

# СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Том 36, номер 4, 2022

---

---

К авторам и читателям журнала “Сенсорные системы” 289

---

## Обзор

Вклад Л.Н. Могилева в исследования механизмов пространственного зрения  
(к 100-летию со дня рождения)

*П. П. Николаев, Г. И. Рожкова, М. А. Грачева*

291

---

## Зрительная система

Обработка и запоминание невербального бессмысленного материала  
при ограничении времени экспозиции

*Л. В. Черемошкина*

322

---

## Слуховая система

Перспектива использования метода регистрации различных классов  
отоакустической эмиссии для динамической оценки состояния  
внутричерепного давления

*О. Б. Пасекова, Е. Э. Сигалева, Л. Ю. Марченко, К. П. Иванов,  
Э. И. Мацнев, О. И. Орлов*

338

---

## Техническое зрение

Модифицирование метода поиска и дескрибирования устойчивых  
точек SIFT для сопоставления оптических и радиолокационных  
изображений

*В. В. Волков*

349

---

Правила для авторов журнала “Сенсорные системы”

366

---

---

# Contents

---

---

Vol. 36, No. 4, 2022

---

---

To authors and readers of the journal 289

---

## Review

L. N. Mogilev's contribution to the research of the spatial vision mechanisms  
(to the 100th L. N. Mogilev's anniversary)  
*P. P. Nikolaev, G. I. Rozhkova, M. A. Gracheva* 291

---

## Vizual system

Processing and memorizing non-verbal non-meaning material  
when the exposure time is limited  
*L. V. Cheremoshkina* 322

---

## Auditory system

Otoacoustic emission testing in 21-day dry immersion as prospects  
for intracranial pressure monitoring  
*O. B. Pasekova, E. E. Sigaleva, L. Yu. Marchenko, K. P. Ivanov,  
E. I. Matsnev, O. I. Orlov* 338

---

## Technical sensory systems

Modification of the method of detecting and describing keypoints SIFT  
for optical-to-SAR image registration  
*V. V. Volkov* 349

---

Instructions for authors 366

---

---

## К АВТОРАМ И ЧИТАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА “СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ”

DOI: 10.31857/S0235009222040035

Наш журнал “Сенсорные системы” был основан в 1987 г., и на протяжении 35 лет бессменным главным редактором журнала был академик Михаил Аркадьевич Островский. В мае 2022 г. ввиду достижения Михаилом Аркадьевичем предельного для этой должности возраста, Отделением физиологии РАН было принято решение о назначении нового главного редактора журнала.

За 35-летний период работы Михаила Аркадьевича в должности главного редактора, журнал “Сенсорные системы” постоянно развивался. На сегодняшний день журнал входит в список лучших российских научных журналов, индексируется в базе данных Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of science, в базах данных РИНЦ, Biosis и Zoological records.

Несколько лет назад был создан двуязычный сайт журнала [sensorysystems.ru](http://sensorysystems.ru), содержащий подробную информацию о редакции, правилах журнала, а также большой архив метаданных статей как на русском, так и на английском языках, и редакция ведет постоянную работу по пополнению архива.

Развитие журнала не стоит на месте, и редакция следит за современными тенденциями научных публикаций, сотрудники посещают обучающие семинары от компаний Elibrary, Антиплагиат, Thomson Reuters и Scopus. Журнал ввел в правила все современные требования международных баз данных, касающиеся структуры метаданных публикаций, списков литературы, обязательных разделов публикаций и многие другие.

Последние годы журнал активно сотрудничает с порталом [elibrary.ru](http://elibrary.ru), на котором в режиме открытого доступа представлен полнотекстовый архив всех доступных номеров. Также, благодаря сотрудничеству с [elibrary.ru](http://elibrary.ru), редакция имеет расширенный доступ к системе проверки заимствований для проверки научной оригинальности публикаций и исключения недобросовестного заимствования.

Помимо изменений издательских требований, за период существования журнала менялась и сама структура научных областей, что также не может не влиять на материалы журнала. В связи с расширением и развитием тематических областей науки, относящихся к теме публикаций “Сенсорных систем”, в журнале были введены дополнительные тематические рубрикаторы, такие как “Техническое зрение”, “Моделирование сенсорных систем” и другие.

По инициативе Михаила Аркадьевича был заключен договор с журналом “Neuroscience and Behavioral Physiology”, индексируемом в базе Scopus, о публикации переводных версий избранных статей нашего журнала.

В нашем журнале стало возможным публиковать внутритекстовые цветные иллюстрации, что, безусловно, существенно расширяет и улучшает качество публикаций, и помогает читателям быстрее вникнуть в суть материала.

Под руководством Михаила Аркадьевича журнал постоянно менялся к лучшему, следуя современным тенденциям развития научной публицистики, и в то же время сохранил свои ключевые особенности и свою индивидуальность, учитывая пожелания читателей и авторов.

Члены редколлегии, редсовета и редакции выражают огромную благодарность Михаилу Аркадьевичу за его многолетнее руководство и выражают надежду и уверенность в том, что Михаил Аркадьевич продолжит работу в редколлегии нашего журнала.

Новым главным редактором нашего журнала избран выдающийся специалист в области физиологии и биофизики зрения Михаил Леонидович Фирсов.

Михаил Леонидович – член-корреспондент РАН, доктор биологических наук, директор Института эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН, член Отделения физиологических наук РАН, Отделения физиологии.

Михаил Леонидович является заместителем главного редактора и членом редколлегии нескольких академических научных изданий, много лет был членом редакционного совета нашего журнала, и поэтому хорошо представляет себе объем и сложность задач, стоящих перед главным редактором периодического научного издания в современных условиях.

Редколлегия и редакция приветствуют нового главного редактора с уверенностью, что журнал “Сенсорные системы” и дальше будет одним из лучших российских изданий в области сенсорной физиологии.

Редколлегия журнала “Сенсорные системы”

УДК 159.937.522.4 + 612.843

## ВКЛАД Л.Н. МОГИЛЕВА В ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗРЕНИЯ (к 100-летию со дня рождения)

© 2022 г. П. П. Николаев<sup>1,\*</sup>, Г. И. Рожкова<sup>1</sup>, М. А. Грачева<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН  
127051 Москва, Большой Каретный переулок, д. 19, стр. 1, Россия

\*E-mail: nikol@iitp.ru

Поступила в редакцию 05.07.2022 г.

После доработки 28.07.2022 г.

Принята к публикации 04.08.2022 г.

В 60-х гг. прошлого века в Иркутском государственном университете Л.Н. Могилевым была развернута многоплановая масштабная работа по исследованию механизмов пространственного зрения, которая соответствовала последним достижениям и тенденциям тогдашней науки о зрении как по методическому уровню, так и по выбору теоретических и экспериментальных задач. К сожалению, эта работа велась в значительной степени обособленно и была слабо представлена на международных конференциях, вследствие чего многие важные результаты указанных исследований и даже монография Л.Н. Могилева “Механизмы пространственного зрения” (1982 г.) остались неизвестными большинству членов научного сообщества, занимающихся разработкой методов изучения и теорий зрительного пространственного восприятия, и не были включены даже в достаточно детальные и полные зарубежные обзорные издания. Возможно, это связано также с тем, что и сам Л.Н. Могилев в своих публикациях уделял недостаточно внимания работам своих иностранных предшественников и коллег, проводивших похожие исследования одновременно с ним. В связи с юбилейной датой – 100-летием со дня рождения Л.Н. Могилева – представляется важным и полезным напомнить о наиболее интересных работах этого замечательного ученого и проанализировать их в контексте аналогичных более ранних и параллельных исследований. В настоящей статье сделана попытка обсудить работы Л.Н. Могилева в области пространственного зрения, выделив направления исследований, наиболее близко пересекающиеся с исследованиями и публикациями зарубежных авторов, получивших широкую известность и признание.

**Ключевые слова:** предшественники Л.Н. Могилева, механизмы пространственного зрения, стереокинетический эффект, автостереограмма, бинаример

**DOI:** 10.31857/S0235009222040047

### ВВЕДЕНИЕ

В этом году исполнилось 100 лет со дня рождения профессора Льва Николаевича Могилева – крупного ученого, создателя своей научной школы и оригинального научного направления в области физиологии пространственного зрения. Л.Н. Могилев внес заметный вклад в исследования физиологии зрения, предложил новые методы выявления особенностей и оценки взаимоотношений различных механизмов в процессе пространственного восприятия. Наиболее значимые результаты собственной научной деятельности в данной области были подытожены им в единственной монографии “Механизмы пространственного зрения”, опубликованной сорок лет назад (Могилев, 1982). Эта монография написана весьма лаконично, в реферативно-протокольном стиле, и не дает полного представления об отли-

чительных особенностях работ Л.Н. Могилева в ряду аналогичных исследований и об их теоретической и практической ценности. К сожалению, автор монографии ушел из жизни вскоре после публикации книги. В издательстве “Наука” она была издана небольшим тиражом и не переводилась на иностранные языки, вследствие чего главный труд Л.Н. Могилева остался неизвестным многим отечественным и большинству зарубежных специалистов. Это же относится и к научным сообщениям Л.Н. Могилева, которые часто публиковались в местных изданиях и только на русском языке.

В связи с нарастающим интересом к истории развития фундаментальных исследований пространственного зрения и появлением за последнее время основательных обобщающих монографий стало очевидно, что работы Л.Н. Могилева

заслуживают специального обсуждения. К сожалению, даже в почти всеохватывающем обзорном трехтомнике Говарда и Роджерса “Perceiving in depth” (Howard, Rogers, 2012; Howard, 2012a, b), объемом около 1700 страниц и с библиографическим списком, включающим более 10000 источников, не упомянуто ни одной публикации Л.Н. Могилева, что представляется несправедливым.

В данной статье мы остановимся на трех направлениях исследований Л.Н. Могилева: разработке методов изучения функциональной организации системы пространственного зрения, основанных на стерео-кинетическом эффекте (Могилев, 1976) и применимых даже в экспериментах на животных; создании дискретных автостереограмм, переоткрытых Могилевым в начале 60-х гг. XX в., и описании пространственных эффектов, возникающих при их наблюдении в условиях физиологического двоения; изобретении бинариметра — прибора для количественной оценки характеристик пространственного восприятия в условиях физиологического двоения (Могилев, 1978a).

Для лучшего понимания подхода Л.Н. Могилева к изучению пространственного зрения и для адекватной интерпретации терминологии, использованной в его работах, необходимо учитывать специфику его биографии, негативное влияние периода “холодной войны” на обмен научной информацией и практическую невозможность полноценного обсуждения актуальных научных проблем с зарубежными коллегами в условиях его научной деятельности.

Л.Н. Могилев родился 14 ноября 1922 г. в г. Иркутске. В 1939 г. он поступил на биологический факультет Иркутского государственного университета (ИГУ), однако в период с 1941 по 1945 г. в его учебе был перерыв из-за мобилизации в армию и участия в военных действиях. Вернувшись в университет в 1946 г., он закончил его в 1949 г. и был оставлен работать на кафедре зоологии беспозвоночных, являющейся одной из ведущих и самых привлекательных кафедр биологического факультета ИГУ. Популярность этой кафедры связана с возможностью исследовать уникальную фауну озера Байкал, вблизи которого расположен город Иркутск. В 1956 г. Л.Н. Могилев защитил кандидатскую диссертацию на тему “О суточных вертикальных миграциях массовых форм байкальского зоопланктона”. Позднее он был преподавателем и доцентом (с 1961 г.) кафедры физиологии и микробиологии ИГУ, а затем сменил тематику и основал кафедру физиологии человека и животных, которой заведовал с 1969 по 1985 г. Его докторская диссертация, защищенная в 1979 г., суммировала результаты исследований по новой тематике, остававшейся для него главной до самого последнего времени: “Про-

странственные зрительные эффекты, как показатели функциональной организации зрительных центров”.

Основные идеи и положения этой диссертации вошли в монографию “Механизмы пространственного зрения” (Могилев, 1982), которая содержит наиболее полное прижизненное описание достижений автора в данной области и использована нами как главный источник информации для настоящей статьи. К сожалению, язык указанной монографии, как и других публикаций автора, весьма специфичен, точнее сказать — эклектичен. Заинтересовавшись проблемами пространственного зрения уже в зрелом возрасте и работая вне связи с определенной научной школой, автор вперемешку использует и общепринятые, и изобретенные им термины, что затрудняет восприятие материала и формирование целостного представления о предмете обсуждения в строгих рамках одной научной дисциплины. (Некоторые места текста напоминают ситуацию, когда при описании движения планет используются одновременно представления и Птоломея, и Коперника). Чтобы сделать суть работ Л.Н. Могилева более доступной молодым исследователям, мы старались избегать устаревших и “самобытных” терминов, заменяя их более современными и общепринятыми.

В интернете упоминается, что Л.Н. Могилев является автором примерно ста двадцати научных трудов, но мы не имели возможности даже отыскать многие из них и ограничились своим обсуждением его научных достижений только интересующей нас областью пространственного зрения. В то же время нельзя не упомянуть и иные, лишь косвенно связанные с наукой направления деятельности этого разносторонне талантливого человека, который занимался также живописью и литературным творчеством. Это тем более уместно, что и его зарубежные предшественники (например, по исследованию стереокинетического эффекта) также были людьми, талантливыми и в науке, и в искусстве, и более известны не среди специалистов по пространственному зрению.

Л.Н. Могилев был писателем-фантастом, поэтом и художником. Он написал несколько научно-фантастических повестей, публиковавшихся как местными, так и центральными издательствами. Самой известной из них является повесть “Железный человек”, название которой было использовано для книги, включающей несколько его произведений. Будучи тонким и наблюдательным художником, живущим вблизи озера Байкал, Л.Н. Могилев часто вдохновлялся красотами озера и его побережья. Репродукция одной из его живописных картин с изображением Байкала использована для оформления сайта Восточно-Си-

бирского центра медико-биологической информации.

Цель настоящей статьи – дать информацию о работах предшественников и современников Л.Н. Могилева по направлениям его исследований в области пространственного зрения; подчеркнуть вклад Л.Н. Могилева, специфику его взглядов и интересов; кратко обсудить значение полученных им результатов для дальнейшего экспериментального исследования механизмов зрительного пространственного восприятия и практической (оптометрической и клинической) работы.

### ГЛАВНЫЕ ИТОГИ ИССЛЕДОВАНИЙ Л.Н. МОГИЛЕВЫМ МЕХАНИЗМОВ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ВОСПРИЯТИЯ ПО МНЕНИЮ САМОГО АВТОРА

Прежде чем перейти к более подробному ретроспективному рассмотрению конкретных исследований Л.Н. Могилева, целесообразно привести его собственную оценку итогов многолетней и многоплановой работы, проводимой им совместно со своими учениками на кафедре физиологии человека и животных ИГУ. Эту оценку можно взять за основу, внося лишь поправки, которые требуют необходимость согласования мнений Могилева с данными других авторов, появившимися позднее.

Характеризуя в автореферате своей докторской диссертации новизну результатов, полученных в ходе проделанной работы, Могилев привел следующий список (Могилев, 1979, с. 4–5), который мы цитируем ниже с краткими комментариями.

1) “На основе исследований на людях и животных сформулировано положение о существовании двух самостоятельных механизмов пространственного восприятия – стереокинетического и бинокулярного, из которых первый является эволюционно более древним, исходным”.

– Четкая формулировка положения о существовании двух самостоятельных механизмов пространственного зрения звучала актуально для того времени, так как многие теоретики пытались искать единый механизм, ответственный за все феномены зрительного пространственного восприятия. Современная точка зрения отличается от взглядов Л.Н. Могилева тем, что признается существование не двух, а большего числа автономных механизмов, вносящих вклад в формирование пространственной видимой картины.

2) “Показано, что в природных условиях эти два механизма не противопоставлены один другому и деятельность их направлена на решение общей функциональной задачи: обеспечения объективной пространственной информацией.”

– Для большинства естественных ситуаций это справедливо. Однако есть немало исключений, соответствующих условиям, когда один из механизмов может работать адекватно, а второй выдает неправильное решение из-за того, что какие-то параметры выходят за пределы диапазона его нормальной работы. В таких естественных ситуациях, как и в создаваемых искусственно, тоже можно говорить о “противопоставлении”, “борьбе”, конкуренции механизмов.

3) “Показано, что функциональное соотношение этих механизмов у различных животных неодинаково, что зависит как от уровня их организации, так и от экологических особенностей, характеризующих тот или иной вид.”

– Это было скорее логичное предположение, чем результат, поскольку исследованных животных было мало, а даже в пределах одного вида вариабельность результатов, полученных на разных особях, обычно весьма велика.

4) “Установлено, что в условиях эксперимента при моделировании относительного смещения элементов сетчаточной проекции при помощи специальных тестов эти механизмы могут быть в разной степени противопоставлены друг другу, что характеризуется качественной и количественной стороной возникающего пространственного эффекта. Показано, что силовые взаимоотношения механизмов пространственного зрения могут служить хорошей характеристикой функциональной организации зрительных центров.”

– Первая часть утверждения не вызывает сомнений, а для подтверждения второй было получено слишком мало данных.

5) “Установлено, что при центральных повреждениях зрительной системы (поля зрительной коры) деятельность стереокинетического и бинокулярного механизмов нарушается в разной степени, что резко изменяет их силовые взаимоотношения. Первый из механизмов в меньшей степени уязвим. Поэтому взаимоотношения этих механизмов характеризуют функциональную организацию не только в норме, но и при патологии”.

– Это принципиально важные общие положения, которые подразумевают разную локализацию рассматриваемых механизмов в зрительных отделах мозга. Однако для составления конкретных схем нужен очень обширный фактический материал: к настоящему времени обнаружены десятки зрительных зон как в коре мозга, так и в других его отделах.

6) “Охарактеризованы основные параметры совместности двойных изображений как условия бинокулярного синтеза при пространственном зрении. Использованы пространственные зрительные эффекты, возникающие при слиянии

двойных изображений, как показатели различных видов совместимости.”

– *Кратко прокомментировать данный пункт затруднительно, так как ясно, что параметры образов, формирующихся в экспериментально создаваемых условиях физиологического двоения при искусственном рассогласовании аккомодации и конвергенции (ведущем к снижению качества сетчаточных изображений из-за расфокусировки и к осложнению в работе интерпретационных механизмов), не могут не отличаться от образов, формирующихся в естественных условиях наблюдения соответствующих реальных объектов при согласованной работе всех зрительных механизмов, отлаженных для привычного повседневного функционирования.*

7) Показано, что стереокинетический и бинокулярный механизмы являются рабочими инструментами функциональной системы пространственного зрения, деятельность которых направлена на получение перцептивного результата – пространственного ощущения.

