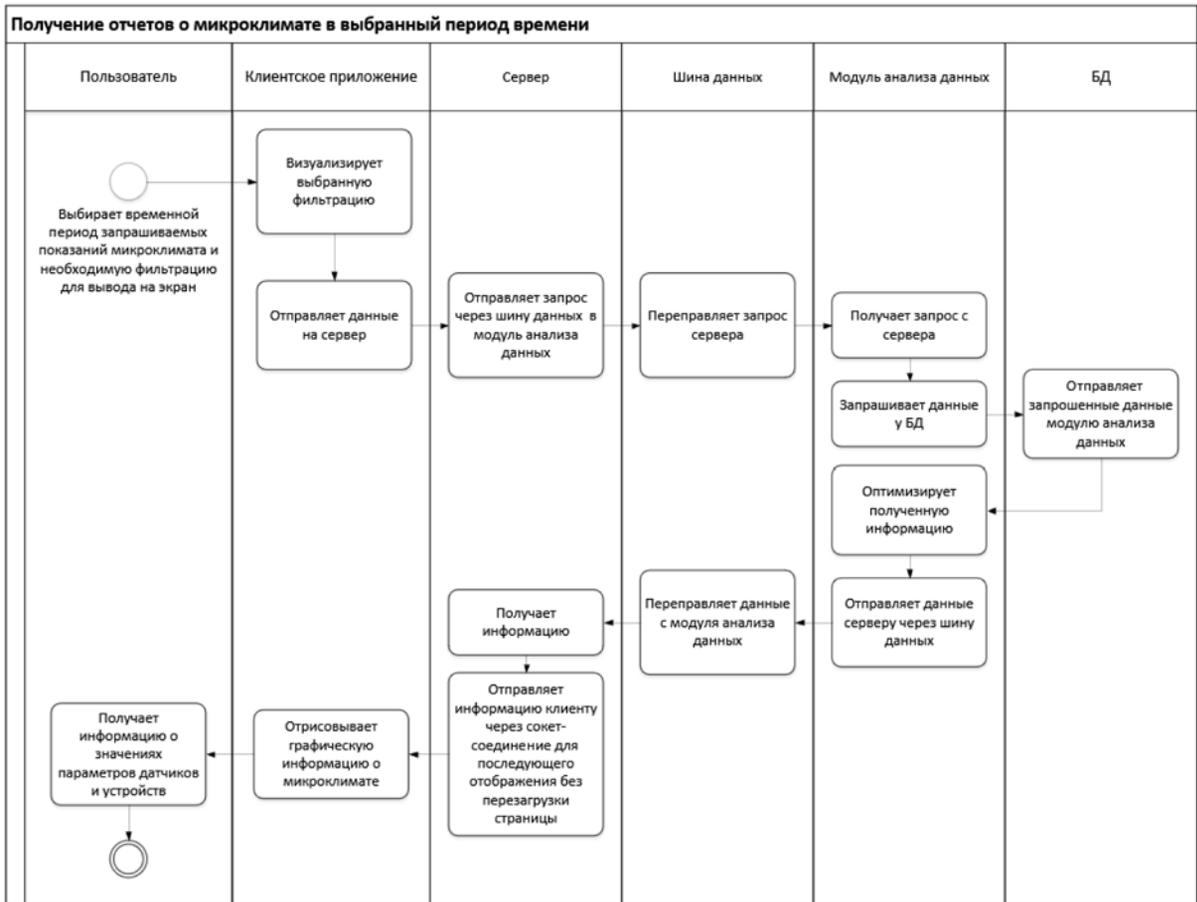


Рис. 11. Бизнес-процесс получения отчетных данных с датчиков тепличного комплекса

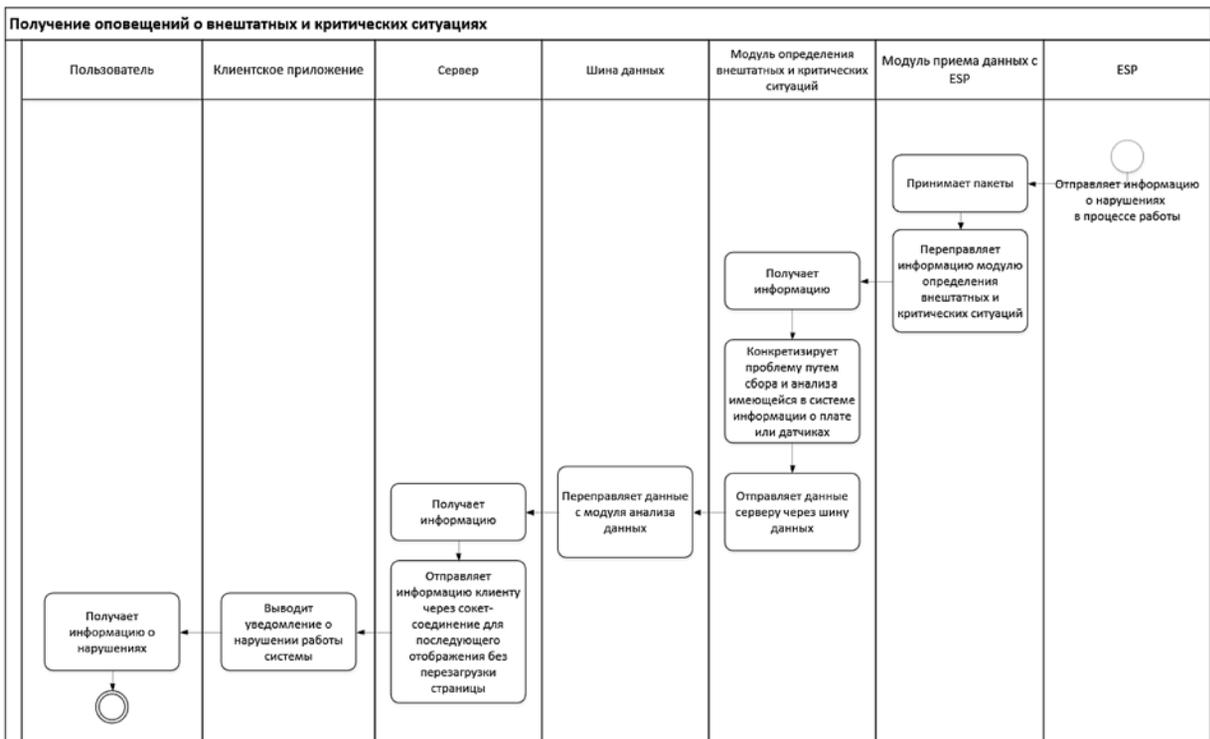


Рис. 12. Бизнес-процесс получения пользователем информации о внештатных и критических ситуациях