– *По этому поводу разногласий между предшественниками не было. Что же касается последующих изменений, то в настоящее время стереокинетический механизм рассматривают как один из трех различающихся между собой механизмов оценки формы и глубины, функционирование которых основано на анализе различных следствий различных видов движения. Термин “стереокинетический механизм” оставлен для частного случая вращательного движения.*

Более глубокие комментарии по каждому пункту потребовали бы привлечения слишком большого количества материала других авторов и цитирования многих источников, что не соответствует задачам данной журнальной статьи. Несколько более подробный анализ проведен далее лишь в отношении работ по тем направлениям исследований Л.Н. Могилева, которые относятся к психофизиологии пространственного зрения и оказались наиболее продвинутыми.

#### ПРОБЛЕМАТИКА ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗРЕНИЯ В ПЕРИОД РАБОТЫ Л.Н. МОГИЛЕВА

Период работы Л.Н. Могилева и его коллег по изучению механизмов пространственного зрения пришелся на эпоху исследовательского и концептуального штурма проблем “целостного зрительного восприятия”. Список этих проблем и предлагавшихся для их разрешения теорий, моделей и парадигм обширен, разнороден по степени научной достоверности и до сих пор оставляет непреодоленной брешь даже в терминологическом аспекте (языке и дефинициях базовых положений), не позволяющую и доныне проводить однозначно содержательные параллели между данными

дисциплин “психофизиология” и “техническое зрение”, а в рамках психологического подхода – четко разделить конструктивную суть методик психофизики и теоретически рассогласованного набора гипотез о “когнитивных механизмах зрительного процесса”. Для внятного изложения смены (либо существенной модификации) представлений, относящихся к научной деятельности Л.Н. Могилева по исследованию пространственного зрения, необходимо выборочно коснуться некоторых принципиальных моментов истории “вопроса о зрительном восприятии” и краткой систематики его современных трактовок и “устоявшегося аксиоматического фундамента”.

К числу достижений, оказавшихся весьма плодотворными для понимания проблем зрительного пространственного восприятия, следует отнести язык и список инвариантов *проективной геометрии*, аксиоматически построенной Ю. Плюккером, который ввел аналитику координатных описаний точек и линий в пространстве, уточнив не только известные по трудам Да Винчи законы линейной перспективы, но и добавив *количественную меру для строгой оценки “проективных искажений”*, вносимых оптикой зрительного органа (либо – камеры в системах технического зрения).

Для психофизиологов анализ многих сложных зрительных феноменов был существенно облегчен введением функционально удобного членения уровней восприятия на сенсорный, перцептивный и когнитивный. В частности, такое членение продуктивно при рассмотрении “познавательной роли” зрительных иллюзий, к числу которых относятся и феномены, изучавшиеся Л.Н. Могилевым.

Попытки решения *обратных* задач пространственного зрения наталкиваются на серьезнейшие трудности, присущие любому варианту информационной “телесной” реконструкции (интегральной либо фрагментарно частной) наблюдаемого мира. Важнейшая *геометрическая* причина *проблем* “чувственной (зрительной) реконструкции мира” очевидна: оптика глаза с неизбежностью сводит описание видимого 3D мира к двумерной картине – сетчаточной его проекции, где не заданы ни “особенности формы неплоских тел”, ни параметры их удаленности от наблюдателя. От полной триады координат пространства проекционное вырождение вынуждает сенсор при “онлайн синтезе мира” обходиться входной информацией, лишенной координат *глубины*. На раннем этапе развития моделей в техническом зрении формальное построение возможных механизмов (алгоритмов преобразования зрительной информации) пространственной реконструкции наблюдаемого закономерно привело к “концепции подвижного сенсора”. Ряд под-

задач пространственного синтеза оказался аналитически разрешимым в результате допустимости смены сенсорных проекций во времени: набор “ракурсов” делал корректной постановку задач геометрического синтеза (в статике единственного ракурса для некоторых конкретных ситуаций монокулярно не обеспечивающего решения вообще). При этом генезис обстоятельств кинетики в цепи проекций безразличен к тому, движется ли наблюдатель относительно тела динамически реконструируемой формы либо само тело смещается относительно неподвижного сенсора.

На уровне теоретических модельных предложений (в поиске подходов к разрешению частных обратных подзадач зрения) оказалось продуктивным членение процедур стереосинтеза на режимы монокулярной динамики (учет смещений/изменений проекций во времени) и бинокулярной статики (оценка глубины по паре одномоментных проекций), уже хорошо известное (и в ряде случаев детально изученное) из почти вековой истории психологических исследований. Заявленная Д. Марром догма об эффективном *численном моделировании* всех без исключения процедур в зрении (Magr, 1982) дала на примерах алгоритмически годных *независимых* методов 3D синтеза в статике и динамике дополнительные подтверждения идее о необходимости *арсенала* перцептивных шаблонов для “бесперебойного продуцирования выходной когнитивной версии зримого в реально изменяющихся конкретных условиях наблюдения, присущих среде обитания зрящего”, феноменологически демонстрируемой всей совокупностью опытных данных, накопленных к тому времени усилиями психофизиологов.

Однако границы применимости “компьютерной метафоры” требуют уточнения. Алгоритмист математик может доказать теоремы о числе минимально необходимых ракурсов “твердого облака точек” (в задаче реконструкции его 3D формы — по входным координатам вершин для ряда плоских центральных проекций некоего подвижного многогранника) — на материале последовательности таковых, заодно и оценить вычислительную сложность требуемой процедуры геометрического синтеза. В случае же *экспериментальной* парадигмы ситуация иная: исследователю когнитивных механизмов монокулярного динамического 3D синтеза *бионический* подход, “обещающий” разгадать схему реализуемой обработки сигналов (в терминах нейрональных процессов и через морфологию нервных путей и связей в соответствующих зрительных зонах мозга), вряд ли поможет. Для “прояснения сути нервных процессов, обеспечивающих искомое решение динамической задачи”, потребуется кропотливое объемное накопление базы метрических данных, предоставляемых многими испытуемыми в рамках

различных *психофизических методик* исследования.

Могилевский подход к постановке психофизических экспериментов соответствует нарождавшейся в период его работы идее методически исключить как можно большее число альтернативных механизмов или противопоставить два механизма для изучения их кооперативно-конкурентных взаимоотношений при формировании видимого образа (или феномена). В большинстве своих экспериментов Могилев “сталкивал” *статические механизмы бинокулярного синтеза* и *стереокинетический механизм* — один из механизмов, основанных на относительных смещениях и изменениях сетчаточных проекций с одновременным чисто интерполяционным “дообраиванием всей невидимой поверхности” в акте динамического восприятия.

#### РАБОТЫ Л.Н. МОГИЛЕВА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ И ПРИМЕНЕНИЮ СТЕРЕОКИНЕТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

*Исследования стереокинетического эффекта  
в свете общих проблем пространственного зрения*

Изучавшийся Л.Н. Могилевым стереокинетический эффект (СКЭ) относится к числу зрительных иллюзий, которые не только завораживают своей силой и убедительностью, но и могут быть использованы как инструмент, позволяющий исследовать психофизиологические механизмы зрительного восприятия и структуру зрительной системы. В ходе многолетнего исследования СКЭ с начала 70-х годов до середины 80-х представления Могилева и его коллег о сути СКЭ и о взаимоотношениях различных механизмов пространственного восприятия претерпели радикальные изменения. В первых сообщениях о наблюдении СКЭ преобладало подчеркивание того, что этот эффект отражает существование механизма восприятия глубины, не имеющего отношения к бинокулярным механизмам, в основе которых лежит сопоставление проекций наблюдаемых объектов с двух разных точек зрения. К примеру, на V Всесоюзной конференции по нейрокибернетике доклад Могилева с коллегами назывался “Пространственный зрительный эффект, полученный от рисованных плоских подвижных изображений без использования стереопары”, и они писали:

“Мы предполагаем, что этот пространственный зрительный эффект не является результатом деятельности высших механизмов пространственного анализа, не связан непосредственно с опознаванием зрительного образа, с формированием представления об объекте. Он обусловлен “первичным” механизмом пространственного зрения”.

(Могилев и др., 1973, с. 207)

Последующие исследования СКЭ привели Л.Н. Могилева к пониманию того, что наблюдение этой иллюзии в различных условиях зрения и с использованием разных зрительных стимулов как раз очень информативно в плане изучения процесса формирования видимых образов.

Переходя к рассмотрению конкретных экспериментальных результатов, полученных Могилевым и его коллегами при исследовании СКЭ как такового и его применении для решения разных задач, остановимся на предыстории генераций феноменов СКЭ как однозначно детерминируемой *иллюзии восприятия трехмерности*, порождаемой в случаях монокулярного предъявления вращающихся плоских объектов, для которых последовательная смена проекций не противоречит *пространственной* их интерпретации — в согласии с гипотезой о возможно трехмерной природе тела вращения. Материал этих и уже после Могилева проводившихся экспериментов с динамической иллюзией СКЭ логично соответствует парадигме: если динамика предъявлений *плоского* объекта следует (с приемлемой погрешностью) формальной модели его *трехмерной* интерпретации, то такая модель “реально” проявится в восприятии, притом дополненная операциями интерполяции “непрерывной поверхности гипотетического тела” и зачастую не разрушаемая бинокулярными признаками, указывающими на *плоскую* форму объекта.

Вышесказанное отнюдь не исчерпывает списка проблем, до сих пор не имеющих решения на уровне универсальных достаточных концепций *константного зрения*: для пространственной стабильности когнитивно порождаемой картины наблюдаемого (т.е. для непрерывно поддерживаемой модели “диспозиции и формы объектов наблюдаемой сцены”) требуется обеспечение инвариантности ее 3D образа, не разрушаемого при постоянно идущей смене сетчаточных проекций в ходе вергентных движений глаз (инвариантность к смене направления оптических осей глаз), равно как и стабильности “модели интерьера”, инвариантной к происходящим сдвигам “эгоцентра визуализации” (при перемещениях головы наблюдателя — в его движениях по отношению к неподвижному интерьеру). Анализ проявлений второго типа константности целесообразен при обсуждении циклической смены пространственных решений, наблюдающейся и для плоских композиций в вариантах “куб Неккера” либо “лестница Шредера”, и при характерном эпизодическом “выворачивании формы” иллюзорных образов в процессе длительного наблюдения СКЭ, изучавшемся и описанном Л.Н. Могилевым в его монографии.

До детализации этих экспериментов уместен краткий комментарий логично объясняемым

причинам “интерпретационных метаморфоз кубов и лестниц”. В обсуждениях фигурируют две формальные разновидности оптической трансформации, переводящей трехмерную композицию ребер многогранника (в некоей условной сцене) в плоскую его проекцию, производимую сенсором. Геометрия графа ребер может соответствовать простейшей параллельной разновидности проецирования (реализуемой длиннофокусным объективом или телевиком). Незначительным усложнением схемы можно реализовать и вариант *центральной* проекции (он моделирует оптические свойства короткофокусной камеры). Привлечением этих нетождественных моделей проецирования удастся объяснить разницу иллюзорных интерпретаций (фигура либо стабильна в версии псевдо-реконструкции, либо циклически меняет воспринимаемый облик “виртуального тела”). Трактовка периодически возникающей нестабильности “иллюзорного 3D синтеза” тривиальна: *параллельная* проекция допускает два возможных варианта пространственной интерпретации формы графического объекта, и они возникают, сменяя друг друга по ходу попыток виртуальной экстраполяции. Центральная же проекция содержит вычислимые (в зрительном анализаторе — предположительно — оцениваемые) признаки *уникальной* версии пространственной реконструкции сенсорной плоской проекции “иллюзорного тела”, что и обеспечивает устойчивость произошедшей трехмерной его экстраполяции.

На примере “цилиндров Ульмана” (Ullman, 1979) обсуждаемое отличие типов реконструкции плоского поля стимулов удастся динамически воспроизвести на экране монитора. Если (для стробоскопического предъявления) программа симуляции сцены моделирует схему *параллельной* проекции кругового цилиндра, вращающегося вокруг неподвижной оси с постоянной угловой скоростью (в ситуации, когда ось ориентирована “поперек” направления наблюдения), притом “прозрачная” его поверхность визуально представлена исключительно набором случайным образом размещенных светящихся (на темном фоне) точек, то наблюдающий в динамике эту картину “видит” вращающийся цилиндр, но не может указать направление вращения (версии попеременно меняются, а происходит это потому, что наблюдатель не может уверенно оценить, какая из сторон цилиндра ближняя, а какая — дальняя). В случае реализации варианта *центральной* проекции динамического объекта наблюдатель стабильно и адекватно различает ближнюю и дальнюю стороны прозрачного стакана, безошибочно оценивая направление и скорость его вращения.

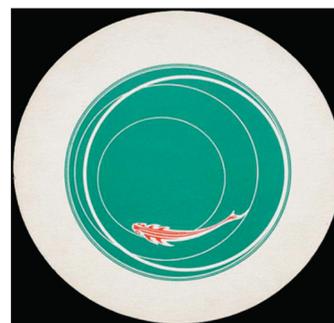
Возвращаясь к примерам четкого проявления пространственной константности *видимого поло-*

жения, присущей человеку в бинокулярном и монокулярном режимах тестирования, отметим, что прямоугольный параллелепипед ребер, где состыкованы потолок, стены и пол в пустой комнате, по которой перемещается наблюдатель, воспринимается им реально стабильно и адекватно, и ни одна из видимых трехгранных вершин интерьера никогда не меняет ориентационной версии, как это происходит с плоской моделью “куб Неккера”, где в статике воспринимается проекция того же самого прямоугольного параллелепипеда. В случае с реальной комнатой за жестко адекватное восприятие 3D формы помещения в гетерархии модулей реконструкции содружественно “голосуют” моно- и бинокулярные гештальты глубины, и их реакция поддерживается в том числе “тонкими проверками” в блоках соответствия *цветоконстантной* и пространственной моделей освещения и окраски, использующих ключевые признаки поведения бликов и авторефлексов (Николаев, 1987), тогда как для куба Неккера кластер модулей полем стимулов не активирован. Итог: *иллюзия-перевертыш*.

*Краткая история создания изображений для наблюдения СКЭ и его исследования до работ Л.Н. Могилева*

Среди предшественников Л.Н. Могилева в истории исследований СКЭ выделяются две крупные фигуры – французского и американского художника Марселя Дюшана (Henri Robert Marcel Duchamp: 1887–1968) и итальянского философа и психоаналитика-фрейдиста Чезаре Музатти (Cesare Luidgi Musatti: 1897–1989), чья судьба оставила в истории след, напрямую связанный с экспериментами, порождавшими СКЭ. По-видимому, первым увлекся этим эффектом Марсель Дюшан, который в 1913 г. создал инсталляцию “Велосипедное колесо”, считающуюся исходным ростком произведений кинематического искусства. Хотя данное произведение не имело отношения к СКЭ, экспериментирование с вращающимися предметами и изображениями быстро привело Дюшана к открытию эффектных иллюзий, заключающихся в трансформации плоских фигур в объемные при их вращении. В искусстве эти иллюзии не получили специального названия, а сам Дюшан называл свои изображения, порождающие иллюзии типа СКЭ, “роторельефами”, нумеровал их и издавал альбомы дисков с такими изображениями. Примеры придуманных Дюшаном изображений, вызывающих СКЭ, приведены на рис. 1.

Дюшан более известен благодаря вкладу в культуру модерна и считается одним из основателей нового искусства. Юность XX века ознаменовалась революционным натиском на каноны классического искусства, в том числе – на нормы



**Рис. 1.** Набор роторельефов – “психоделических игрушек” Дюшана. Отдельно целиком показаны роторельефы № 12 и № 5 (1935 г.).

и гуманистические цели творений изобразительного жанра, – с его тысячелетней культурной традицией. В России рождались: “космический футуризм” П. Филонова, самобытный и яркий абстракционизм В. Кандинского, магический

реализм М. Шагала, супрематизм К. Малевича. На Западе — после прелюдии импрессионизма и первых экспериментов в стиле “сюр”, “наив”, “дада”, “набиды” (а также “экспрессив”, “кубизм” и “метафизика”) стали бойко провозглашаться амбициозные и “сшитые концептуально” манифесты Нового Искусства, мир стоял на пороге финальной отмены светлых задач фигуративного стиля, из-за оград средиземноморской цивилизации поднималось серое солнце поп-арта... Была во всей этой авангардной круговерти и вполне себе позитивная “новинка”: родился и родил интерес в стане любознательного обывателя жанр *кинематического* искусства, сразу же крикливо поддержанный заумью философствующих теоретиков. Среди мэтров революционных трактовок был определенно заметен один из творцов сюрреализма и коцептуализма (с проекцией — в постмодернизм, дадаизм, OpArt) шахматист, скульптор, фотограф, теоретик искусства, провокативный агитатор направления Ready-made (ставшего доминантой поп-арта), — “скандальный француз с американским паспортом” Марсель Дюшан, столь же громогласный “учитель слепой толпы”, как и его известные собратья по яростному пиару — Бретон, Маринетти, Дали и прочие глашатаи-провозвестники Новой Зари. Немногочисленные шедевры Дюшана хранятся в ведущих музеях Европы и США.

Эффектные пространственные иллюзии, порождаемые многочисленными и разнообразными дисками Дюшана, широко демонстрировались уже в 1920 г. и затем на протяжении многих лет. Они не могли не стимулировать изучение восприятия объемной формы на основе относительного смещения сетчаточных проекций, оказав влияние на многих исследователей пространственно-восприятия. Без сомнения, был с ними знаком и Могилев, но цитировать Дюшана он не мог по причине отсутствия у этого художника научных публикаций.

Наиболее часто цитируемой ранней научной работой по СКЭ является статья (Musatti, 1924) итальянского ученого Чезаре Музатти, который был учеником Витторио Бенусси (Vittorio Benussi) и отмечал, что именно Бенусси первым описал данный эффект и дал ему название. Могилев неоднократно цитировал указанную работу Музатти, в том числе в опубликованной на итальянском языке коллективной статье (Mogylev et al., 1978), где одним из соавторов был G. Rizzolatti — итальянский коллега, связанный с кафедрой Могилева. В этой статье также приведена ссылка на более позднюю публикацию Музатти (Musatti, 1931), которая носит теоретический характер. В ней автор для объяснения СКЭ применяет понятия и представления гештальт психологии — теорию восприятия с участием ассимиляции. Эта работа Музатти имела меньший резонанс.

В своей первой статье по СКЭ Музатти достаточно подробно описывает эксперименты Бенусси (они не были опубликованы) и обсуждает разные виды восприятия третьего измерения, которые базируются на информации, получаемой в результате движения объектов или наблюдателя, разделяя их на три класса: восприятие глубины сцен на основе параллакса движения; восприятие трехмерной формы объектов при наблюдении проекций вращающихся фигур (в современной терминологии это KDE — kinetic depth effect); восприятие глубины и объемности, порождаемое определенными плоскими изображениями при их вращении. Термин “стереокинетический эффект” (СКЭ) Музатти оставляет только за пространственными эффектами третьего типа.

Примеры тест-объектов, использованных Музатти для наблюдения СКЭ, приведены на рис. 2. Один из них (рис. 2, а) близко напоминает излюбленный объект Могилева с набором эксцентрически расположенных колец, только в тест-объекте Музатти кольца распадаются на две группы.

При вращении указанного паттерна возникает иллюзия наблюдения вместо плоского диска двух объемных конусов (большого и соединенного с ним маленького). В процессе длительного рассматривания из-за неоднозначности знака глубины иллюзорных фигур такого типа оба конуса эпизодически независимо “выворачиваются”, так что в видимом образе сменяются четыре варианта: на внутренней или внешней поверхности большего конуса виден выступающий или вдавленный малый конус. Следует отметить, что варианты иллюзорных конусов сменяются резко, каждая форма какое-то время видна как стабильная “жесткая” (если так можно сказать о фантоме) конструкция. В отличие от этого, при вращении второго показанного на рисунке тест-объекта Музатти (рис. 2, б) в видимом образе чередуются как жесткие, так и плавно трансформирующиеся трехмерные образования.

Основная часть научного наследия Музатти не имеет прямого отношения к зрительному пространственному восприятию, и главными его произведениями являются труды по философии, психологии и психоанализу. Его фундаментальные книги (такие как “Trattato di psicoanalisi”, “Geometrie non euclidee e problema della conoscenza”) переиздаются и пользуются спросом до сих пор.

Из близких по тематике публикаций своего времени Могилев отмечал статьи (Fisher, 1956; Mefferd, Wieland, 1967), но в дальнейшем его работы по СКЭ почти не пересекались с работами зарубежных авторов. У него намечилось и стало активно развиваться свое оригинальное направление исследований, связанное с практическим применением СКЭ в физиологии и офтальмо-

гии для изучения структурно-функциональной организации зрительной системы человека (и животных), диагностики нарушений бинокулярного зрения и восстановления нарушенных бинокулярных функций. Большая часть публикаций Могилева, его учеников и последователей в 70- и 80-х гг. были посвящены разработке именно этого направления. К сожалению, кроме докторской диссертации и монографии Л.Н. Могилева (Могилев, 1979; 1982) и диссертаций И.Л. Рычкова (Рычков, 1974; 1985), развернутого изложения результатов, полученных на этом пути, нет. Имеющиеся публикации носят реферативно-тезисный характер (Могилев, 1975; 1976; 1978а, б; 1982; Могилев, Бояркина, 1978; Могилев, Рычков, 1974а, б; Могилев, Уфимцева, 1978; Могилев и др., 1973; Могилев и др., 1975).

Представление о том, как развивались работы по СКЭ на рубеже веков и в новом столетии другими авторами, можно получить из статей аналитического и обзорного характера (Wallach, Centrella, 1990; Proffit et al., 1992; Kramer et al., 2014). В рамках данной юбилейной статьи их обсуждать нет возможности.

#### *Теоретический анализ работ Л.Н. Могилева по исследованию СКЭ*

Изложим и обсудим наиболее важные, на наш взгляд, постановки экспериментов Л.Н. Могилева в ходе изучения СКЭ и выводы из них, сделанные им, — в сопоставлении с тем прогрессом в рамках этой темы, что по причинам сегодняшних возможностей быстрого, точного и более пластичного компьютерного моделирования (мощь ресурса технического зрения в сравнении с могилевскими инструментальными подходами) меняют акцентацию и “рейтинг фундаментальности” в пуле осмысленных ныне аспектов СКЭ. С этой целью на иллюстративном материале цитированной его монографии (Могилев, 1982) опишем “упорядоченное разнообразие фиксированных правил”, детерминировавших графическое оформление (в основном плоских) дисков, вращение которых (с управляемой угловой скоростью) давало СКЭ (рис. 3, включающий рис. 5 и 6 из монографии Могилева).

Начнем с терминологии. Основной объект, при помощи которого Могилев воспроизводил СКЭ, представляет собой круглый диск с кольцеобразными черными полосами на белом фоне. Эти полосы автор называет “кольцевыми элементами”, а “эксцентриситетом” — величину отношения  $e = P/R$  сдвига  $P$  центра внешней либо внутренней *окружностей*, ограничивающих полосу, относительно центра вращения, к радиусу  $R$  диска. Важно отметить, что фактор *ширины* полосы, отмечаемый Могилевым, не определяет “напрямую” величину, устойчивость и “простран-

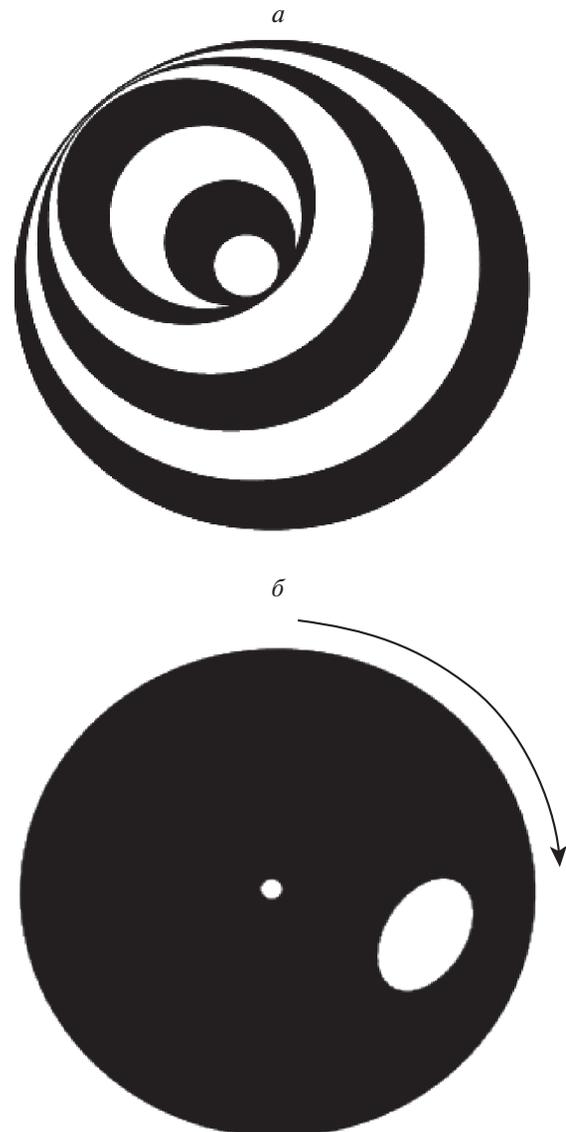


Рис. 2. Примеры тест-объектов, использованных Музатти (Musatti, 1924).

ственную форму” иллюзии СКЭ, являясь лишь опосредованной (суммарной) причиной создаваемого эффекта. Прямым информационным источником СКЭ фактически является независимое воздействие на восприятие каждой из двух контрастных *границ* (скачок яркости *черное/белое*), образующих полосу. Параметр  $e$ , введенный Могилевым, безусловно, характеризует СКЭ, однако, “однозначно объясняет его” лишь совместный анализ *пары*  $e_{ext}$  и  $e_{int}$  (т.е. внешней и внутренней границ полосы). Это уточнение определяет разницу производимого впечатления в ситуациях *равной и переменной* ширины полос: в первом случае образ имеет ступенчатый вид, во втором — чаще всего гладко конический. И причина тут — в допустимой *проективной* “экстраполяции” плос-

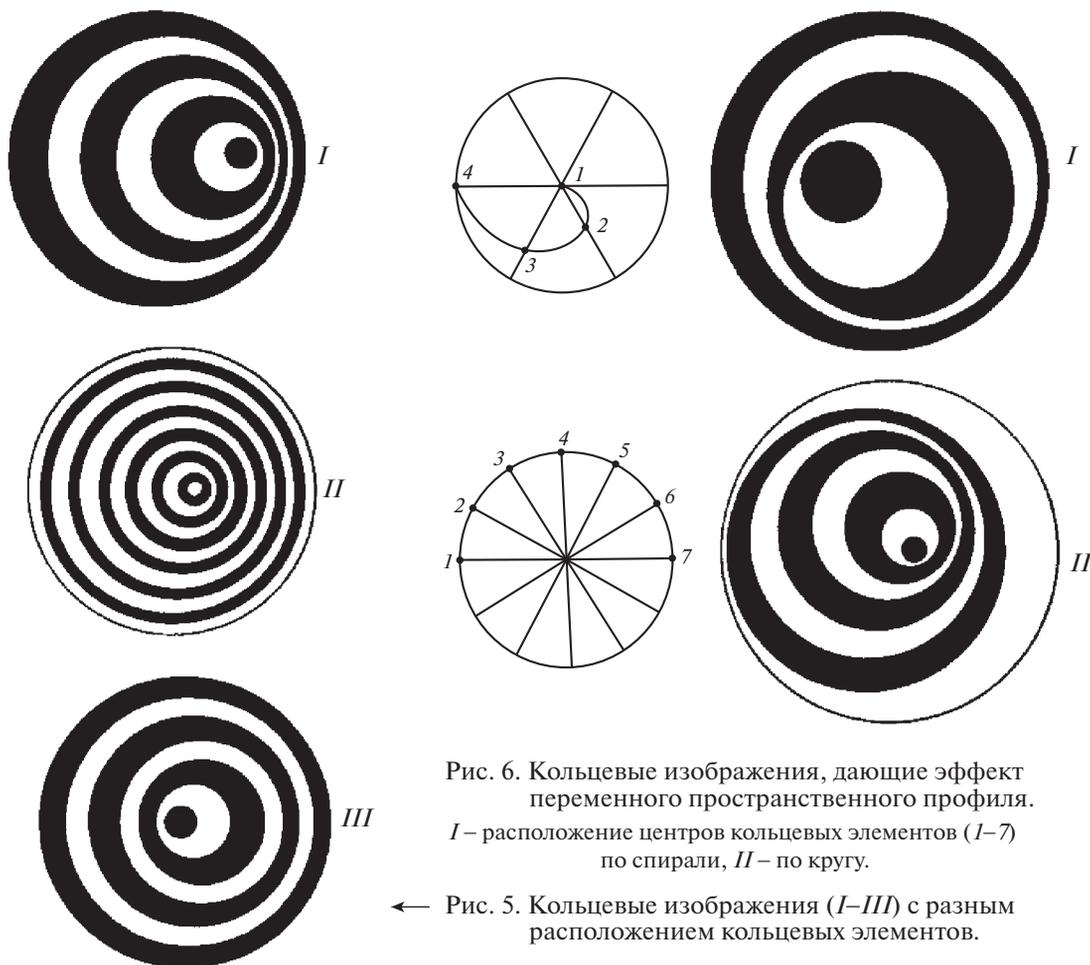


Рис. 6. Кольцевые изображения, дающие эффект переменного пространственного профиля. I – расположение центров кольцевых элементов (1–7) по спирали, II – по кругу.

← Рис. 5. Кольцевые изображения (I–III) с разным расположением кольцевых элементов.

Рис. 3. Скан страницы с рис. 5 и 6 из монографии (Могилев, 1982), демонстрирующий вид дисков, порождающих СКЭ с разнообразием форм иллюзорно экстраполируемых “тел”: в левом вертикальном ряду – гладких (I, III) либо ступенчатого вида (II), а на правом фрагменте (соответствующем рис. 6 монографии) – с переменным (I) либо “спирально извитым” профилем (II).

кой графической картины диска. Конус, в “3D пространстве интерпретации”, расчерченный полосами *одинаковой* ширины и спроецированный не в направлении его оси симметрии (в этом случае эффект СКЭ отсутствует), на *проекции* (а она и есть диск) будет иметь “закономерно *переменную*” ширину. Вклад в СКЭ *каждой* границы контраста, а не *полосы* (как пары границ), и определяет все возникающие эффекты. Заметим, что в коллекции “роторельефов” М. Дюшана (рис. 1) преобладают изображения, где нет полос, но имеются контрастные *линии*, “по Могилеву – разного *e*”, т.е. наличие полос не обязательно для возникновения СКЭ. Форма кольцевых элементов (во всех могилевских экспериментах с плоскими дисками), образованных границами *окружности*, не согласуется с версией интерпретации “виртуального тела” в рамках *центральной* его проекции, удовлетворяя *параллельной*, следствием чего и объясняется констатируемая Могилевым неустранимая полностью двойственность

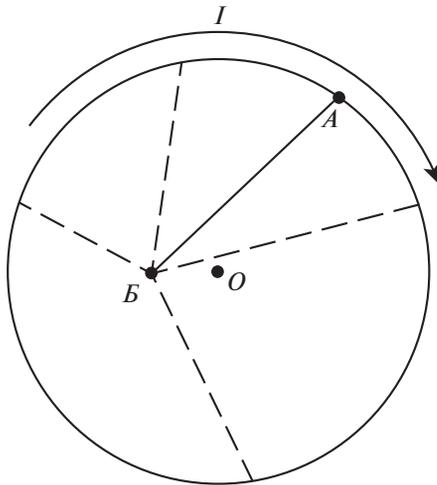
восприятия СКЭ (наблюдателю не удается *стабилизировать* иллюзорный пространственный образ): “3D реконструкция” попеременно выглядит то *выпуклым* телом (гладким либо ступенчатым конусом, а при определенных композициях *e* может создавать образ *криволинейного* конуса, наподобие “шляпы волшебника”), то *вогнутой* поверхностью типа *воронки* (прямой, кривой либо подобной амфитеатру). Более того, в терминах “могилевского *e*” безошибочно выявленные им закономерности организации “кольцевых элементов” дают (в полном согласии с проекционной гипотезой о форме экстраполируемого 3D образа) и более сложные варианты “иллюзорных поверхностей”: вид *кругового* конуса может быть “усложнен” до *эллиптического* либо соответствовать неким уже не-квадратичным формам поверхностей рода “спирально витого конуса” (см. правую часть рис. 3). Однако и такими вариантами “иллюзорных тел – из числа образов *ригидных*” (в опытах с плоскими дисками) не исчерпы-

вается “интерполяционно-экстраполяционная мощь” механизмов СКЭ человека, продемонстрированная и описанная Могилевым. Им показаны (в том же задании через параметр  $e$ ) правила организации полос, дающие СКЭ вида пульсирующей (с периодом в один оборот диска) 3D формы образа, не обладающего уже и свойством “твердости” (вид такого диска показан на той же правой части рис. 3). Целесообразно обсудить геометрическую природу “носителя” этой самой динамической интерполяции образа СКЭ, привлекаемого в качестве опорного элемента в процесс его реконструкции в схеме *параллакса движения*.

К тем же самым *линейчатым* поверхностям (с их нулевой гауссовой кривизной), что и образы СКЭ конусов у Л.Н. Могилева, относятся круговые цилиндры (также имеющие пространственную ось симметрии и в рамках проективной геометрии от круговых конусов не отличимые), интерполяционную динамическую экстраполяцию которых – в режиме дискретного представления их формы опорным облаком *точек* при стробоскопическом предъявлении испытуемому-наблюдателю – исследовал Ш. Ульман (этот фундаментальный труд 1979 г. мы упоминали в начале раздела). Что же представляют собой (для акта динамической репрезентации формы) линии контрастных границ полос на могилевском “кольцевом элементе”? Ответ однозначный и несложный для его осмысления читателем: каждая такая линия (а это всегда окружность) – для зрительного блока интерпретации, порождающего СКЭ, согласно “динамической модели” – след движения виртуальной опорной точки по своей контрастной границе. Ансамбль всех таких границ интегрируют (через перманентные проверки соответствия 3D гипотезе образа) механизмы синтеза зрительного образа наблюдателя, при условии, что весь предъявляемый набор этих траекторий динамически содружественно интерполирует *поверхность* единого гладкого и *вращающегося* тела. Она-то и проявляется в восприятии как пространственный образ СКЭ. Иными словами, композиция поля контрастных стимулов, представляя собой сеть линий на вращающейся карте, не противоречит гипотезе “о задании любой опорной точки на своей круговой границе, гипотетический *пространственный* ансамбль которых, мог бы в свою очередь принадлежать единой двумерной поверхности”, что и дает “разрешение на старт и поддержание образа”. В информационном смысле процесс вращения – не фактор “шума, который не мешает”, а ровно наоборот – *единственный* поставщик динамического набора “как бы дискретных ракурсов” иллюзорного тела, что и обеспечивает перцептивный его стереосинтез (мы сознательно не подняли уровень СКЭ до *когнитивного*, подчеркивая сугубо детерминированный механизм его проявле-

ния, не нуждающийся в конкурентном соперничестве альтернативных гештальтов с их иными пространственными решениями). Невозможность при помощи “диска фиксированной текстуры” (в сравнении с методиками, использованными Могилевым, например, с приемом генерации образа, описанным им во фрагменте “Моделирование при помощи мультипликационных изображений” на стр. 35 монографии) менять стимульное поле сообразно более сложным постановкам задач исследования, смещает предмет нашего анализа к рассмотрению приемов получения СКЭ, сближающих “идеологически” исследования Могилева и Ульмана.