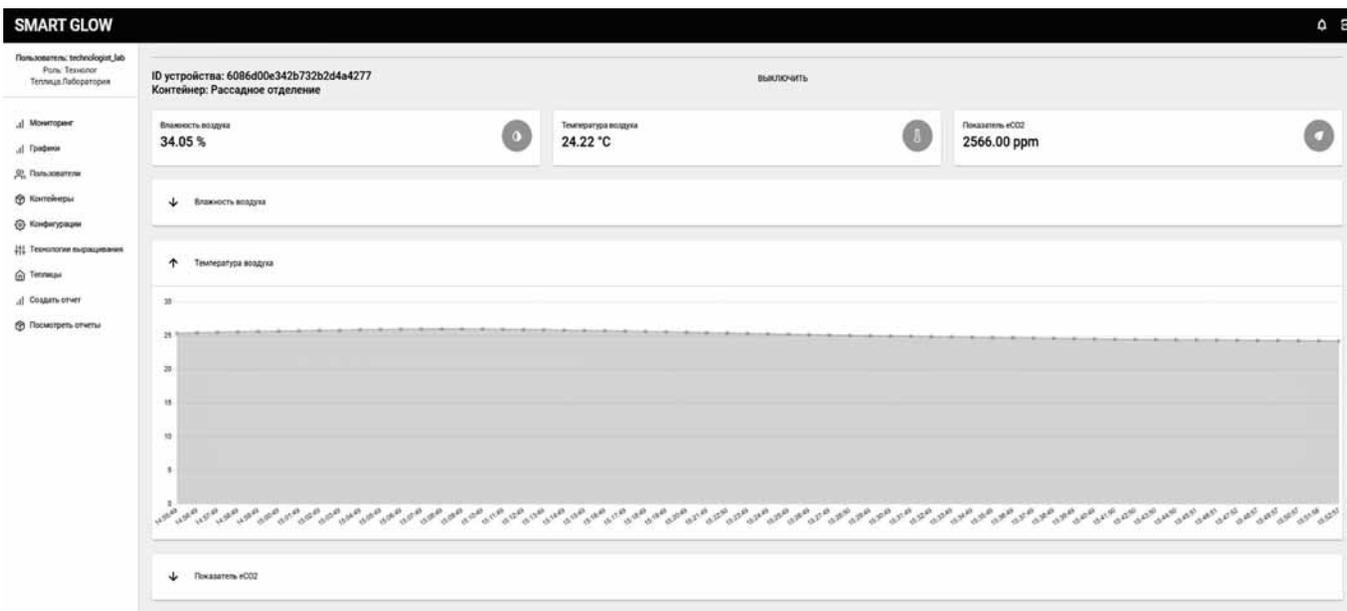


Рис. 13. Клиентское приложение

## Результаты

Предложенные решения удовлетворяют поставленным требованиям. Так, система является масштабируемой, поскольку она реализована в виде иерархической структуры, и в случае исчерпания ресурса одного из узлов можно ввести дополнительный параллельный узел. Например, при превышении числа управляемых модулей устройства управления группой можно установить дополнительное устройство, взаимодействующее с тем же сервером, что и исходное. Автономность тепличных комплексов обеспечивается наличием в каждом из них локального сервера объекта, сходного по функциональным возможностям с облачным сервером. Наличие таких серверов также обеспечивает устойчивость к обрывам связи и возможность удаленного централизованного управления комплексами. Поддержка беспроводных протоколов связи позволяет использовать мобильные робототехнические модули, что критично для вертикальных ферм и ферм больших масштабов.

В процессе исследования был реализован прототип системы автоматизированного управления микроклиматом с использованием приведенной архитектуры. Были проведены эксперименты по получению данных от устройства управления группой показаний микроклимата теплицы (температура воздуха, влажность воздуха, уровень освещенности) при выращивании различных типов микрозелени (редис, базилик и т. п.) В качестве устройства управления группой был использован контроллер серии ESP32. Использовалась операционная система Ubuntu 18.04.6 LTS (Bionic Beaver), программное обеспечение низкого уровня системы написано на языках C

и C++, для серверной части использован язык Node.js. Для модуля управления группой использованы библиотеки RTC 2.3 и U8g2 2.28.8, адаптированная для микроконтроллера STM32. Для датчиков использованы библиотеки TSL2561 и BME280 Sensor API. Дистанционное считывание информации с датчиков и управление исполнительными устройствами реализовано на основе беспроводной технологии LoRa, позволяющей передавать небольшие объемы данных со скоростью до 50 кбит/с на расстояние до нескольких километров.

При тестировании облачного сервиса был проведен эксперимент получения информации о микроклимате теплицы с шести разных плат, подключенных к управляющему устройству, к которым были подключены датчики измерения температуры и влажности воздуха, а также уровня освещенности. Данные приходили и записывались на локальный и облачный серверы теплицы с 18 января по 1 марта 2021 г. Объем полученной и впоследствии оптимизированной информации составил 8 МБ при интервале получения новых пакетов 1...4 мин.