Стробоскопически предъявляемый закольцованный мультфильм позволяет изучить, какого вида контрастными элементами и с какой минимальной плотностью их “разметки в качестве узлов интерполяции” для поверхности экстраполируемого динамически “тела” механизм использования параллакса движения может стабильно трансформировать поле входных стимулов в образ СКЭ. Рассматривавшиеся до сих пор примеры касались роли “точек” (в качестве источника информации, требуемой для синтеза образа). На *цилиндре Ульмана* они своей принадлежностью его поверхности (в виде случайного распределения) продуцировали эллиптические траектории, геометрия которых согласно зафиксированной и вычислительно воспроизводимой проекционной модели рождала образ вращающегося прозрачного и гладкого стакана – с ощущаемой угловой скоростью его вращения вокруг оси симметрии и ее “чувственно оцениваемой” ориентацией в виртуальном пространстве. У образов, индуцированных дисками Могилева, круговые траектории контрастных границ полос уже “стимульно фигурируют” во входном паттерне, только любая прямолинейная образующая (исходящая лучом у этой линейчатой поверхности из вершины конуса) в каждый момент времени представляет собой коллинеарный набор точек на пересечении с контрастными границами полос (целиком вращаемого паттерна). Реализуется интегрально *тождественное* задание поверхности “рождаемого 3D образа”, хотя интерполяционную сетку можно альтернативно определять и как ансамбль круговых *сечений* поверхности, ортогональных оси ее вращения – числом  $2N$  (если число полос на диске  $N$ ), но с равным успехом и формулировать в виде динамически заматающего поверхность набора из  $2N$  коллинеарных точек на любой *образующей* интерполируемого конуса, пересекаемой в этих точках набором  $2N$  сечений (более сложные композиции могилевского дескриптора  $e$  поворачивают сечения относительно соседних, что трансформирует каждую образующую в криволинейный отрезок, а образ – в искаженный (согнутый, спирально завитый) квази-конус

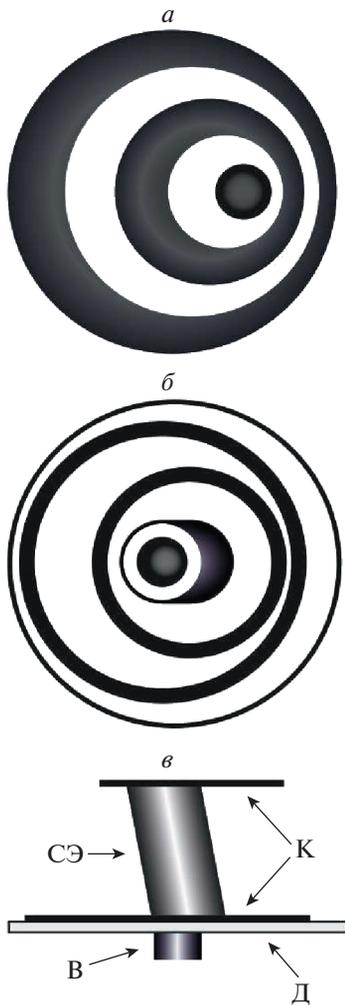


**Рис. 4.** Динамическая схема формирования мультипликационного изображения: круговое движение отрезка А–В переменной длины создает иллюзию конического тела – при разнесении позиций точки В и центра окружности, по которой скользит точка А.

(правый фрагмент на рис. 3). Перейдем к анализу экспериментально показанного Могилевым факта, в варианте техники мультипликации демонстрирующего впечатляющий *минимум* информационной базы поля стимулов, достаточный для появления образа – по итогам успешной работы механизма динамической интерполяции (рис. 4, где воспроизведен левый фрагмент рис. 15 из монографии Могилева). Предложенная минимизация экспериментального инвентаря грандиозна: исчезли полосы с их двойными границами, нет более необходимости вращать диск. Вращающимся (на экране) остался лишь *отрезок* с закрепленной точкой (т.е. луч). Его переменная длина регулируется жесткой связью с окружностью, центр которой смещен относительно начала луча (на рисунке – по горизонтали вправо). Этот “предельно простой антураж” вызывает у наблюдателя (при полном обороте луча за 1 с) устойчивое впечатление непрерывной (воспринимаемой без сектора урезания) конической поверхности. Идея “фильма” – “до смешного проста”: в ролике воспроизведено напрямую замечание кругового конуса лучом его образующей. Этого оказывается уже достаточно для получения устойчивого образа конической поверхности (о случаях наблюдаемой инверсии вогнутость/выпуклость образа Могилев не упоминает, поэтому мы не знаем, какая проекционная схема была реализована при создании ролика). Накопился описательный материал, позволяющий декларировать реальность встречно симметричного обогащения методик Могилева и Ульмана – с целью дополнительно обрисовать мощнейшие возможности нейронального блока интерполяции, про-

являющиеся в иллюзиях СКЭ, но эволюционно сложившиеся для обеспечения 3D константной картины мира, наблюдаемого в динамике, – привлечением схемы параллакса.

Методический прием Могилева без всякого усложнения переносится на модель Ульмана: вместо облака случайных точек динамическую интерполяцию цилиндра задает циклически скользящая его образующая, параллельная оси симметрии. В этом случае нет необходимости обеспечивать (как и в ролике Могилева) иллюзию собственного вращения дисплея симулируемого “тела”, ведь образующая всегда конгруэнтна ей задаваемой поверхности, а потому служит исключительно целям пространственной интерполяции. В ситуации привлечения ульмановской техники поддержания модели “конуса Могилева” с помощью создаваемой численными методами интерполяционной сетки узлов случайной дислокации – также нет ни тени сомнения в “эффектоспособности” такой методики, ибо в проективном смысле круговой цилиндр и конус аналитически (сигнально информационно) эквивалентны. Общность же ключевого слова “образующая” напоминает нам о том, что конус и цилиндр принадлежат семейству линейчатых поверхностей, к числу которых относятся и представители отрицательной гауссовой кривизны – однополостные гиперболоиды (примером подобного объекта, где при помощи прямолинейных отрезков – балок – можно выстроить криволинейную структуру с положительной и отрицательной главными кривизнами, является известный памятник Москвы – телевизионная “башня Шухова”). Идею-шаблон “отрезок образующей у Могилева” можно обобщать и далее, уже в отрыве от задачи интерполяции, но все еще в контексте проблемы актуального (ежедневно требуемого) поддержания константной модели мира – в опоре на алгоритм параллакса движения, перцептивно согласованный с проекционной моделью зрительной линейной перспективы (Николаев, 1987). Характернейшим примером этого фантастически эффективного подхода к динамической обработке “поля визуальных сигналов” – в ситуации их крайне бедного представительства – может послужить фрагмент мультфильма Норштейна “Ежик в тумане”, когда “из-за тумана” от наблюдаемых объектов мира остались лишь “черные отрезочки” (ветки кустов, сквозь гущу которых летит вперед камера-эго-глаз зрителя), но проекционно согласованный плоский массив черточек на экране дарит зрителю без каких-либо девайсов стереоподдержки мощнейшую иллюзию движения сквозь *3D сцену*, где нет тел, бликов, окрасок, где бесильны гештальты рефлексов и бинокулярные модули! На этом мажорном аккорде придется закончить обсуждение наиглавнейших теоретических основ эксперименталь-



**Рис. 5.** Типичные зрительные стимулы, использовавшиеся в психофизических и поведенческих экспериментах по исследованию СКЭ: кольцевое изображение – *a* и объемный инверсионный тест-объект (*б* – вид со стороны наблюдателя, *в* – вид сбоку).

Обозначения: К – кольца, СЭ – структурный элемент, Д – диск вращения, В – втулка для крепления на оси мотора.

ных методов и идей Л.Н. Могилева, чтобы представить результаты его экспериментальной лабораторной работы и прикладных исследований.

#### *О психофизических и поведенческих экспериментах с применением СКЭ*

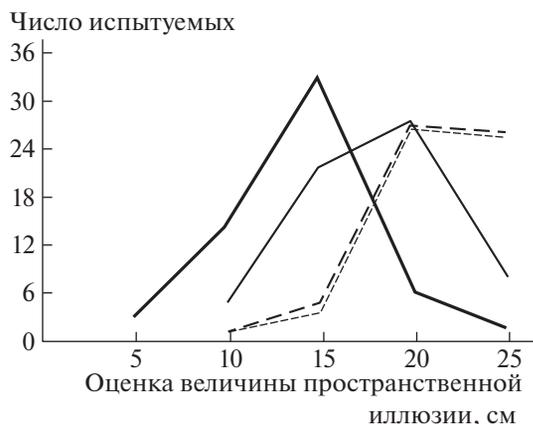
В эволюционном аспекте Л.Н. Могилев связывал развитие механизмов пространственного зрения с двигательными возможностями животных, их активностью в процессе пространственной ориентации и при решении других зрительных задач. Считая относительное смещение элементов сетчаточных проекций объектов при движении как самих животных, так и наблюдаемых объектов самым древним из механизмов пространственного зрения, Могилев придавал

большое значение использованию СКЭ для исследования общей организации системы пространственного восприятия у человека и животных. Как уже упоминалось, его докторская диссертация называлась “Пространственные зрительные эффекты как показатели функциональной организации зрительных центров”.

На кафедре Могилева были развернуты соответствующие масштабные работы, включающие психофизические эксперименты на человеке (с привлечением как здоровых испытуемых, так и пациентов с различными поражениями ЦНС вследствие опухолей, травм, инсультов, абсцессов) и поведенческие опыты на животных (интактных и с хирургическим повреждением зрительных полей 17, 18 и 19 коры головного мозга). На начальных этапах проводилось много пробных исследований с целью отбора наиболее удобных и эффективных стимулов и способов их предъявления, с одной стороны, а с другой – наиболее подходящих способов регистрации реакций и количественной оценки наблюдаемых эффектов.

Для моделирования относительного смещения элементов сетчаточного изображения удаленных предметов в экспериментах использовали как плоские кольцевые изображения, так и объемные вращающиеся тест-объекты с различными параметрами. Примеры использованных зрительных стимулов показаны на рис. 5.

Важным методическим достижением было изобретение пар объемных тест-объектов двух принципиально различных типов, названных инверсионным и безынверсионным. Один из таких объектов (инверсионный) показан в двух ракурсах на рис. 5 (*б*, *в*). Его составными частями были два кольца на прозрачных подложках, имеющие разный размер и “эксцентриситет” *e* по отношению к оси вращения диска, на котором они крепились: больший – непосредственно, а меньший – на специальной наклонной подставке. В условиях бинокулярного наблюдения с небольшого расстояния (2–3 м) такой инверсионный тест-объект при вращении обеспечивал ощущение истинного расположения колец в пространстве, а в условиях монокулярного наблюдения положение колец в пространстве казалось противоположным (они как бы менялись местами). Парный безынверсионный тест-объект, отличающийся от инверсионного только смещением точки крепления на подставке, при вращении обеспечивал ощущение истинного расположения колец по глубине, как при бинокулярном, так и при монокулярном наблюдении. Очевидно, что такие пары объектов идеально подходят для исследования взаимоотношения бинокулярных механизмов восприятия глубины и механизмов, основанных на относительном смещении сетчаточных изображений, определяющих величину СКЭ. В контрольных



**Рис. 6.** Распределение испытуемых по оценкам величины СКЭ. Сплошные линии соответствуют условиям бинокулярного наблюдения с расстояния 3 м (жирная линия) и 6 м (тонкая линия). Штриховые линии соответствуют условиям монокулярного наблюдения с расстояния 3 м ведущим глазом (верхняя линия) и неведущим глазом (нижняя линия, почти совпадающая с верхней).

опытах использовались также плоские изображения проекций объемных тест-объектов на плоскость опорного диска.

В большей части экспериментов на людях использовали плоские кольцевые изображения (рис. 5, а), которые позволяли легче варьировать параметры стимулов. Инверсионные и безынверсионные тест-объекты оказались особенно удобными для экспериментов на собаках с использованием условнорефлекторной методики и пищевого подкрепления.

#### *Исследования взаимоотношений монокулярных и бинокулярных механизмов пространственного зрения на людях и собаках*

В различных сериях экспериментов на людях ставились задачи определения зависимости величины СКЭ от различных параметров тест-объектов и условий наблюдения (в частности, в целях выбора наиболее удобных и эффективных стимулов для ускорения измерений) и оценки силовых взаимоотношений бинокулярного и стереокинетического механизмов восприятия глубины. Для участия в массовых экспериментах привлекали молодых людей в возрасте 18–25 лет с нормальным зрением. В различных сериях опытов обычно участвовали 100–200 человек. В опытах на пациентах с патологиями ЦНС, по естественным причинам, число участников было меньше.

В экспериментах широко варьировали параметры и условия стимуляции: число колец и их “эксцентриситет” в плоских стимулах, скорость вращения тест-объектов, фон, на котором они предъявлялись, расстояние наблюдения, условия освещения. Даже упомянуть все эксперименталь-

ные парадигмы в данной статье не представляется возможным, не говоря уже об изложении полученных результатов и их обсуждении. Кроме того, как уже упоминалось, детальных публикаций по результатам экспериментов очень мало. Поэтому мы приведем здесь данные только одной серии экспериментов, которые фигурируют и в докторской диссертации, и в монографии Могилева (рис. 6).

В представленной серии экспериментов сравнивали данные, полученные в результате оценки величины СКЭ у здоровых молодых людей в монокулярных и бинокулярных условиях зрения при двух различных расстояниях наблюдения (3 и 6 м). Оставляя в стороне вопрос о технической стороне построения графиков (на который теперь никто не сможет ответить), можно утверждать, что ожидаемое “подавляющее” влияние бинокулярных механизмов пространственного восприятия на СКЭ, выражающееся в уменьшении величины иллюзии глубины при переходе от монокулярного зрения к бинокулярному, четко видно (сравните данные при расстоянии наблюдения 3 м). С использованием такой же методики этот вывод был позднее подтвержден другими авторами и дополнен описанием возрастных изменений исследуемых взаимоотношений двух механизмов пространственного зрения, в частности в работах (Рожкова, Васильева, 2001; Васильева, Рожкова, 2010). Влияния на СКЭ доминантности глаз в монокулярных опытах не было обнаружено: результаты, полученные при наблюдении ведущим и неведущим глазом, практически совпадали.

Интересные, но явно предварительные данные, полученные при жизни Могилева на пациентах с различными поражениями ЦНС, нужно обсуждать с учетом более поздних данных, что не входит в нашу задачу.

Немногочисленные данные, полученные на собаках, исключительно важны уже потому, что они свидетельствуют об удобстве и эффективности разработанных методик с применением парных объемных инверсионных-безынверсионных тест-объектов. Однако продолжение подобных опытов до получения необходимой для анализа достаточно большой совокупности данных требует редкого энтузиазма в связи с трудозатратами на весь процесс обучения собак и “многосерийной” регулярной работы с ними; информации о других исследованиях такого плана мы не нашли.

#### ПОВТОРНОЕ ИЗОБРЕТЕНИЕ Л.Н. МОГИЛЕВЫМ АВТОСТЕРЕОГРАММ

*Исследование Л.Н. Могилевым пространственных эффектов, возникающих при восприятии повторяющихся изображений в условиях физиологического двоения*

Большое внимание было уделено Л.Н. Могилевым исследованию пространственных эффек-

тов, которые можно наблюдать при рассматривании зрительных стимулов, имеющих вид горизонтальных рядов повторяющихся плоских изображений с определенными параметрами, в специальных условиях восприятия, называемых условиями *физиологического двоения*. Этот термин подчеркивает, что такое двоение возникает в отсутствие реального *оптического (физического) двоения* проекций одиночных объектов на сетчатках глаз. Физиологическое двоение достигается благодаря специальному приему наблюдения, основанному на дополнительном разведении или сведении зрительных осей двух глаз по отношению к нормальным условиям рассматривания. В таких условиях левое и правое сетчаточные изображения сдвигаются в разные стороны, нарушая условия нормальной бинокулярной фузии, из-за чего видимое изображение двоится: человек начинает одновременно видеть отдельные образы, относящиеся к левому и правому глазу – два монокулярных образа. Однако благодаря периодичности стимула при надлежащем разведе-

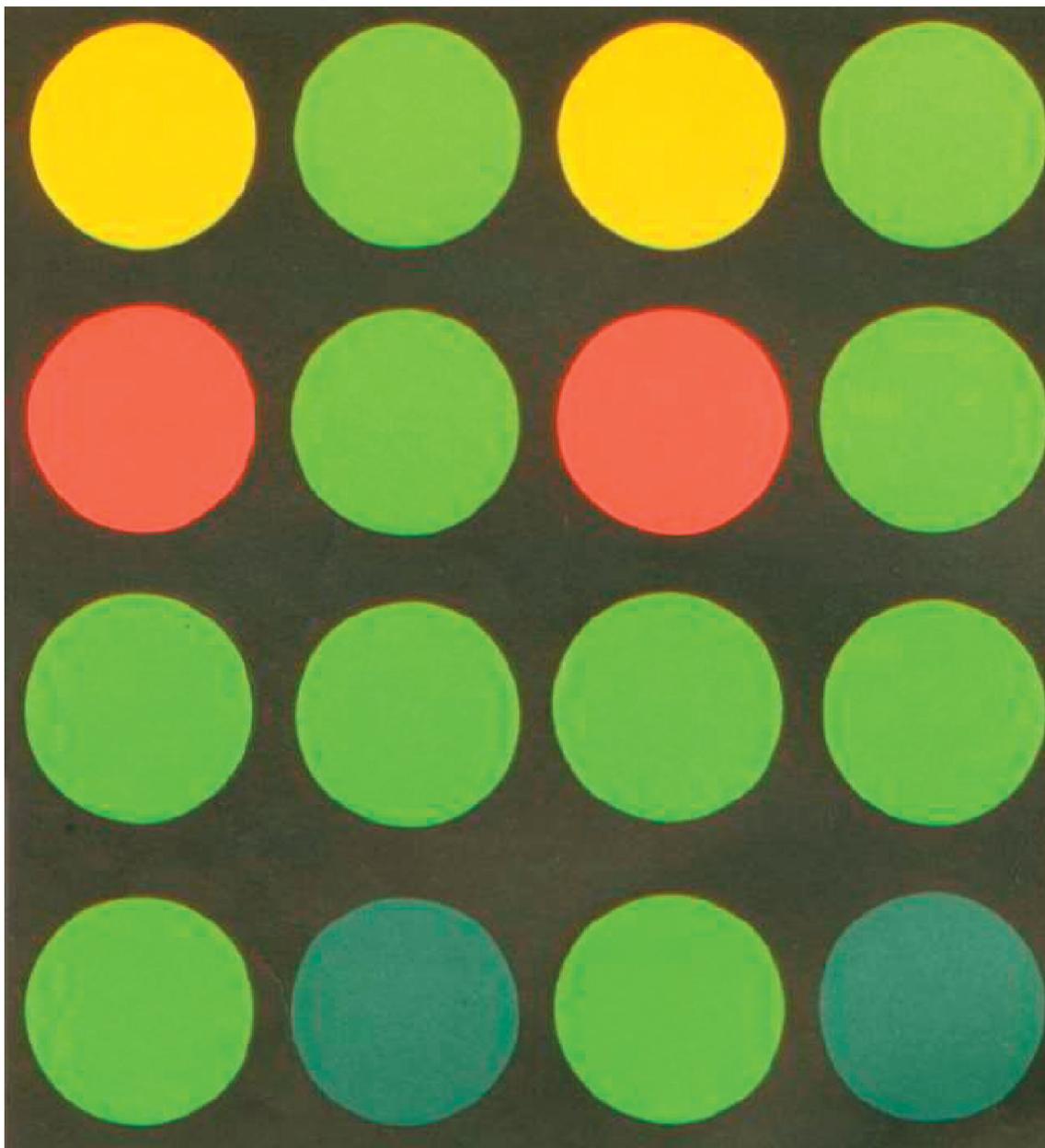
нии/сведении зрительных осей удастся объединять и фузировать фрагменты левого и правого изображений, сдвинутые на период или несколько периодов, так как они оказываются в фузионных зонах бинокулярных механизмов восприятия. Конечно, такая фузия отличается от нормальной, так как имеет место “подмена”, но благодаря использованию периодичности (обеспечивающей идентичность или близкое соответствие фузируемых стимула) формирующиеся образы могут быть достаточно устойчивыми.

Первое сообщение на данную тему было опубликовано Л.Н. Могилевым в 1961 г. в сборнике докладов второй научной конференции физиологов, биохимиков и фармакологов Западно-Сибирского объединения, посвященной XXII съезду КПСС (г. Томск) и называлось “О пространственном зрительном эффекте при повторяющемся изображении” (Могилев, 1961). В этой публикации описаны основные типы повторяющихся изображений и эффекты, которые в дальнейшем фигурируют в других работах автора. Они представлены здесь в обобщающей таблице (табл. 1),

**Таблица 1.** Описание зрительных стимулов, использованных в одной из первых работ Л.Н. Могилева, посвященных автостереограммам, и краткое перечисление наблюдавшихся в эксперименте эффектов\*

1	Изображение	4 кружка диаметром 4 см. Кружки 1 и 3 наполовину заштрихованы слева, кружки 2 и 4 – справа.
1a	Образ	При раздвоении изображения на расстояние, равное диаметру кружка, образ – 5 более крупных и более удаленных кружков. Крайние кружки заштрихованы наполовину, средние три – полностью. При раздвоении на два диаметра, образ – 6 кружков со штриховкой, чередующейся как на оригинальном изображении.
2	Изображение	4 кружка диаметром 4 см. Кружки 1 и 3 – желтого цвета, кружки 2 и 4 – зеленого.
2a	Образ	При раздвоении изображения на расстояние, равное диаметру кружка, образ – 5 кружков. Левый кружок – желтый, правый – зеленый, средние три – промежуточного бледно-зеленого цвета. При раздвоении на два диаметра, образ – 6 кружков чередующегося цвета.
3	Изображение	4 кружка диаметром 4 см. Кружки 1 и 3 – красного цвета, кружки 2 и 4 – синего.
3a	Образ	При раздвоении изображения на расстояние, равное диаметру кружка, образ – 5 кружков. Левый кружок – красный, правый – синий, средние три – попеременно то красного, то синего цвета (борьба полей зрения).
4	Изображение	4 кружка диаметром 4 см. Кружки 1 и 3 – красного цвета, кружки 2 и 4 – зеленого. Красные кружки изображены на зеленом фоне, зеленые – на красном.
4a	Образ	При раздвоении изображения на расстояние, равное диаметру кружка, возникают следующие варианты средних кружков: красные кружки на зеленом фоне, зеленые – на красном, красные – на красном, зеленые – на зеленом.
5	Изображение	4 кружка одинакового цвета. Расстояние между кружками 2 и 3 больше, чем расстояния между кружками 1 и 2 и кружками 3 и 4.
5a	Образ	При раздвоении изображения на расстояние, равное диаметру кружка, средний кружок видится как более крупный и более удаленный, чем остальные.
6	Изображение	Изображения расположены в два ряда. Расстояния между кружками в верхнем ряду отличаются от расстояний между кружками в нижнем ряду.
6a	Образ	Один из рядов воспринимается на другом расстоянии.

\*По экспериментальным данным можно сделать вывод, что стимулы рассматривались при “разведенных” зрительных осях. Расстояние наблюдения автор в работе не уточняет.



**Рис. 7.** Изображение с повторяющимися элементами с форзаца монографии (Могилев, 1982), предназначенное для демонстрации эффекта фузии элементов, различающихся по цветовому тону и цветовой насыщенности.

составленной на основе цитирования авторского текста (Могилев, 1961, с. 95–96).

Как видно из приведенного описания, “повторяющиеся” фрагменты тестовых изображений были в цитируемой работе не всегда и не во всех отношениях идентичными. Компоненты, составляющие ряды, могли различаться по текстуре (№ 1), цвету (№№ 2,3), фону (№ 4). Расстояния между ними тоже специально варьировались (№№ 5, 6). Благодаря этим намеренно вводимым различиям Могилев с коллегами изучали различные характеристики и аспекты бинокулярного восприятия:

предельно допустимые для механизмов фузии расхождения, бинокулярное смещение цветов, проявления бинокулярной конкуренции, закономерности восприятия глубины на основе диспаратности.

Поскольку в цитируемом кратком сообщении Могилева не было иллюстраций, ниже приведены рисунки (рис. 7–9) из его монографии (раздел “Способы получения пространственных зрительных эффектов при сдвигании изображений, построенных по принципу регулярности”, Могилев, 1982, с. 62–74), которые демонстрируют и

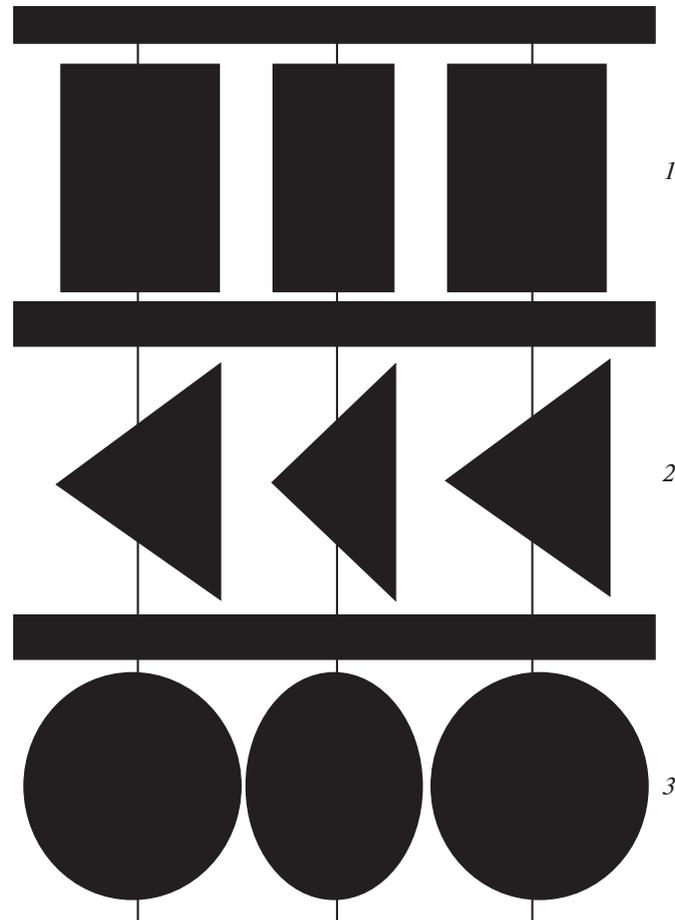


Рис. 8. Изображение из монографии (Могилев, 1982, стр. 69). Демонстрируется эффект поворота фигур при фузировании соседних элементов в каждом горизонтальном ряду.

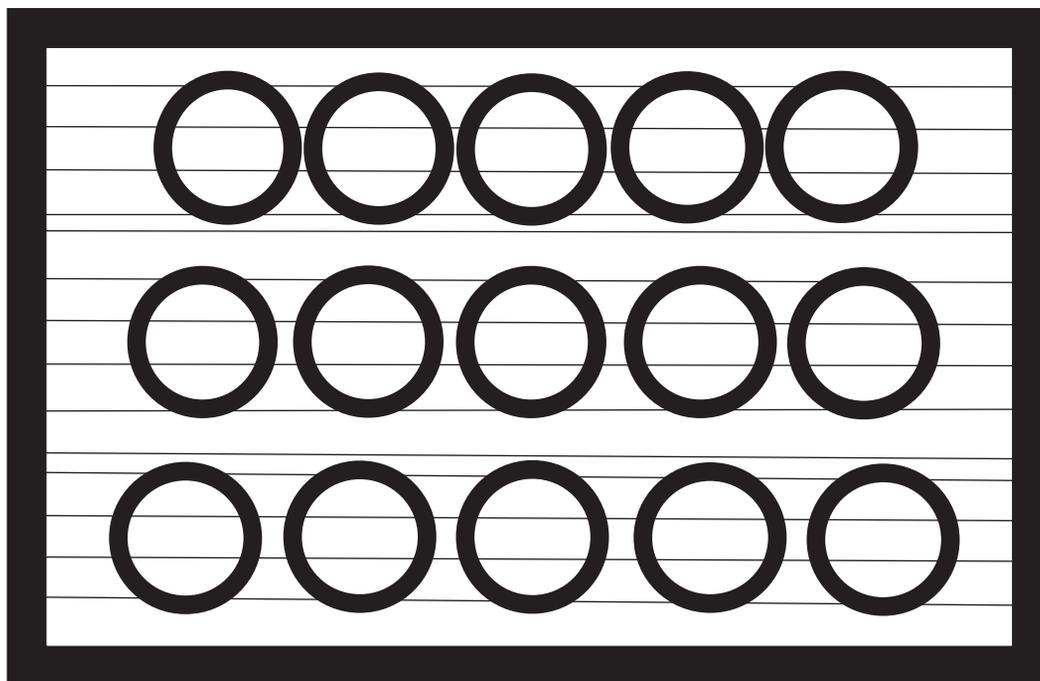
часть вышеописанных эффектов, и новые возможности получения пространственных и цветовых трансформаций.

Если использовать современную терминологию, то изучавшиеся Л.Н. Могилевым изображения следует считать *дискретными автостереограммами*. Сейчас термин *автостереограмма* (АСГ) употребляют в отношении различных квазипериодических плоских изображений, содержащих повторяющиеся по горизонтали (образующие горизонтальный ряд) вертикальные столбцы из идентичных или почти идентичных изображений. При этом столбцы могут содержать как отдельные фигуры (дискретные АСГ), так и непрерывные сложные паттерны (непрерывные АСГ), где схожесть между столбцами может закономерно меняться. Если в дискретных АСГ наблюдатель видит ряды объемных или трансформированных, но всегда отдельных фигурок, то в непрерывных АСГ на всей площади может быть закодирован один крупный объект сложной формы или целая композиция с объектами разного

типа. Очевидно, что для получения непрерывных АСГ требуются более сложные алгоритмы.

Большинству читателей АСГ могут быть знакомы по развлекательным книгам и интернет-сайтам с наборами таких изображений, при надлежащем рассматривании которых могут возникать пространственные композиции или “реалистичные” сцены большой сложности и тонкой структуры с цветовыми эффектами, включающими бинокулярный блеск. История изобретения и усложнения АСГ разными авторами кратко изложена далее, но заранее уместно отметить, что спустя небольшое время после первой публикации Л.Н. Могилев опубликовал изображения, которые уже нельзя считать дискретными и нужно отнести к переходному типу. Пример такого изображения из статьи (Могилев, 1963) показан на рис. 10.

В дальнейшем Могилев практически не занимался усложнением АСГ, переключившись на количественную оценку пространственных эффектов, возникающих при их наблюдении, и тем самым отошел от наметившегося в остальном на-



**Рис. 9.** Изображение из монографии (Могилев, 1982, стр. 72). Автор подчеркивает, что в получающейся при фузирвании многоплоскостной картине наблюдается эффект подчинения (“привязки по глубине”) одних элементов (линий) другим (кольцам).

учном сообществе главного пути совершенствования АСГ — создания сложных тонкоструктурных изображений с протяженными объектами, занимающими несколько периодов (“непрерывных” АСГ). На рис. 11 представлен пример непрерывной АСГ, в которой при обычном рассматривании невозможно различить закодированную фигуру (акулу), а при надлежащем разведении зрительных осей она отчетливо видна. Отличие таких непрерывных АСГ от дискретных АСГ Могилева, на которых отдельные компоненты всегда различимы и при обычном рассматривании, очевидно.

В своих работах Л.Н. Могилев отмечал, что важным преимуществом АСГ является возможность наблюдать их без специальных оптических устройств. Однако, что касается использования АСГ в лабораторных экспериментах и офтальмологической практике для оценки и тренировки механизмов пространственного зрения, то оно ограничивается трудностями, возникающими из-за специфических условий наблюдения тест-объектов и особенностей непривычного режима работы всего комплекса систем (сенсорной, аккомодационной и глазодвигательной), обеспечивающих процесс зрения. Эти факторы заставляют предполагать, что АСГ больше годятся для экспертной работы с людьми, профессии которых требуют отличных и гибких зрительных способностей, а также для тренировки зрения таких людей. В некоторых случаях АСГ могут также ис-

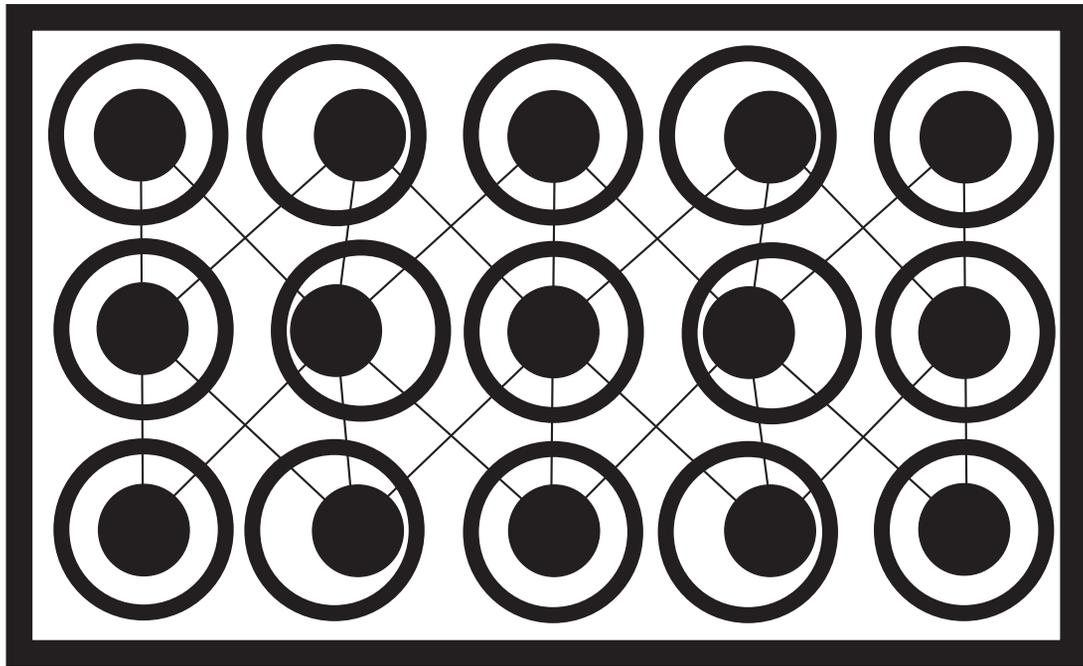
пользоваться на заключительных этапах восстановления нарушенных бинокулярных зрительных функций у пациентов, но методики для такого функционального лечения пока не разработаны.

#### *Место изображений, созданных Л.Н. Могилевым в истории развития работ по АСГ*

Чтобы “привязать” АСГ Могилева к хронологической последовательности изобретений этого типа, напомним кратко историю развития наблюдений и идей.

Эффект, при котором повторяющийся паттерн при изменении угла конвергенции воспринимается как находящийся ближе или дальше реального изображения, в литературе часто называется “иллюзией обоев” (“wallpaper illusion”). Иллюзия обоев впервые была описана в 1738 г. Смитом (Smith, 1738, цит. по Howard, Rogers, 2012), и в дальнейшем исследовалась рядом ученых (Goethe, 1810; Meyer, 1852; Brewster, 1844a, b; Locke, 1849), что отражено на приведенной ниже хронологической схеме (рис. 12). Сам термин “иллюзия обоев”, похоже, впервые был введен Брюстером.

Наблюдения иллюзии обоев естественным образом ставят вопрос о вкладе вергенции глаз (т.е. угла между зрительными осями) и диспаратности (различий в проекциях зрительной сцены на сетчатках левого и правого глаз) в воспринимаемое расстояние до объекта. Еще в первых работах бы-



**Рис. 10.** Автостереограмма промежуточного типа (между дискретным и непрерывным). Изображение взято из статьи (Могилев, 1963).