Время получения информации о показаниях датчиков, установленных в теплице пользователем, от отправки информационного пакета управляющим устройством ESP до отображения на экране, складывается из времени обработки информации модулем приема пакетов с ESP на локальном сервере, времени отправки в облако и времени передачи сообщений с обновленной информацией по шине данных. При тестировании получения пакетов время передачи сообщений через шину данных составило 0,28 с. Обработка пакета, состоящего из шести сообщений на каждую плату, на модуле приема данных с ESP на облаке и на локальном сервере теплично-

го комплекса заняла 0,09...0,24 с. После обновления информации о микроклимате в базе данных и получения сигнала сервером об обновлении показаний в клиентском приложении для этих же пакетов проходит еще 0,56...0,96 с. В итоге весь процесс получения пользователем информации о текущем состоянии микроклимата в тепличном комплексе занимает 0,93...1,48 с для шести плат, получающих данные с датчиков температуры, влажности воздуха и уровня освещенности.

Для составления отчета о показаниях параметров микроклимата для выбранного пользователем периода времени и числа плат, подключенных к теплице, серверу необходимо в среднем 0,76 с.

На обработку пользовательских операций, таких как создание и редактирование контейнеров, конфигураций и технологий выращивания, серверу требуется 0,35...0,95 с в зависимости от сложности контейнера, конфигурации или технологии выращивания.

На рис. 13 показан вид клиентского приложения с визуализацией данных, полученных с управляющего устройства теплицы.

Результаты тестирования показывают, что с момента отправки пакетов с данными до их визуализации на экране пользователя проходит не более 2 с, что можно считать допустимым временем реакции пользовательского интерфейса [22]. Отсюда можно сделать вывод, что предложенная архитектура помогает организовать быструю передачу данных для теплицы со схожим набором датчиков.

Таким образом, разработанная система может быть использована для удаленного управления процессом выращивания растений. Тепличный комплекс поддерживает использование в различных типах ферм, как в гидропонных вертикальных, так и в закрытых грунтовых, благодаря тому, что ни получение информации о выращивании и самой теплице, ни управление ею не зависят от площади теплицы, а для аппаратного управления используются беспроводные узлы.

## Заключение

Предложенная и реализованная облачная архитектура может быть использована для разработки программного обеспечения, автоматизирующего выращивание микророзели, зелени и неплодовых растений в вертикальных гидропонных установках, а также в горизонтальных теплицах в закрытом грунте. Поскольку для связи между модулями и локальным сервером теплицы используется беспроводная сеть, архитектура не накладывает ограничений на тип и расположение модулей в тепличных комплексах, и можно считать такую систему гибкой в использовании и масштабируемой. Дублирование функциональности и репликация баз данных между локальными серверами объектов и облачным сервером позволяют повысить доступность данных и надежность системы.

В дальнейшем программное обеспечение, разработанное на основе предложенной архитектуры, планируется использовать для управления вертикальным тепличным комплексом (многоуровневой гидропонной установкой). Такой подход позволит нивелировать необходимость ручного труда в технологических процессах производства. Предлагаемое решение расширит сферу роботизации сельского хозяйства, а также повысит эффективность производства за счет интеграции методов точечного мониторинга микроклимата и оценки динамики роста растений.

## Список литературы

1. Akkaş M. A., Sokullu R. An IoT-based greenhouse monitoring system with Micaz motes // *Procedia computer science*. — 2017. — Vol. 113. — P. 603–608.
2. Aytakin S. A., Levent M. L. Greenhouse Automation using Wireless System // *International journal of engineering and computing*. — 2016. — Vol. 6. URL: [https://www.researchgate.net/publication/312117301\\_Greenhouse\\_Automation\\_Using\\_Wireless\\_System](https://www.researchgate.net/publication/312117301_Greenhouse_Automation_Using_Wireless_System)
3. Raj J. S., Ananthi J. V. Automation using IoT in greenhouse environment // *Journal of Information Technology*. — 2019. — Vol. 1, No. 01. — P. 38–47.
4. Sivagami A., Hareeshvare U., Maheshwar S., Venkatachalapathy V. Automated irrigation system for greenhouse monitoring // *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*. — 2018. — Vol. 99, No. 2. — P. 183–191.
5. Cosman S. I., Bilatiu C. A., Martiş C. S. Development of an Automated System to Monitor and Control a Greenhouse // *15th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)*. — IEEE, 2019. — P. 1–4.
6. Harivardhagini S. LabVIEW based Greenhouse Automation // *CVR Journal of Science and Technology*. — 2017. — Vol. 13. — P. 79–82.
7. Nicolosi G., Volpe R., Messineo A. An innovative adaptive control system to regulate microclimatic conditions in a greenhouse // *Energies*. — 2017. — Vol. 10, No. 5. — P. 722.
8. Chen F., Qin L., Li X. et al. Design and implementation of ZigBee wireless sensor and control network system in greenhouse // *36th Chinese Control Conference (CCC)*. — IEEE, 2017. — P. 8982–8986.
9. Shi L., Li Q., Qian S. Design of Greenhouse Environmental Monitoring System Based on Arduino and ZigBee // *International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation*. — Springer, Singapore, 2018. — P. 576–582.
10. Li Z., Wang J., Higgs R. et al. Design of an intelligent management system for agricultural greenhouses based on the internet of things // *2017 IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (IC3E)*. — 2017. — P. 154–160.
11. Ullah M. W., Mortuza M., Kabir M. et al. Internet of Things Based Smart Greenhouse: Remote Monitoring and Automatic Control // *DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Sciences*. — 2018. DOI: 10.12783/dteees/iceee2018/27803.
12. Tangarife H. I., Díaz A. E. Robotic applications in the automation of agricultural production under greenhouse: A review // *2017 IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*. — IEEE, 2017. — P. 1–6.
13. Diaz P., Carrera R. IoT components for floriculture automation // *2019 IEEE CHILEAN Conference on Electrical,*

---

---

Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON). — IEEE, 2019. — P. 1–5.

14. **Saha T., Jewel M. K., Mostakim M. N.** et al. Construction and Development of an Automated Greenhouse System Using Arduino Uno // International Journal of Information Engineering and Electronic Business. — 2017. — Vol. 9, No. 3. — P. 1–8.