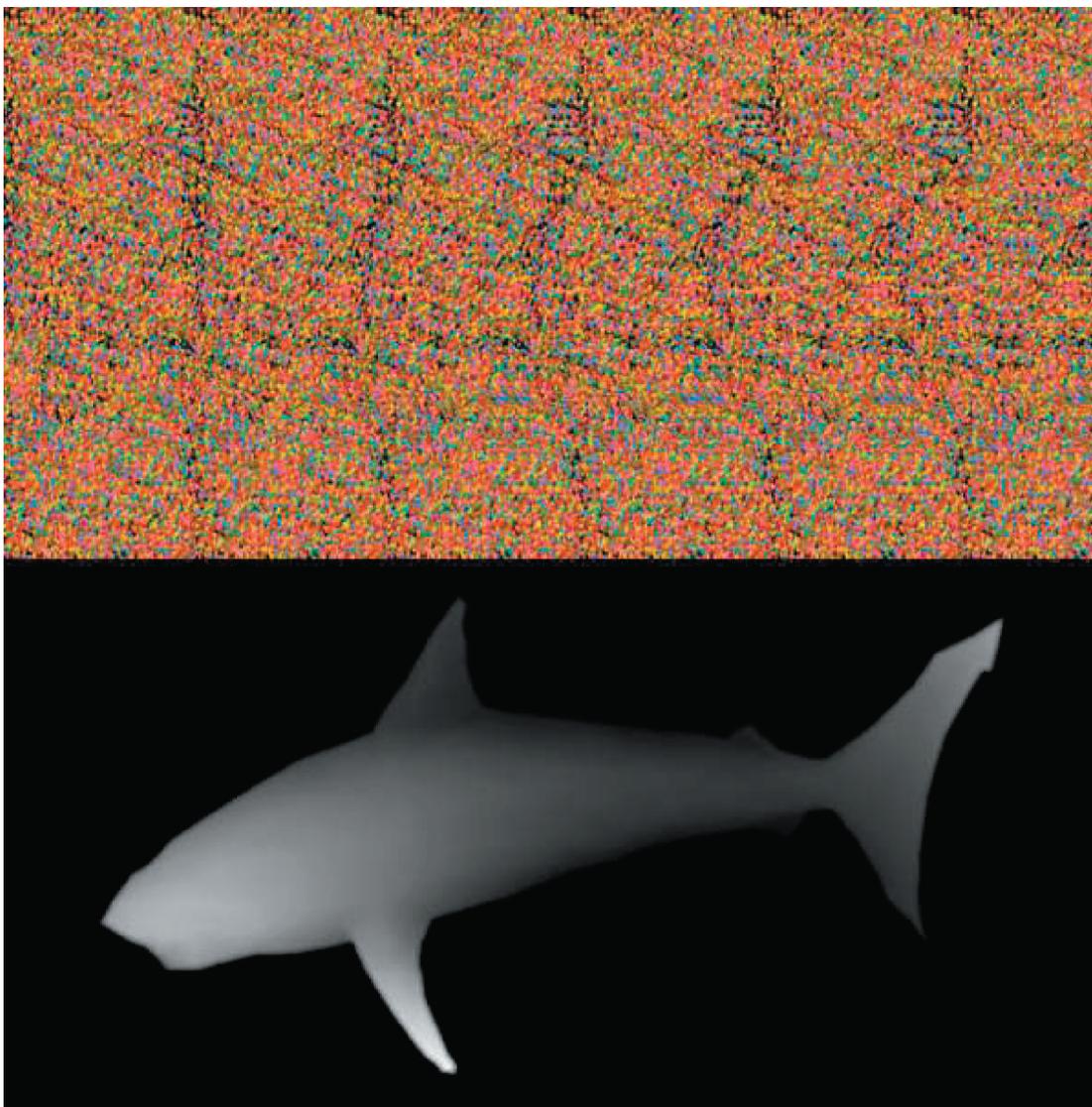
ло отмечено, что при рассматривании паттерна на скрещенных зрительных осях (перекрещивающихся перед плоскостью изображения) элементы паттерна обоев кажутся более близко расположенными и несколько меньшего размера, а при наблюдении паттерна на разведенных осях (перекрещивающихся за плоскостью изображения) элементы паттерна воспринимаются как более удаленные и большего размера. В первых попытках описать изменения воспринимаемого расстояния исследователи связывали возникающие пространственные эффекты с состоянием вергентной системы: оси глаз, перекрещенные ближе плоскости фиксации, как будто фиксируют более близкий виртуальный объект; оси глаз, перекрещенные за плоскостью изображения, наоборот, как будто фиксируют более далекий объект. В дальнейшем было показано, что различие в воспринимаемом расстоянии может быть задано и диспаратностью, и АСГ неоднократно использовались для исследования вопроса о вкладе в объемный образ вергенции и диспаратности (Ono et al., 1971; Logvinenko, Belopolskii, 1994; Logvinenko et al., 2001).

После нескольких довольно подробных работ в 1840-х годах, исследования иллюзии обоев на некоторое время приостановились вплоть до второй половины XX века (рис. 12). Могилев стал одним из первых авторов, вновь открывших АСГ после перерыва (Могилев, 1961; 1963) и начавших

исследования зрительных механизмов с их использованием. За рубежом работы Могилева долгое время оставались неизвестными, и первым, кто исследовал АСГ в XX веке, считался Pete Stephens (Рождкова, 2022a; Tyler, 2014; Sawada, Rozhkova, 2020).

Однако в период между публикациями, посвященными иллюзии обоев (Brewster, 1844; Meyer, 1952; Locke, 1849), и работами Могилева (Могилев, 1961, 1963) возникла другая ветвь исследований пространственного зрения, которая затем объединилась с ветвью АСГ: исследования случайно-точечных стереограмм (СТС – перевод английского термина “random-dot stereogram”, RDS). СТС – это пара изображений, предназначенных для левого и правого глаза, в каждом из которых по отдельности можно видеть только случайный набор точек, тогда как их фузирование дает возможность увидеть объемный образ, закодированный только диспаратностью – относительным смещением точек в левом и правом изображениях.

Долгое время считалось, что для восприятия объемной формы предмета зрительная система должна сначала опознать объект в каждом глазу отдельно. Однако еще в 1901 г. Сантьяго Рамон-и-Кахаль описал механизм создания “закомфлированного” по принципу СТС изображения (Ramon y Cajal, 1901; Bergua, Skrandies, 2000). Однако он описал свое открытие только как крипто-



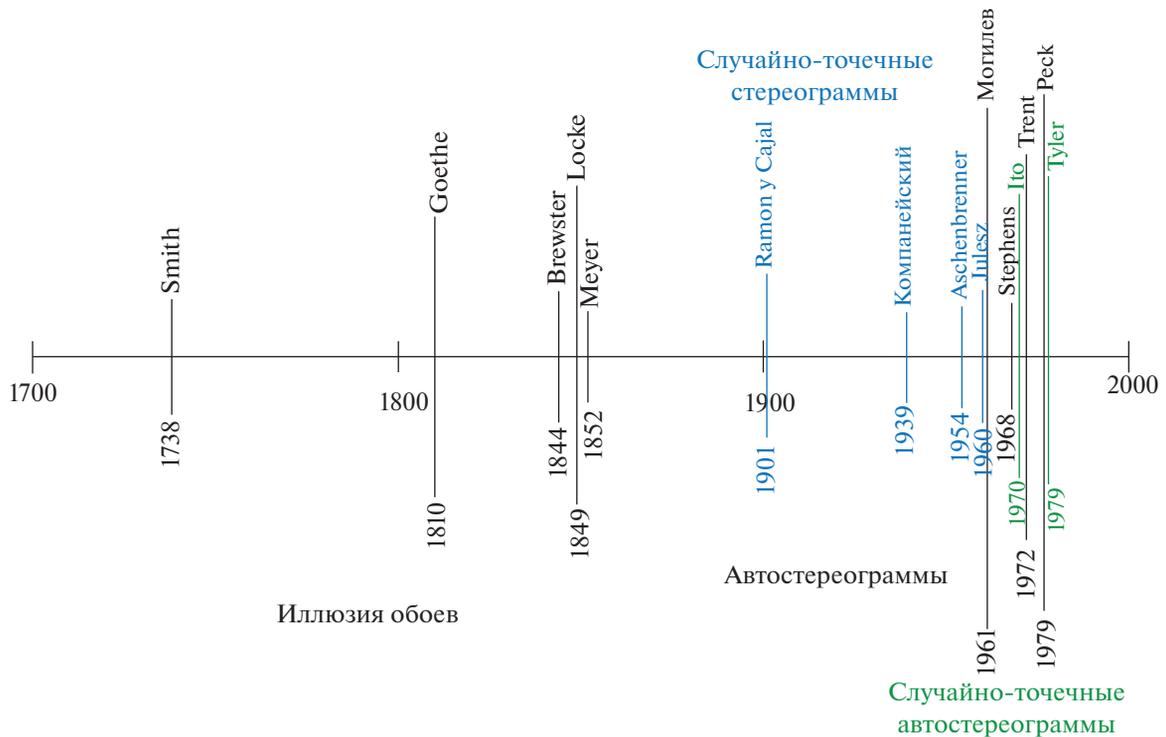
**Рис. 11.** Пример непрерывной АСГ с закодированным на всей ее площади объемным образом акулы (верхняя часть рисунка). АСГ состоит из похожих вертикальных компонентов (периодов), которые, однако, несколько отличаются друг от друга и не позволяют узнать закодированный объект. На нижней части рисунка представлена карта глубины для кодирования образа акулы.

Источник иллюстрации: Fred Hsu, March 2005., Wikimedia Commons, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stereogram\\_Tut\\_Random\\_Dot\\_Shark.png#/media/File:Autostereogram.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stereogram_Tut_Random_Dot_Shark.png#/media/File:Autostereogram.png)

графический метод, не обсуждая при этом особенности бинокулярного зрения. Чуть позже, в 1939 г. Б.Н. Компанейский и в 1954 г. К. Ашенбреннер (Aschenbrenner, 1954) оба опубликовали случайно-точечные стереограммы, полученные разными способами. Но только начиная с 1960 г. в работах Б. Юлеша случайно-точечные стереограммы были подробно рассмотрены как средство для исследования взаимодействия различных механизмов зрительной системы человека (Julesz, 1960; 1964; 1971). Работы Б. Юлеша дали еще одно основание полагать, что зрительная си-

стема человека состоит из многих различных модулей, функционирующих независимо. Более подробный обзор истории создания и использования в зрительной науке случайно-точечных стереограмм можно найти в работах (Рожкова, 2022б; Howard, Rogers, 2012, раздел 24.1.5).

Довольно скоро после работ Б. Юлеша появились первые АСГ, состоящие из случайно-точечных паттернов: до этого АСГ чаще всего создавали из монокулярно узнаваемых объектов, и только их пространственное расположение менялось при рассматривании АСГ с измененным углом



**Рис. 12.** Хронологическая схема появления основных работ по созданию и совершенствованию АСГ. Голубым цветом выделены основополагающие публикации по случайно-точечным стереограммам. Зеленым цветом выделены основополагающие публикации, объединяющие в себе принцип случайно-точечных стереограмм и “иллюзию обоев” – случайно-точечные автостереограммы (SIRDS: single image random-dot stereogram).

вергенции. Первую известную случайно-точечную АСГ создал вручную в 1970 г. Masuhiro Ito (Tyler, 2014), незадолго до появления работы (Peck, 1979). В 1979 г. К. Тайлер и М. Кларк разработали первый алгоритм, способный генерировать АСГ на основе задаваемой пользователем карты глубины желаемого трехмерного объекта или сцены (Tyler, Clarke, 1990; Tyler, 2014).

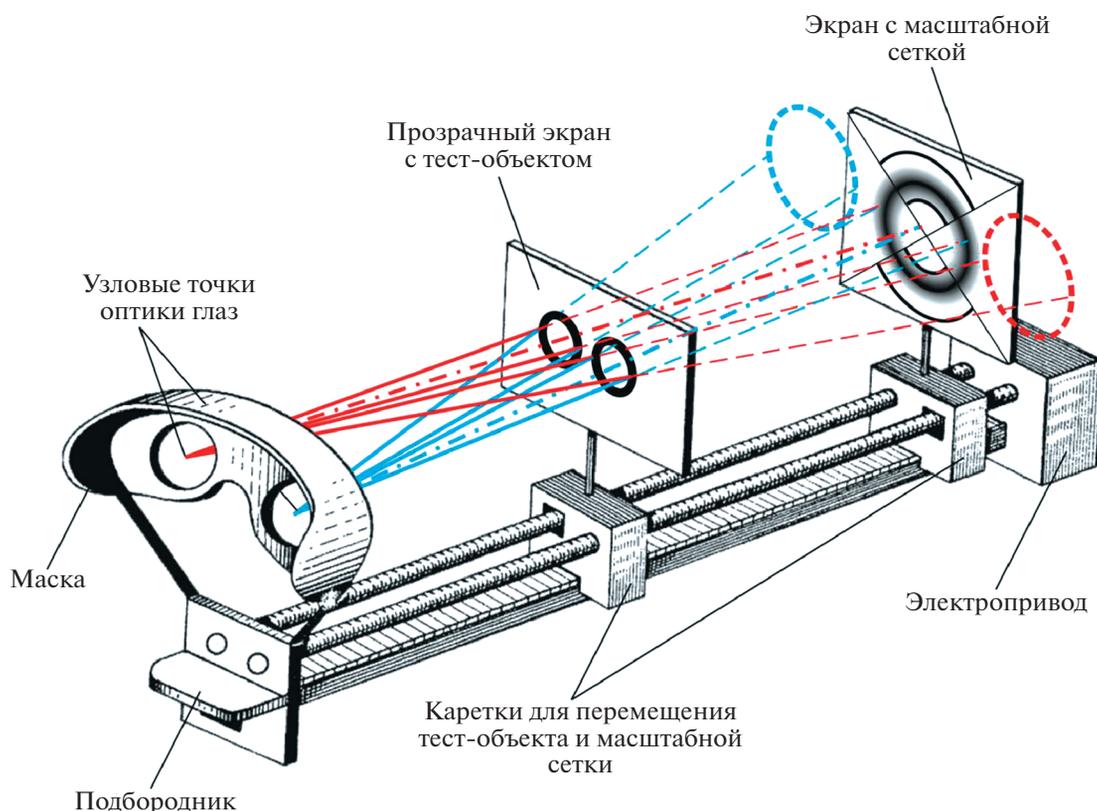
Очевидно, что по своему содержанию работы Л.Н. Могилева по АСГ находятся между работами Эдварда Трента (Trent, 1972) и Кристофера Тайлера (Tyler, Clarke, 1990 – статья об изобретении, фактически сделанном в 1979 г.), хотя хронологически Л.Н. Могилев опережал Э. Трента. Встречающиеся в работах Л.Н. Могилева АСГ всегда содержали монокулярно различимые объекты (не случайно-точечные паттерны).

При помощи тестовых стимулов типа АСГ Л.Н. Могилев исследовал как влияние разных составляющих зрительного процесса на формирование пространственного образа (в частности, вклад вергенции), так и явление бинокулярной конкуренции (борьбы полей зрения). Бинокулярная конкуренция и бинокулярная интеграция особенно интересовали Л.Н. Могилева: в его ра-

ботах много описаний специальных АСГ, подразумевающих фузирование объектов, которые различаются в левой и правой частях формирующейся стереограммы по цвету, яркости, размеру, форме, ориентации или составным элементам. Автор скрупулезно описывает получаемые при восприятии таких АСГ впечатления, подчеркивая при этом значение индивидуального опыта и тренированности наблюдателя (Могилев, 1982, с. 74).

## ИЗОБРЕТЕНИЕ БИНАРИМЕТРА

Л.Н. Могилев считал очень ценным, что АСГ дают возможность получать пространственные эффекты при наблюдении плоских тестовых изображений в условиях физиологического двоения без специальных вспомогательных технических средств для сепарации левой и правой частей стереопары. По мнению Могилева, открывалась возможность исследовать количественные и качественные характеристики пространственного зрения на плоских стимулах в условиях, приближенных к естественному восприятию. То обстоятельство, что при данной методике стереопары искусственно формируются не из соответствующ-



**Рис. 13.** Схема бинариметра из монографии (Могилев, 1982), дополненная изображением часто используемого тест-объекта (двух колец) и вспомогательными линиями, поясняющими формирование видимого образа в условиях физиологического двоения.

щих, а из соседних фрагментов зрительных стимулов с повторяющимися изображениями за счет подмены в результате специальных усилий для физиологического двоения и что видимые образы являются чисто умозрительными, не принимались во внимание. Хотя Могилев и отмечал в своей книге, что при массовых исследованиях нужно будет учитывать трудность сознательной настройки испытуемых на создание условий физиологического двоения, соответствующий прибор был разработан и сконструирован. В разработке прибора, названного бинариметром, принимали участие И.Т. Демченко и Б.В. Хрусталеvский. Несколько раз в прибор вносились усовершенствования, и в 1978 г. на него было получено авторское свидетельство (Могилев, 1978а).

Бинариметр — это механическое устройство, схема которого показана на рис. 13.

Основными частями этого устройства являются маска и подбородник для фиксации головы испытуемого и две подвижные каретки с электрическими приводами, предназначенные для крепления и перемещения рамки с тестовыми изображениями и экрана с масштабной сеткой. Каретки

можно перемещать по направлению к испытуемому или от него по соответствующим направляющим. Вспомогательные технические детали устройства — шасси и электроприводы для перемещения кареток, осветитель для равномерного освещения экрана с масштабной сеткой. Подчеркивается, что для наблюдения тестовых изображений прибор не содержит никакой дополнительной оптики.

За основу приведенной здесь схемы взяты рисунки из монографии (Могилев, 1982, рис. 41) и авторского свидетельства (Могилев, 1978а). К исходному чертежу нами добавлены изображения часто используемых тест-объектов — колец — и обозначения воспринимаемых образов, а также цветные линии, иллюстрирующие ход лучей от тест-объектов в левый и правый глаз и формирование виртуального бинокулярного образа (увеличенное размытое серое кольцо) на экране в плоскости позади стимула, с которой совмещена плоскость масштабной сетки. Слева и справа от бинокулярного образа показаны воспринимаемые одновременно с ним монокулярные образы, которые могут быть видны на том же расстоянии,

что и бинокулярный образ, или на ином, поскольку зрительная система не получает информации для однозначного определения данного расстояния. На приведенной схеме монокулярные образы показаны цветными штриховыми линиями на той же глубине, что и бинокулярный образ. Для пояснения работы с бинариметром приведем соответствующую цитату из монографии Могилева (Могилев, 1982, с.75), сделав для сокращения описания несколько незначительных купюр.<sup>1</sup>

“Тестовое изображение, обычно состоящее из расположенных на одной горизонтали *совместимых элементов*, наносится на прозрачную поверхность (на стекло или плексиглас), что позволяет сквозь него видеть экран с масштабной сеткой). Центр масштабной сетки и элементы тестового изображения находятся на уровне глаз испытуемого. Маска несколько ограничивает бинокулярное поле зрения, но не разделяет его.

Испытуемого усаживают перед прибором и фиксируют его голову при помощи маски и подбородника. Определяется нормальный стереоскопический базис. Экспериментатор может предварительно рассчитать расстояние до *мнимого изображения* и размеры его фигур. Обычно используется изображение из двух элементов — черных колец одинакового диаметра. Оно устанавливается на заданном расстоянии путем перемещения каретки для тест-объекта. Экран с масштабной сеткой путем перемещения другой каретки устанавливается на расстоянии, несколько большем или же несколько меньшем, чем расчетное расстояние до *мнимого изображения*. Эти манипуляции производятся до того, как испытуемого усадят за прибор.

Испытуемому предлагается сконцентрировать взгляд на центре масштабной сетки, что обеспечит соответствующее положение точки бификсации. При таком условии произойдут перекрестное двоение фигур тестового изображения и слияние *половинчатых элементов*. Предлагается, ориентируясь по среднему (*полному*) элементу мнимого изображения, определить его удаление по отношению к масштабной сетке, а затем, управляя движением каретки, совместить плос-

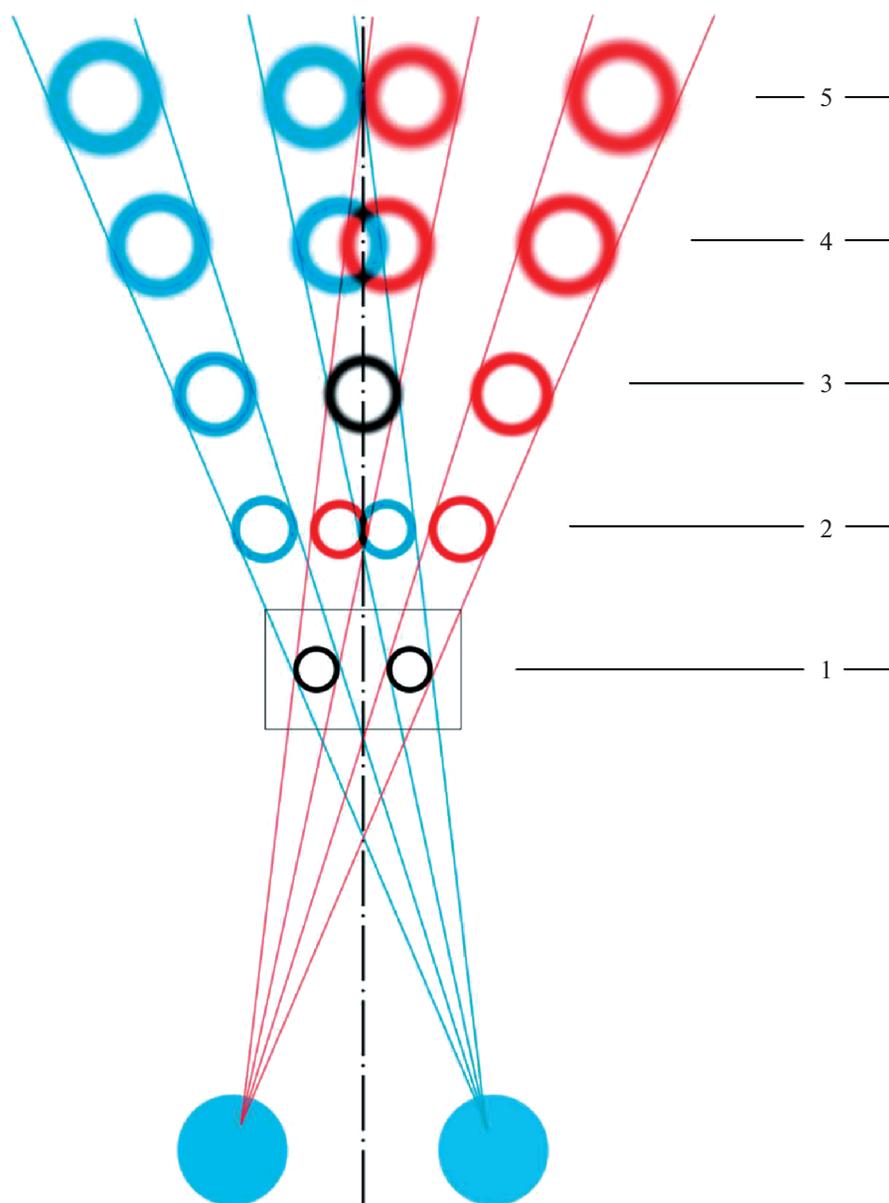
кость масштабной сетки с плоскостью изображения. После этого испытуемый по сетке определяет размер элемента мнимого изображения, а экспериментатор по шкале, расположенной на шасси, определяет расстояние от глаз испытуемого до мнимого изображения и сверяет его с расчетным.”

Приведенная цитата относится к случаю, когда тестовое изображение находится на неизменном заданном расстоянии, а испытуемый в процессе измерений варьирует расстояние до масштабной сетки. Однако возможен и другой вариант работы, когда масштабная сетка закреплена, а испытуемый передвигает каретку с тестовым изображением. Для проведения различных измерений к бинариметру сделаны специальные приставки, например — раздвижная приставка, позволяющая изменять расстояние между центрами элементов тестового изображения, и приставка с поворачивающейся масштабной сеткой для оценки углов поворота и наклона видимых образов при варьировании параметров тестовых изображений.

Из схемы рис. 13 можно заключить, что условия наблюдения на бинариметре соответствуют давно применяемому исследователями стереоскопического зрения приему фузирования левого и правого компонентов стереопары (напечатанной или сгенерированной на дисплее) без вспомогательных приспособлений (*free fusion*) за счет искусственно вызванного наложения левого и правого изображений в видимом пространстве путем сознательного разведения (сведения) осей глаз от положения фиксации взора на тест-объекте, к более удаленной (или близкой) точке. При таких вергентных движениях сетчаточные изображения стереопары смещаются в левом и правом глазу к периферии поля зрения в противоположных направлениях, и в какой-то момент в центральных областях обеих сетчаток оказываются фузируемые компоненты “стереопары” (проекция левого компонента на зрительной оси правого глаза + проекция правого компонента на зрительной оси левого глаза — при разведении зрительных осей; проекция правого изображения на зрительной оси правого глаза + проекция левого изображения на зрительной оси левого глаза — при сведении осей). На поясняющем рис. 14 для случая разведения осей схематически показано, как меняется видимый образ при переводе взгляда вдаль с уровня 1, соответствующего позиции тест-объекта, на более далекие уровни 2—5.

Основное правило успешного “свободного” фузирования левого и правого изображений стереопары, напечатанной в виде рядом расположенных левого и правого кадров, состоит в отказе от “нормального” угла конвергенции глаз, обеспечивающего обычное рассматривание страницы и восприятие двух компонентов стереопары в

<sup>1</sup> Цитата содержит авторские термины, смысл которых следующий: *совместимые элементы* — фигуры, которые могут быть сфузированы, порождая единый образ; *половинчатые элементы* — элементы изображений, относящиеся только к левому или правому глазу; *истинное изображение* — предельное тестовое изображение (тест-объект, зрительный стимул); *мнимое изображение* — весь видимый образ, сформировавшийся при наблюдении тестовых фигур; *полный элемент мнимого изображения* — элемент, соответствующий фузии двух фигур — левой и правой; *половинчатый элемент мнимого изображения* — монокулярно воспринимаемый элемент видимого образа, определяемый одним из сетчаточных изображений.



**Рис. 14.** Иллюстрация изменений видимого образа при разведении зрительных осей для перевода взгляда вдаль за плоскость, в которой предъявляется тест-объект (два кольца).

Цифрами 1; 2; 3; 4; 5 обозначены уровни глубины, соответствующие положениям взгляда, для которых показаны изображенные рядом видимые образы.

центре поля зрения на уровне точки пересечения зрительных осей. Наблюдателю предлагается развести или свести глаза, как бы желая рассмотреть точку позади страницы (экрана монитора) или перед ней. При этом видимый нормальный бинокулярный образ стереопары раздвоится – распадется на два монокулярных, которые разъедутся в стороны на расстояние, зависящее от положения осей глаз при новой точке фиксации взгляда.

Несмотря на кажущуюся простоту процедуры, для понимания физиологической сути измере-

ний на бинариметре и поясняющей ее схемы нужно учесть целый ряд обстоятельств.

– Изначально в условиях нормальной фузии испытуемый фактически видит бинокулярный плоский образ двух колец на прозрачном плоском экране (что соответствует реальной ситуации), но потенциально эти два кольца могут играть роль стереопары.

– Когда человек разводит глаза, и ось левого глаза уходит влево, в поле зрения левого глаза центр тестового изображения уходит в правую

половину поля зрения (с правым глазом ситуация симметричная).

– С увеличением отклонения от нормальных условий бификсации при разведении зрительных осей происходит потеря нормальной фузии и возникает двоение, т.е. человек имеет как бы двойное монокулярное зрение (называемое одновременным). Воспринимаемый образ должен определяться объединением левого и правого монокулярных образов, причем мозгу нужно сформировать такую видимую картину, в которой образы, воспринимаемые левым глазом, окажутся правее, а воспринимаемые правым глазом – левее центра поля зрения.

– В этих условиях зрительные мозговые механизмы совмещают направления зрительных осей левого и правого глаза (или вычисляют среднее направление) и считая, что это середина видимого поля зрения, “размещают” левые и правые образы соответственно.

– Схема отражает отчетливо видимую, но явно иллюзорную картину с двумя разъезжающимися в стороны “стереопарами” (сильно отличающаяся от реальности, в которой единственная пара объектов стоит на месте в центре поля зрения). При определенной степени разведения зрительных осей (на схеме рис. 14 это уровень фиксации взора № 3) в бинокулярной системе происходит наложение проекций разных колец из левого и правого изображений и создаются условия для их фузирования.

По инструкции, разводить (сводить) глаза нужно именно до такой позиции, чтобы левый и правый монокулярные образы стереопары частично перекрылись в бинокулярном поле зрения, имитируя в области наложения нормальное сепарированное наблюдение. Очевидно, что это возможно при двух позициях осей глаз: когда “левоглазая” левая половина стереопары накладывается на “правоглазую” правую половину, и наоборот. Иными словами, оси глаз должны быть избыточно разведены или сведены на конкретный угол. Однако не каждый испытуемый с нормальным бинокулярным зрением, а тем более – пациент с нарушениями бинокулярных механизмов, может быстро освоить такую методику рассматривания данных тестов. Как известно, более универсальный способ – это наблюдение стереопар с использованием стереоскопа или разделителя полей зрения, которые обеспечивают сепарацию левого и правого изображений при помощи центральной перегородки или оптики, не позволяющих видеть вторую половину стереопары. Различные конструкции таких приборов начали создаваться с первой половины 19 века, и до последнего времени предлагаются все новые модификации. Их преимущество в том, что они не требуют специальных усилий и отказа от нор-

мальной согласованной работы всех зрительных механизмов для наблюдения бинокулярных образов.

*В чем достоинства и недостатки бинариметра Могилева как варианта устройства для free fusion?*

– Замечательна идея Могилева использовать прозрачный экран и масштабную сетку. Это облегчает перевод взгляда вдаль за плоскость, где расположен тест-объект, и удобно для наблюдения и количественного анализа формирующихся образов.

– Однако о “естественности” условий наблюдения говорить неправомерно, так как формирование бинокулярного образа происходит в очень непривычных условиях, и этот образ не соотносится с телесной реальностью в том месте, куда направлен взгляд, являясь продуктом, зависящим от усилий испытуемого.

– Правильная интерпретация количественных данных и выводов требует точной информации об оптике глаз каждого испытуемого, сохранения стабильной позиции испытуемого для исключения необходимости дополнительных настроек в течение длительных процедур, участия квалифицированного медперсонала.

Приведем пример из монографии Могилева, показывающий, что даже в самых простых случаях “точные данные”, полученные при помощи бинариметра, могут оказаться сомнительными и приводить к неверным заключениям. Это описание экспериментов по определению расстояний до мнимых плоскостных изображений и размеров их элементов (Могилев, 1982, с. 77–78). В эксперименте измеряли расстояния до мнимого изображения ( $L$ ) при разных значениях расстояния от глаз до тестового изображения, состоящего из двух идентичных колец, расстояние между которыми по горизонтали  $p$  варьировали. Теоретически предсказываемое расстояние до видимого бинокулярного образа рассчитывали на основании значений “нормального стереоскопического базиса”  $l$ , который офтальмологи определяют по расстоянию между центрами зрачков при параллельности зрительных осей. Однако в действительности расстояние между зрачками скорее отражает взаимное расположение оптических, а не зрительных осей и не соответствует реальному стереоскопическому базису. Если сравнивать систему двух глаз с оптическим дальномером, то для точного определения стереоскопического базиса этой системы нужно учитывать многие детали ее сложной оптико-механической конструкции. Несовпадение зрительной и оптической осей – это только один осложняющий момент. Как минимум, нужно еще учитывать несоответствие центра поворотов глаза с его геометрическим цен-

тром и наличие двух узловых точек оптики (даже в упрощенной схеме глаза).

Один из выводов, сделанных на основе проведенных измерений, был следующим: “экспериментально установлено, что ощущаемое расстояние до мнимого изображения всегда меньше рассчитанного..., причем эта разница возрастает по мере увеличения  $p$ . При приближении отношения  $p/l$  к 1 расстояние до мнимого изображения стремится к бесконечности. В действительности же при  $p = l$  и даже при  $p/l > 1$  мнимое изображение видится на вполне определенном расстоянии... Исходя из расстояния до мнимого изображения, можно рассчитать угол конвергенции зрительных осей. Действительный угол конвергенции всегда будет больше рассчитанного, а разница между этими углами будет возрастать при увеличении отношения  $p/l$ .”

В тексте книги приводятся умоглядные соображения по поводу этих озадачивающих фактов, но их легко понять, если учесть имеющиеся данные о величине угла между зрительной и оптической осью глаза. У большинства людей направление зрительной оси каждого глаза в пространстве несколько отклонено от направления оптической оси в сторону носа, так что зрительные оси пересекаются ближе к лицу, чем оптические. Это обстоятельство на качественном уровне объясняет обсуждаемые результаты без привлечения гипотетических механизмов анализа параметров формирующихся образов. Что касается количественных оценок, то для их обсуждения не хватает необходимых данных. Очевидно, что получаемые экспериментальные данные должны варьировать в соответствии с индивидуальными значениями углов между зрительными и оптическими осями. Кстати, можно высказать предположение, что описанные в выводах закономерности соблюдались не всегда, поскольку встречаются люди и с противоположным направлением отклонения зрительной оси от оптической (по отношению к указанному выше типичному отклонению).

Энтузиасты использования бинариметра в офтальмологии даже создали отдельное направление в диагностике и функциональном лечении бинокулярных расстройств, описанное в монографии “Теоретическая и клиническая бинариметрия” (Бачалдина и др., 2006). У этого прибора действительно есть свои специфические достоинства. Однако мы не нашли явных оснований для того, чтобы отдавать бинариметру предпочтительное перед другими приборами с аналогичными возможностями или перед интерактивными компьютерными программами с имитацией как существовавших ранее диагностических и лечебных приборных процедур, так и новых, которые невозможно было реализовать без использования

современной компьютерной техники и стереотехнологий. Естественно думать, что у каждого прибора и метода есть своя область рационального применения, и нужно это учитывать. Более того, совершенно очевидно, что со временем сравнительная ценность разных средств не может не меняться в соответствии с очередными научными открытиями и техническим прогрессом.

#### Заключительные замечания

Ретроспективный анализ разноплановых научных работ Л.Н. Могилева по исследованию механизмов пространственного зрения показывает, что их уровень соответствовал уровню исследований, проводимых за рубежом, как в теоретическом плане, так и в отношении методологии экспериментов и практического применения полученных результатов. Конкретные достижения и их значение для формирования адекватного представления о структурно-функциональной системе пространственного зрения человека отмечены в каждом разделе статьи.

К сожалению, многие работы Л.Н. Могилева прерывались в фазе развития, на которой становилась очевидной необходимость расширения и углубления исследований или появлялась идея относительно поворота в новом направлении. Очень жаль, что эти работы не были продолжены. В публикациях Л.Н. Могилева есть идеи, которые интересно и полезно было бы развивать и в настоящее время.

Естественное изменение текущих представлений, связанное с появлением новых концепций и экспериментальных данных, приводит к необходимости пересмотра ряда идей и открытий Л.Н. Могилева, их переоценки. Нет сомнения, что исследователи, пожелавшие заняться этой работой, найдут в наследии Л.Н. Могилева богатый материал и для переосмысления своей собственной работы.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы очень благодарны Л.Б. Лавровой и Е.В. Тимониной за поиск и сканирование публикаций Л.Н. Могилева в редких изданиях и Е.Н. Крутцовой за помощь в подготовке рисунков к печати.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бачалдина Л.Н., Гутник И.Н., Короленко А.В., Малышев В.В., Розанова О.И., Рычкова С.И., Соловьева В.В., Шуко А.Г. *Теоретическая и клиническая бинариметрия*. Новосибирск. 2006. 184 с.
- Васильева Н.Н., Рожкова Г.И. Возрастные изменения взаимодействия монокулярных и бинокулярных механизмов пространственного восприятия. *Сенсорные системы*. 2010. Т. 24 (1). С. 18–26.