15. **Azhar M., Hamid M., Irfan M.** et al. Automated greenhouse system // 2019 2nd International Conference on Communication, Computing and Digital systems (C-CODE). — IEEE, 2019. — P. 215–219.

16. **Basnet B., Lee I., Noh M.** et al. A smart greenhouse automation system applying moving average algorithm // The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers. — 2016. — Vol. 65, No. 10. — P. 1755–1760.

17. **Siddiqui M., Khan A.-U.-R., Kanwal N.** et al. Automation and monitoring of greenhouse // 2017 International Conference on Information and Communication Technologies (ICICT). — IEEE, 2017. — P. 197–201.

18. **Aydoğan T., Ergün S.** Controlling of a Greenhouse by Using Intelligent Agent System // International Journal of Information and Electronics Engineering. — 2017. — Vol. 7, No. 6. — P. 168–172.

19. **Azaza M., Tanougast C., Fabrizio E., Mami A.** Smart greenhouse fuzzy logic-based control system enhanced with wireless data monitoring // ISA transactions. — 2016. — Vol. 61. — P. 297–307.

20. **Гинь Р. А., Карпенко Е. Н.** Модернизация и совершенствование управления параметрами микроклимата — основа теплиц V поколения // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. — 2016. — № 123. — С. 1929–1951.

21. **Kim H. G., Park D., Chowdhury O. R.** et al. Location-based intelligent robot management service model using RGPSi with AoA for vertical farm // Advances in Computer Science and its Applications. — Springer, Berlin, Heidelberg, 2014. — P. 309–314.

22. **Nielsen J.** Usability Engineering. — San Diego: Morgan Kaufmann, 1994. — 362 p.

---

---

## Software Architecture of an Automated Greenhouse Complex based on Cloud Technologies

**O. A. Kachanova**, kachanova.o@iias.spb.su, **D. K. Levonevskiy**, DLewonewski.8781@gmail.com, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 199178, Russian Federation

*Corresponding author:*

**Levonevskiy Dmitriy K.**, PhD, Senior Researcher, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 199178, Russian Federation  
E-mail: DLewonewski.8781@gmail.com

*Received on June 07, 2021  
Accepted on October 13, 2021*

*To grow crops in greenhouse complexes, it is necessary to maintain the microclimatic conditions required for these crops and monitor them. Automation of these processes is an urgent task, and for its solution it is necessary to use both hardware and software. The paper proposes a cloud service architecture for managing robotic vertical farms, which allows for reliable two-way data transfer between the greenhouse modules and the operator and can be used for growing crops both in vertical hydroponic installations and in single-level greenhouses of greenhouses. The business processes are described that allow you to understand and evaluate the principles of organizing monitoring and management of cultivation. On the basis of the developed architecture, software has been implemented, which has been tested in the tasks of managing the greenhouse complex and obtaining data on the microclimate. Thanks to the use of wireless networks, the absence of restrictions on the type and location of modules, duplication of functionality and data replication, such a system can be considered flexible in use and scalable.*

**Keywords:** cloud services, software architecture, automated greenhouse complexes, cyber-physical systems, microclimate control

*For citation:*

**Kachanova O. A., Levonevskiy D. K.** Software Architecture of an Automated Greenhouse Complex based on Cloud Technologies, *Programmnaya Ingeneria*, 2021, vol. 12, no. 9, pp. 475–489.

DOI: 10.17587/prin.12.475-489

## References

1. Akkaş M. A., Sokullu R. An IoT-based greenhouse monitoring system with Micaz motes, *Procedia computer science*, 2017, vol. 113, pp. 603–608.
2. Aytakin S. A., Levent M. L. Greenhouse Automation using Wireless System, *International journal of engineering and computing*, 2016, vol. 6, available at: [https://www.researchgate.net/publication/312117301\\_Greenhouse\\_Automation\\_Using\\_Wireless\\_System](https://www.researchgate.net/publication/312117301_Greenhouse_Automation_Using_Wireless_System)
3. Raj J. S., Ananthi J. V. Automation using IoT in greenhouse environment, *Journal of Information Technology*, 2019, vol. 1, no. 1, pp. 38–47.
4. Sivagami A., Hareeshvare U., Maheshwar S., Venkatachalapathy V. Automated irrigation system for greenhouse monitoring, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 2018, vol. 99, no. 2, pp. 183–191.
5. Cosman S. I., Bilatiu C. A., Martiş C. S. Development of an Automated System to Monitor and Control a Greenhouse, *15th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)*, IEEE, 2019, pp. 1–4.
6. Harivardhagini S. LabVIEW based Greenhouse Automation, *CVR Journal of Science and Technology*, 2017, vol. 13, pp. 79–82.
7. Nicolosi G., Volpe R., Messineo A. An innovative adaptive control system to regulate microclimatic conditions in a greenhouse, *Energies*, 2017, vol. 10, no. 5, p. 722.
8. Chen F., Qin L., Li X. et al. Design and implementation of ZigBee wireless sensor and control network system in greenhouse, *36th Chinese Control Conference (CCC)*, IEEE, 2017, pp. 8982–8986.
9. Shi L., Li Q., Qian S. Design of Greenhouse Environmental Monitoring System Based on Arduino and ZigBee, *International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation*, Springer, Singapore, 2018, pp. 576–582.
10. Li Z., Wang J., Higgs R. et al. Design of an intelligent management system for agricultural greenhouses based on the internet of things, *2017 IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous*, 2017, pp. 154–160.
11. Ullah M. W., Mortuza M., Kabir M. et al. Internet of Things Based Smart Greenhouse: Remote Monitoring and Automatic Control, *DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Sciences*, 2018, DOI: 10.12783/dteees/iceee2018/27803.
12. Tangarife H. I., Díaz A. E. Robotic applications in the automation of agricultural production under greenhouse: A review, *2017 IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*, IEEE, 2017, pp. 1–6.
13. Diaz P., Carrera R. IoT components for floriculture automation, *2019 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, IEEE, 2019, pp. 1–5.
14. Saha T., Jewel M. K. Mostakim M. N. et al. Construction and Development of an Automated Greenhouse System Using Arduino Uno, *International Journal of Information Engineering and Electronic Business*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 1–8.
15. Azhar M., Hamid M., Irfan M. et al. Automated greenhouse system, *2019 2nd International Conference on Communication, Computing and Digital systems (C-CODE)*, IEEE, 2019, pp. 215–219.
16. Basnet B., Lee I., Noh M. et al. A smart greenhouse automation system applying moving average algorithm, *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, 2016, vol. 65, no. 10, pp. 1755–1760.
17. Siddiqui M., Khan A.-U.-R., Kanwal N. et al. Automation and monitoring of greenhouse, *2017 International Conference on Information and Communication Technologies (ICICT)*, IEEE, 2017, pp. 197–201.
18. Aydoğan T., Ergün S. Controlling of a Greenhouse by Using Intelligent Agent System, *International Journal of Information and Electronics Engineering*, 2017, vol. 7, no. 6, pp. 168–172.
19. Azaza M., Tanougast C., Fabrizio E., Mami A. Smart greenhouse fuzzy logic-based control system enhanced with wireless data monitoring, *ISA transactions*, 2016, vol. 61, pp. 297–307.
20. Gish R. A., Karpenko E. N. Modernization And Enhancement Of Microclimate Parameter Management Are The Basis Of The V Generation Greenhouses, *Politematicheskij setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2016, no. 123, pp. 1929–1951 (in Russian).
21. Kim H. G., Park D., Chowdhury O. R. et al. Location-based intelligent robot management service model using RGPSi with AoA for vertical farm, *Advances in Computer Science and its Applications*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2014, pp. 309–314.
22. Nielsen J. *Usability Engineering*, San Diego, Morgan Kaufmann, 1994, 362 p.

ИНФОРМАЦИЯ

### Продолжается подписка на журнал "Программная инженерия" на первое полугодие 2022 г.

Оформить подписку можно через подписные агентства  
или непосредственно в редакции журнала.  
Подписной индекс по Объединенному каталогу

"Пресса России" — 22765

Сообщаем, что с 2020 г. возможна подписка  
на электронную версию нашего журнала через:

ООО "ИВИС": тел. (495) 777-65-57, 777-65-58; e-mail: [sales@ivis.ru](mailto:sales@ivis.ru),  
ООО "УП Урал-Пресс". Для оформления подписки (индекс 013312)  
следует обратиться в филиал по месту жительства — <http://ural.press.ru>

Адрес редакции: 107076, Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23, стр. 2, оф. 45

Издательство "Новые технологии",  
редакция журнала "Программная инженерия"  
Тел.: +7 (499) 270-16-52, E-mail: [prin@novtex.ru](mailto:prin@novtex.ru)

---

---

# Указатель статей, опубликованных в журнале "Программная инженерия" в 2021 г.

<b>Khleborodov D. S.</b> High-Granular Micro-Segmentation in Campus Networks based on Downloadable Access Control Lists . . .	№ 9
<b>Shachnev D. A.</b> Searching for Activity Results and Experts in a Given Subject Area, Taking Results Significance into Account . . .	№ 5
<b>Авдеев Н. А., Бибило П. Н.</b> Автоматизированное проектирование цифровых операционных устройств с пониженным энергопотреблением . . . . .	№ 2
<b>Акопов А. С., Хачатрян Н. К.</b> Имитационная модель нефтеперерабатывающего предприятия со сложной схемой взаимодействия оборудования . . . . .	№ 6
<b>Алиев Ф. К., Корольков А. В., Матвеев Е. А., Шеремет И. А.</b> О чувствительности гаммы квантовой криптографической системы АКМ2017 к изменениям сеансового ключа . . . . .	№ 4
<b>Астапов Н. С.</b> Алгоритмы разложения на множители полиномов невысоких степеней . . . . .	№ 4
<b>Бессонов О. А., Харченко Н. А.</b> Программная платформа для суперкомпьютерного моделирования задач аэротермодинамики . . . . .	№ 6
<b>Букашкин С. А., Черепнёв М. А.</b> Квантовый компьютер и постквантовая криптография . . . . .	№ 4
<b>Булгаков Д. Ю.</b> Использование распределенных облачных вычислений при решении ресурсоемких задач, активно использующих CPU . . . . .	№ 5
<b>Галатенко В. А., Костюхин К. А., Левченкова Г. Л.</b> Целостность как аспект информационной безопасности: обзор современных подходов . . . . .	№ 8
<b>Галатенко В. А., Костюхин К. А.</b> Посмертный анализ и его особенности при разработке приложений в среде ОСРВ Багет . . . . .	№ 5
<b>Галатенко А. В., Кузовихина В. А.</b> Об одной модели безопасного функционирования компьютерных систем . . . . .	№ 3
<b>Грибова В. В., Москаленко Ф. М., Тимченко В. А., Шалфеева Е. А.</b> Разработка решателей задач на основе управляющих графов для систем с базами знаний . . . . .	№ 3
<b>Долинина О. Н., Кушников В. А.</b> Методы и технологии обеспечения качества интеллектуальных систем принятия решения . . . . .	№ 4
<b>Иванова К. Ф.</b> Фрактальный анализ интервальных рядов простых чисел . . . . .	№ 8
<b>Качанова О. А., Левоневский Д. К.</b> Архитектура программного обеспечения автоматизированного тепличного комплекса на основе облачных технологий . . . . .	№ 9
<b>Кобзаренко Д. Н., Савзиханова С. Э., Шихсаидов Б. И.</b> Средства автоматизации контроля корректности типовых разделов документа преподавателя вуза . . . . .	№ 5
<b>Кодубец А. А., Артемьева И. Л.</b> Обзор исследований в области инженерии требований для программных систем . . . . .	№ 7
<b>Кустенко К. И.</b> Инварианты ядра фундаментальной модели интеллектуальной системы . . . . .	№ 3
<b>Курганов Е. А.</b> Об аппаратной реализации сбалансированных S-блоков . . . . .	№ 1
<b>Лунев К. В.</b> Алгоритм автоматизированной генерации обучающей выборки для решения задачи выявления семантической близости между парой ключевых слов методами машинного обучения . . . . .	№ 6
<b>Лущик В. Г., Макарова М. С., Решмин А. И.</b> Применение трехпараметрической дифференциальной модели турбулентности для решения задач течения и теплообмена в каналах переменного сечения. Часть 1 . . . . .	№ 1
<b>Лущик В. Г., Макарова М. С., Решмин А. И.</b> Применение трехпараметрической дифференциальной модели турбулентности для решения задач течения и теплообмена в каналах переменного сечения. Часть 2 . . . . .	№ 2
<b>Махортов С. Д.</b> О разрешимости и числе решений производственно-логических уравнений в нечеткой LP-структуре . . . . .	№ 1
<b>Морозов А. Ю.</b> Параллельный алгоритм адаптивной интерполяции на основе разреженных сеток для моделирования динамических систем с интервальными параметрами . . . . .	№ 8
<b>Николаев П. М.</b> Повышение эффективности расчета B-сплайнов в задачах параллельного программирования . . . . .	№ 5
<b>Орлова Е. В.</b> Предиктивная аналитика кредитных рисков на основе данных цифровых следов заемщиков и методов статистического машинного обучения . . . . .	№ 7
<b>Орлов Д. А., Карелова Р. А.</b> Архитектура связанных JavaScript-микрокомпонентов для крупных веб-проектов. . . . .	№ 2
<b>Паринов С. И.</b> Тематическое моделирование контекстов цитирований из научных публикаций: структура научного потребления автора . . . . .	№ 3
<b>Пашенко Д. С.</b> Российский опыт организации полностью удаленной разработки программного обеспечения: отраслевое исследование 2021 г. . . . .	№ 6
<b>Персова М. Г., Соловейчик Ю. Г., Гриф А. М.</b> Балансировка потоков на неконформных конечноэлементных сетках при моделировании многофазной фильтрации . . . . .	№ 9

<b>Петрова Н. К., Мухачев А. П., Загидуллин А. А., Куценко С. М.</b> Реализация электронного курса по программированию на языке Python для платформы Android	№ 4
<b>Попов С. Е., Замараев Р. Ю., Юкина Н. И., Гиниятуллина О. Л., Миков Л. С., Харлампенков И. Е., Счастливцев Е. Л.</b> Программный комплекс для расчета деформаций земной поверхности с использованием спутниковых радарных данных	№ 5
<b>Прокопьев А. П., Набижанов Ж. И., Иванчура В. И., Емельянов Р. Т.</b> К вопросу создания системы непрерывного контроля уплотнения дорожных материалов для асфальтоукладчиков	№ 8
<b>Рухович Д. Д.</b> Итеративный метод обнаружения объектов	№ 1
<b>Рухович Д. Д.</b> Проекция изображений в пространство для монокулярной или мультиракурсной трехмерной детекции объектов различных категорий	№ 9
<b>Рухович Д. Д.</b> Проекция изображений в пространство для монокулярной и мультиракурсной трехмерной детекции объектов в уличных сценах	№ 7
<b>Тимофеев Е. Г., Жуков И. А., Теплякова А. В.</b> Комплекс программ для автоматизированного расчета геометрии ударных узлов машин	№ 8
<b>Титова А. А., Роганов В. А., Лукьянченко Г. А., Елизаров С. Г.</b> Повышение эффективности транзакций в блокчейн-сетях, использующих алгоритм Cryptonight в качестве Proof of Work на базе специализированного многоядерного процессора MALT	№ 6
<b>Торгашев М. А., Страшнов Е. В.</b> Определение коллизий аппроксимирующих цилиндров в системах виртуального окружения	№ 7
<b>Трунин П. А., Прохоренко Л. С., Мищенко Д. С., Климов Д. Д.</b> Разработка протоколонеинтерактивной модульной архитектуры для обработки данных от трехкомпонентного датчика измерения силы	№ 1
<b>Туровский Я. А., Борзунов С. В., Вахтин А. А.</b> Алгоритм оценки результатов статистического анализа данных биомедицинской природы в условиях эффекта множественных сравнений	№ 9
<b>Туровский Я. А., Борзунов С. В., Вахтин А. А.</b> Повышение частотного разрешения в задачах исследования ЭЭГ на основе ковариационного анализа	№ 6
<b>Указатель статей</b> , опубликованных в журнале "Программная инженерия" в 2020 г.	№ 1
<b>Указатель статей</b> , опубликованных в журнале "Программная инженерия" в 2021 г.	№ 9
<b>Харлампенков И. Е., Ощепков А. Ю.</b> Преобразование и отображение расчетных данных оптико-электронных данных дистанционного зондирования Земли на основе расширений GeoServer и распределенных технологий хранения	№ 2
<b>Читалов Д. И.</b> О разработке модуля для модификации расчетных сеток посредством утилиты dsmcInitialise программной среды OpenFOAM	№ 4
<b>Шампаров В. Е., Маркин А. Л.</b> Механизм оптимизации Structure Splitting в составе компилятора для микропроцессоров Эльбрус	№ 2
<b>Шевелев С. С.</b> Устройство выполнения логических и арифметических операций	№ 7
<b>Шелехов В. И.</b> Методы трансформации и дедуктивной верификации программы инвертирования списков	№ 3
<b>Шундеев А. С., Заславский Д. Д., Пехтерев С. И.</b> Уменьшение размерности векторного представления документов с помощью метода главных компонент	№ 1
<b>Шундеев А. С.</b> Создание адаптивного учебного курса по математическим основам машинного обучения	№ 8

---

---

**Международная научная конференция**  
**ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ (ПаВТ) 2022**  
**29—31 марта 2022 г., Дубна, Объединенный институт ядерных исследований**

**"Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ) 2022"** — международная научная конференция, шестнадцатая в серии ежегодных конференций, посвященных развитию и применению параллельных вычислительных технологий и машинного обучения в различных областях науки и техники.

**Главная цель конференции** — предоставить возможность для представления и обсуждения результатов, полученных ведущими научными группами в использовании суперкомпьютерных и нейросетевых технологий для решения практических задач.

**Организаторы конференции:**

- Министерство науки и высшего образования РФ
- Суперкомпьютерный консорциум университетов России

**Тематика конференции охватывает следующие основные направления (но не ограничивается ими)**

- Технологии параллельных и распределенных вычислений
- Облачные вычисления
- Перспективные многопроцессорные архитектуры
- Параллельные и распределенные системы баз данных
- Искусственные нейронные сети и глубокое обучение
- Управление, администрирование, мониторинг и тестирование многопроцессорных систем
- Вычислительная математика
- Вычислительная физика
- Вычислительная химия
- Гидро-газодинамика и теплообмен
- Высоконелинейные и быстротекущие процессы в задачах механики
- Биоинформатика и медицина
- Нанотехнологии
- Геоинформатика
- Криптография
- Обработка изображений и визуализация
- Компьютерная алгебра
- Суперкомпьютерные НОЦ

В первый день работы конференции будет объявлена **36-я редакция списка Top50** самых мощных компьютеров СНГ.

Во все дни работы конференции будет действовать **суперкомпьютерная выставка**, на которой ведущие производители аппаратного и программного обеспечения представят свои новейшие разработки в области высокопроизводительных вычислений.

**Языки конференции:** русский, английский.

**Официальный сайт конференции:** <http://agora.guru.ru/pavt2022/>

---

---

**ООО "Издательство "Новые технологии".** 107076, Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23, стр. 2  
Технический редактор *Е. М. Патрушева*. Корректор *Е. В. Комиссарова*

---

Сдано в набор 18.10.2021 г. Подписано в печать 24.11.2021 г. Формат 60×88 1/8. Заказ Р1921  
Цена свободная.

---

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".  
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: [www.aov.ru](http://www.aov.ru)

Рисунок к статье М. Г. Персовой, Ю. Г. Соловейчика, А. М. Грифа  
«БАЛАНСИРОВКА ПОТОКОВ НА НЕКОНФОРМНЫХ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНЫХ  
СЕТКАХ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ МНОГОФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ»

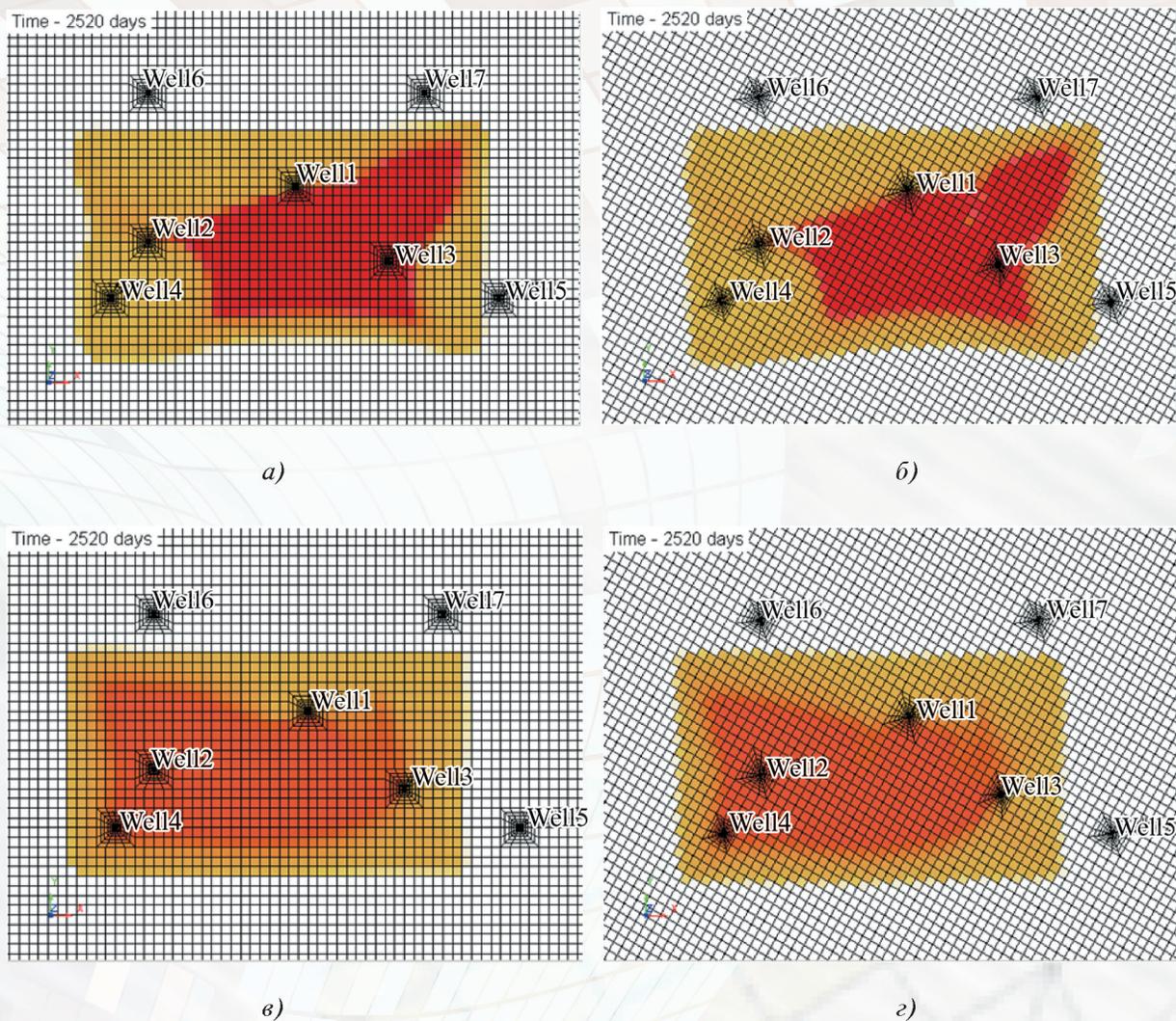


Рис. 8. Распределение нефтенасыщенности на 2520-е сутки в верхнем (а, б) и нижнем (в, з) слоях при расчете на сетках  $H/2$  (а, в) и  $H/2_{Rot,NC}$  (б, з)

Рисунки к статье Д. Д. Руховича  
«ПРОЕКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ПРОСТРАНСТВО  
ДЛЯ МОНОКУЛЯРНОЙ ИЛИ МУЛЬТИРАКУРСНОЙ  
ТРЕХМЕРНОЙ ДЕТЕКЦИИ ОБЪЕКТОВ РАЗЛИЧНЫХ КАТЕГОРИЙ»

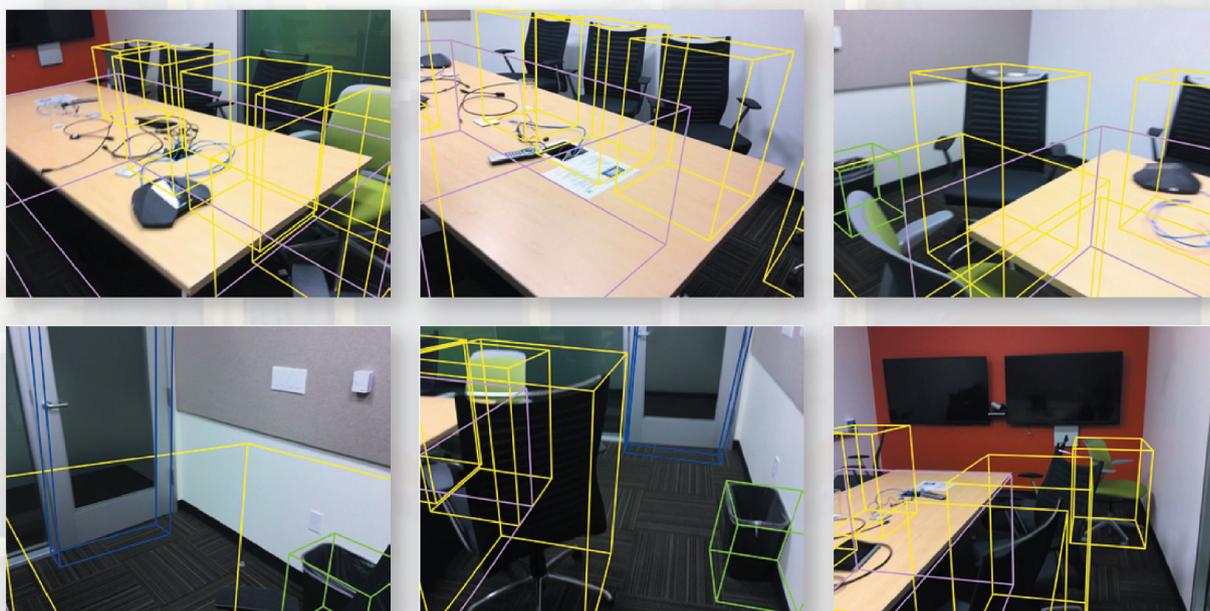


Рис. 2. Объекты, обнаруженные с помощью предложенного метода в сцене № 0575 из валидационной части набора данных ScanNet

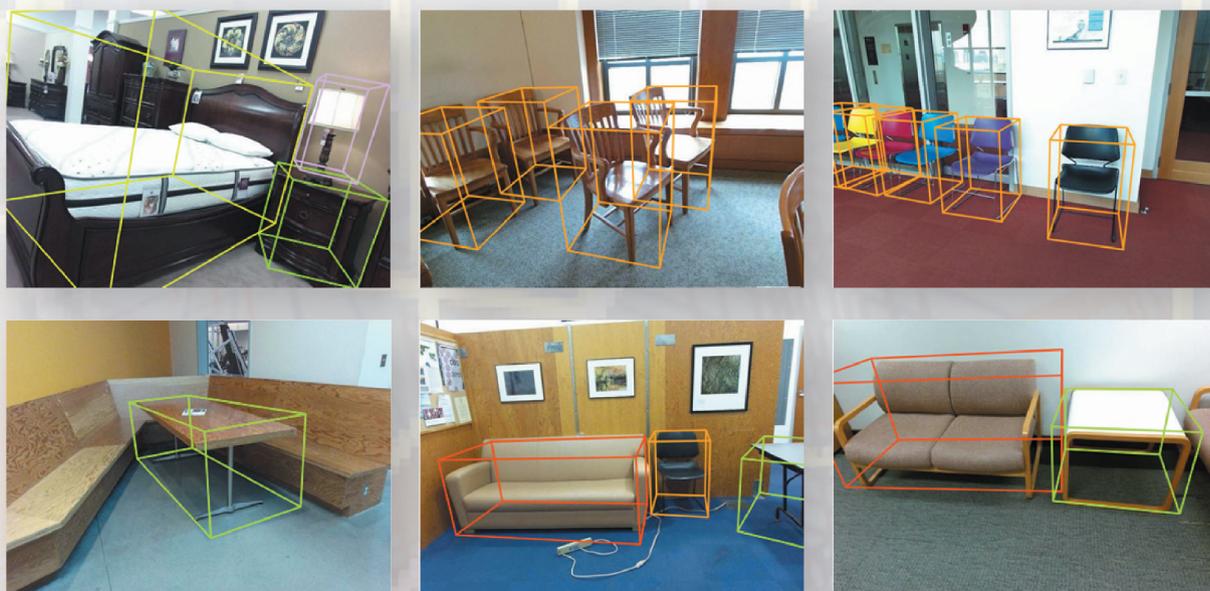


Рис. 3. Объекты, обнаруженные с помощью предложенного метода на монокулярных изображениях из валидационной части набора данных SUN RGB-D