- Компанейский Б.Н. Глубинные ощущения. Анализ теории раздражения не вполне соответствующих точек. *Вестник офтальмологии*. 1939. Т. 14 (1). С. 90–105.
- Могилев Л.Н. О пространственном зрительном эффекте при повторяющемся изображении. *Сборник докладов второй научной конференции физиологов, биохимиков и фармакологов Западно-Сибирского объединения, посвященной XXII съезду КПСС*. Томск. 1961. С. 95–96.
- Могилев Л.Н. Резервы нашего зрения. *Ангара*. 1963. Т. 2 (59). С. 40–41.
- Могилев Л.Н. Стереокинетический эффект как один из показателей функциональной организации зрительных центров. *Функционально-структурные основы системной деятельности и механизмы пластичности мозга. Сборник трудов Института мозга АМН СССР*. Москва. 1975. Вып. IV. С. 76–79.
- Могилев Л.Н. *Способ исследования пространственного зрения*. Авт. свидет. № 528929. Официальный бюллетень Государственного комитета Совета Министров СССР по делам изобретений и открытий. Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки. 1976. № 35. С. 11.
- Могилев Л.Н. *Бинариметр*. Авт. свидет. № 596220. Официальный бюллетень Государственного комитета Совета Министров СССР по делам изобретений и открытий. Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки. 1978а. № 8.
- Могилев Л.Н. О дифференцированном исследовании силовых взаимоотношений механизмов пространственного зрения. *Системные и клеточные механизмы регуляции физиологических функций. Межвузовский сборник*. Иркутск. 1978б. С. 4–9.
- Могилев Л.Н. *Пространственные зрительные эффекты как показатели функциональной организации зрительных центров*. Автореф. дисс. докт. биол. наук. М.: 1979. 52 с.
- Могилев Л.Н. *Механизмы пространственного зрения*. Л.: Наука, 1982. 112 с.
- Могилев Л.Н., Бояркина Л.В. Использование условно-рефлекторных показателей для характеристики стереокинетического эффекта у людей. *Системные и клеточные механизмы регуляции физиологических функций. Межвузовский сборник*. Иркутск. 1978. С. 10–14.
- Могилев Л.Н., Рычков И.Л. К вопросу об эволюции пространственного зрения. *Функционально-структурные основы системной деятельности и механизмы пластичности мозга. Сборник трудов Института мозга АМН СССР*. М., 1974а. Вып. III. С. 466–470.
- Могилев Л.Н., Рычков И.Л. *Устройство для определения пространственных зрительных эффектов*. Авт. свидет. № 4523317. 1974б. № 45. С. 13.
- Могилев Л.Н., Уфимцева Л.П. К вопросу о сравнительно-физиологическом исследовании механизмов пространственного зрения. *Системные и клеточные механизмы регуляции физиологических функций. Межвузовский сборник*. Иркутск. 1978. С. 20–24.
- Могилев Л.Н., Рычков И.Л., Бояркина Л.В. О взаимоотношениях бинокулярного и стереокинетического механизмов пространственного зрения. *Тезисы научных сообщений XIII Съезда физиологов*. Тбилиси. 1975. С. 73–74.
- Могилев Л.Н., Юнин В.Н. Рычков И.Л. Пространственный зрительный эффект, полученный от рисованных плоских подвижных изображений без использования стереопары. *Тезисы докладов V Всесоюзной конференции по нейрокибернетике*. Ростов-на-Дону. 1973. С. 206–207.
- Рожкова Г.И. Автостереограммы: особенности структуры, условия успешного восприятия и практическое использование. *Стереозрение человека и стереотехнологии. Методическое пособие*. Под ред. Г.И. Рожковой. М.: ООО “КУНА”. 2022а. С. 130–137.
- Николаев П.П. Модели константного зрительного восприятия. *Интеллектуальные процессы и их моделирование*. М.: Наука, 1987. С. 300–350.
- Рожкова Г.И. Автостереограммы: особенности структуры, условия успешного восприятия и практическое использование. *Стереозрение человека и стереотехнологии. Методическое пособие*. Под ред. Г.И. Рожковой. М.: ООО “КУНА”, 2022а. Р. 130–137.
- Рожкова Г.И. Случайно-точечные стереограммы: уникальные инструменты для изучения, оценки и тренировки бинокулярных механизмов восприятия глубины. *Стереозрение человека и стереотехнологии. Методическое пособие*. Под ред. Г.И. Рожковой. М.: ООО “КУНА”, 2022б. С. 123–129.
- Рожкова Г.И., Васильева Н.Н. Взаимодействие бинокулярного и стереокинетического механизмов восприятия глубины у детей с нормальным и нарушенным бинокулярным зрением. *Сенсорные системы*. 2001. Т. 15 (1). С. 61–68.
- Рычков И.Л. *О взаимоотношении бинокулярного и стереокинетического механизмов пространственного зрения*. Автореф. дисс. канд. биол. наук. Иркутск. 1974. 23 с.
- Рычков И.Л. *Многоуровневая функциональная организация пространственного зрения в результативной деятельности животных и человека*. Дисс. докт. биол. наук. Иркутск. 1985. 383 с.
- Aschenbrenner C.M. Problems in getting information into and out of air photographs. *Photogram Engin.* 1954. V. 20. P. 398–401.
- Bergua A., Skrandies W. An early antecedent to modern random dot stereograms – ‘the secret stereoscopic writing’ of Ramon y Cajal. *Int J Psychophysiol.* 2000. V. 36. P. 69–72. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(99\)00111-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(99)00111-7)
- Brewster D. On the knowledge of distance given by binocular vision. *Trans Roy Soc Edinb.* 1844а. V. 15. P. 663–674.
- Brewster D. On the law of visible position in single and binocular vision and on the representation of solid figures by the union of dissimilar plane pictures on the retina. *Trans Roy Soc Edinb.* 1844b. V. 15. P. 349–368.
- Fisher G.T. Factors affecting estimation of depth with variations of stereokinetic effect. *Amer. J. Physiol.* 1956. V. 69. P. 252–257.

- Goethe J.W. *Zur Farbenlehre*. Tübingen. English translation in Matthaei R 1971 Goethe's color theory. 1810. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Howard I.P. *Perceiving in depth. Volume 1. Basic mechanisms*. Oxford university press, 2012a. 664 p.
- Howard I.P., Rogers B.J. *Perceiving in depth. Volume 2: Stereoscopic vision*. Oxford university press. 2012. 635 p.
- Howard I.P. *Perceiving in depth. Volume 3. Other mechanisms of depth perception*. Oxford university press, 2012b. 392 p.
- Julesz B. Binocular depth perception of computer-generated patterns. *Bell Syst Techn J*. 1960. V. 39 (5). P. 1125–1162.  
<https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1960.tb03954.x>
- Julesz B. Binocular depth perception without familiarity cues. *Science*. 1964. V.145. P. 356–362.  
<https://doi.org/10.1126/science.145.3630.356>
- Julesz B. *Foundations of cyclopean perception*. Chicago: Univ. Chicago Press, 1971. 406 p.
- Kramer P., Stefano V., Bressan P. Stereokinetic effect, kinetic depth effect, and structure from motion. *The Oxford handbook of perceptual organization*. Oxford: Oxford University Press, 2014. 521–540.  
<https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199686858.013.053>
- Locke J. On single and double vision produced by viewing objects with both eyes: and on an optical illusion with regard to the distance of objects. *Am J Sci Arts*. 1849. V. 7. P. 68–74.
- Logvinenko A.D., Belopolskii V.I. Convergence as a cue for distance. *Perception*. 1994. V. 23 (2). P. 207–217.  
<https://doi.org/10.1068/p230207>
- Logvinenko A.D., Epelboim J., Steinman R.M. The role of vergence in the perception of distance: a fair test of Bishop Berkeley's claim. *Spatial Vision*. 2001. V. 15 (1). P. 77–97.  
<https://doi.org/10.1163/1568568015269202>
- Marr D.A. *Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*. N.Y., W.H. Freeman & Company. 1982. 415 p.
- Meyer H. Über die Schätzung der Grosse und Entfernung. *Poggendorfs Ann Physik Chem*. 1852. V. 25. P. 198–207.
- Mefferd R.B., Wieland B.A. Perception of depth in rotating objects: Perspective as a determinant of a stereogenesis. *Percept. and Motor Skills*. 1967. V. 25. P. 621–628.
- Mogylev L.N., Rytchkov I.L., Rizzolatti G. Alcune osservazioni sui fenomeni stereocinetici. *Boll. Soc. It. Biol. Sper*. 1978. V. LIV. P. 1763–1768.
- Musatti C.L. Sui fenomeni stereocinetici. *Archivio Italiano di Psicologia*. 1924. V. 3. P. 105–120.
- Musatti C.L. Forma e assimilazione [Shape and assimilation]. *Archivio Italiano di Psicologia*. 1931. V. 9. P. 61–156.
- Ono H., Mitson L., Seabrook K. Change in convergence and retinal disparities as an explanation for the wallpaper phenomenon. *Journal of Experimental Psychology*. 1971. V. 91 (1). P. 1–10.  
<https://doi.org/10.1037/h0031795>
- Peck D. *Stereoscopic patterns and method of making same*. 1979. US Patent 4135502.
- Proffitt D., Rock I., Hecht H., Schubert J. Stereokinetic effect and its relation to the kinetic depth effect. *Journal of Experimental Psychology*. 1992. V. 18 (1). P. 3–21.  
<https://psycnet.apa.org/doi/10.1037/0096-1523.18.1.3>
- Ramon y Cajal S. Recreaciones estereoscópicas y binoculares. *La Fotografía*. 1901. V. 27. P. 41–48.
- Sawada T., Rozhkova G.I. Two rediscoveries of the autostereogram in the 1960s. *i-Perception*. 2020. V. 11 (1). P. 1–5.  
<https://doi.org/10.1177/2041669520908895>
- Smith R. *A complete system of optiks in four books*. 1738. Cambridge.
- Trent E. Stereo designs as an art form. *Bulletin of the Stereoscopic Society*. 1972. V. 37. P. 7–10.
- Tyler C. Autostereogram. *Scholarpedia*, 2014. 9 (4):9229.  
<https://doi.org/10.4249/scholarpedia.9229>
- Tyler C.W., Clarke M.B. Autostereogram. *Stereoscopic Displays and Applications. Proc. SPIE*. 1990. V. 1258. P. 182–196.  
<https://doi.org/10.1117/12.19904>
- Wallach H., Centrella N.M. Identity imposition and its role in a stereokinetic effect. *Perception and Psychophysics*. 1990. V. 48 (6). P. 535–542.  
<https://doi.org/10.3758/BF03211599>
- Ullman S. *The Interpretation of Visual Motion*. MIT Press, Cambridge, Mass. 1979. 229 p.

## L. N. Mogilev's contribution to the research of the spatial vision mechanisms (to the 100th anniversary of the birth)

P. P. Nikolaev<sup>a,#</sup>, G. I. Rozhkova<sup>a</sup>, and M. A. Gracheva<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Institute for Information Transmission Problems (Kharkevich Institute) Russian Academy of Sciences,  
127051 Bolshoy Karetny per. 19, build. 1, Moscow, Russia

<sup>#</sup>E-mail: nikol@iitp.ru

In the 60s of the last century, L.N. Mogilev at the Irkutsk State University launched a multifaceted large-scale work on the study of the spatial vision mechanisms which corresponded to the latest achievements and trends of the then science of vision both in terms of the methodological level and the choice of theoretical and experimental problems. Unfortunately, this work was carried out largely in isolation and was poorly presented at international conferences. As a result, many important findings of these studies and even L.N. Mogilev's

monograph “Mechanisms of Spatial Vision” (1982) remained unknown to most members of the scientific community involved in the development of methods for studying and theories of visual spatial perception, and were not included even in sufficiently detailed and complete foreign review editions. Perhaps this is also due to the fact that L.N. Mogilev himself in his publications paid insufficient attention to the work of his foreign predecessors and colleagues who carried out similar studies simultaneously with him. In connection with the anniversary date – the 100th anniversary of the birth of L.N. Mogilev – it seems important and useful to recall the most interesting works of this remarkable scientist and analyze them in context with similar earlier and parallel studies. In this article, an attempt is made to discuss the works of L.N. Mogilev in the field of spatial vision, highlighting the areas of research that most closely intersect with the studies and works of foreign authors who have received wide popularity and recognition.

*Key words:* L.N. Mogilev, mechanisms of spatial vision, stereokinetic effect, autostereogram, binarimeter

## REFERENCES

- Bachaldina L.N., Gutnik I.N., Korolenko A.V., Malyshev V.V., Rozanova O.I., Rychkova S.I., Solov'eva V.V., Shchuko A.G. *Teoreticheskaya i klinicheskaya binarimetriya* [Theoretical and clinical binarimetry]. Novosibirsk. 2006. 184 p.
- Vasil'eva N.N., Rozhkova G.I. Vozrastnye izmeneniya vzaimodeistviya monokulyarnykh i binokulyarnykh mekhanizmov prostranstvennogo vospriyatiya [Age dynamics of interaction between monocular and binocular mechanisms of spatial perception]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2010. V. 24 (1). P. 18–26.
- Kompaneiskii B.N. Glubinnye oshchushcheniya. Analiz teorii razdrzheniya ne vpolne sootvetstvuyushchikh tochek [Depth perception. Analysis of the theory of excitation of not quite corresponding points.]. *Vestnik oftalmologii* [The Russian Annals of Ophthalmology]. 1939. V. 14 (1). P. 90–105. (in Russian).
- Mogilev L.N. O prostranstvennom zritel'nom effekte pri povtorjajushchemsja izobrazhenii [On the spatial visual effect with a repeated image]. *Sbornik dokladov vtoroi nauchnoi konferentsii fiziologov, biokhimikov i farmakologov Zapadno-Sibirskogo ob"edineniya, posvyashchennoi XXII s"ezdu KPSS*. Tomsk. 1961. P. 95–96. (in Russian).
- Mogilev L.N. Rezervy nashego zreniya [Reserves of our vision]. *Angara*. 1963. V. 2 (59). P. 40–41. (in Russian).
- Mogilev L.N. Stereokineticeskii ehffekt kak odin iz pokazatelei funktsional'noi organizatsii zritel'nykh tse ntrov [Stereokinetic effect as one of the indicators of the functional organization of visual centers.]. *Funktsional'no-strukturnye osnovy sistemnoi deyatel'nosti i mekhanizmy plastichnosti mozga. Sbornik trudov Instituta mozga AMN SSSR*. Moskva. 1975. V. IV. P. 76–79. (in Russian).
- Mogilev L.N. *Sposob issledovaniya prostranstvennogo zreniya* [A method for studying spatial vision]. Certificate of authorship № 528929. Ofitsial'nyi byulleten' Gosudarstvennogo komiteta Soveta Ministrov SSSR po delam izobretenii i otkrytii. Otkrytiya, izobreteniya, promyshlennye obraztsy, tovarnye znaki. 1976. V. 35. P. 11. (in Russian).
- Mogilev L.N. *Binarimetr*. [Binarimeter]. Avtorskoe svidetel'stvo No 596220. Ofitsial'nyi byulleten'. 1978a. No 8. (in Russian).
- Mogilev L.N. O differentsirovannom issledovanii silovykh vzaimootnoshenii mekhanizmov prostranstvennogo zreniya [On a differentiated study of the power relationships of the mechanisms of spatial vision]. *Sistemnye i kletochnye mekhanizmy regulyatsii fiziologicheskikh funktsii. Mezhhuzovskii sbornik*. Irkutsk. 1978b. P. 4–9. (in Russian).
- Mogilev L.N. *Prostranstvennye zritel'nye ehffekty kak pokazatelei funktsional'noi organizatsii zritel'nykh tse ntrov* [Spatial visual effects as indicators of the functional organization of visual centers]. Abstract of PhD thesis. Moscow. 1979. 49 p. (in Russian).
- Mogilev L.N. *Mekhanizmy prostranstvennogo zreniya* [Mechanisms of spatial vision]. L.: Nauka. 1982. 112 p. (in Russian).
- Mogilev L.N., Boyarkina L.V. Ispol'zovanie uslovno-reflektornykh pokazatelei dlya kharakteristiki stereokineticeskogo ehffekta u lyudei [The use of reflexive indicators to characterize the stereokinetic effect in humans]. *Sistemnye i kletochnye mekhanizmy regulyatsii fiziologicheskikh funktsii. Mezhhuzovskii sbornik*. Irkutsk. 1978. P. 10–14. (in Russian).
- Mogilev L.N., Rychkov I.L. K voprosu ob ehvolyutsii prostranstvennogo zreniya [On the question of the evolution of spatial vision]. *Funktsional'no-strukturnye osnovy sistemnoi deyatel'nosti i mekhanizmy plastichnosti mozga. Sbornik trudov Instituta mozga AMN SSSR*. Moskva, 1974. V. III. P. 466–470. (in Russian).
- Mogilev L.N., Rychkov I.L. *Ustroistvo dlya opredeleniya prostranstvennykh zritel'nykh ehffektov* [A device for determining spatial visual effects]. Certificate of authorship № 4523317. 1974. № 45. P. 13. (in Russian).
- Mogilev L.N., Rychkov I.L., Boyarkina L.V. O vzaimootnosheniyakh binokulyarnogo i stereo-kineticeskogo mekhanizmov prostranstvennogo zreniya [On the relationship between binocular and stereo-kinetic mechanisms of spatial vision]. *Tezisy nauchnykh soobshchenii XII S"ezda fiziologov*. Tbilisi. 1975. P. 73–74. (in Russian).
- Mogilev L.N., Ufimtseva L.P. K voprosu o sravnitel'no-fiziologicheskom issledovanii mekhanizmov prostranstvennogo zreniya [On the question of comparative physiological study of mechanisms of spatial vision].

- tvennogo zreniya [To the question of the comparative physiological study of the mechanisms of spatial vision]. *Sistemnye i kletochnye mekhanizmy regulyatsii fiziologicheskikh funktsii. Mezhdvuzovskii sbornik*. Irkutsk. 1978. P. 20–24. (in Russian).
- Mogilev L.N., Yunin V.N., Rychkov I.L., Prostranstvennyi ehffekt, poluchennyi ot risovannykh ploskikh podvizhnykh izobrazhenii bez ispol'zovaniya stereopary [A spatial effect obtained from hand-drawn flat moving images without the use of a stereopair]. *Tezisy dokladov V Vsesoyuznoi konferentsii po neirokibernetike*. Rostov-na-Donu. 1973. P. 208. (in Russian).
- Nikolayev P.P. *Modeli konstantnogo zritel'nogo vospriyatiya. Intellektual'nye protsessy i ih modelirovaniye*. [Models of constant visual perception.] M., Nauka, 1987. P. 300–350. (in Russian).
- Rozhkova G.I. *Avtostereogrammy: osobennosti struktury, usloviya uspehnogo vospriyatiya i prakticheskoe ispol'zovanie* [Autostereograms: structural features, conditions of successful perception and practical usage]. *Stereozrenie cheloveka i stereotekhnologii. Metodicheskoe posobie*. Ed. G.I. Rozhkova. M.: OOO "KUNA". 2022a. P. 130–137. (in Russian).
- Rozhkova G.I. Sluchaino-tochechnye stereogrammy: unikal'nye instrumenty dlya izucheniya, otsenki i trenirovki binokulyarnykh mekhanizmov vospriyatiya glubiny [Random-dot stereograms: the unique tools for studying, testing, and training brain mechanisms of binocular depth perception]. *Stereozrenie cheloveka i stereotekhnologii. Metodicheskoe posobie*. Ed. G.I. Rozhkova. M.: OOO "KUNA". 2022b. P. 123–129. (in Russian).
- Rozhkova G.I., Vasil'eva N.N. Vzaimodeistvie binokulyarnogo i stereokineticheskogo mekhanizmov vospriyatiya glubiny u detei s normal'nym i narushennym binokulyarnym zreniem [Interaction of binocular and stereokinetic depth mechanisms in children with normal and impaired binocular vision]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2001. V. 15 (1). P. 61–68. (in Russian).
- Rychkov I.L. *O vzaimootnoshenii binokulyarnogo i stereokineticheskogo mekhanizmov pro-stranstvennogo zreniya* [On the relationship between binocular and stereokinetic mechanisms of spatial vision]. Abstract of PhD thesis. Irkutsk. 1974. 23 p. (in Russian).
- Rychkov I. L. *Mnogourovnevaya funktsional'naya organizatsiya prostranstvennogo zreniya v rezul'tativnoi deyatelnosti zhivotnykh i cheloveka* [Multilevel functional organization of spatial vision in the productive activity of animals and humans]. Diss. dokt. biol. nauk. Irkutsk. 1985. 383 p. (in Russian).
- Aschenbrenner C.M. Problems in getting information into and out of air photographs. *Photogram Engin.* 1954. V. 20. P. 398–401.
- Bergua A., Skrandies W. An early antecedent to modern random dot stereograms – 'the secret stereoscopic writing' of Ramon y Cajal. *Int J Psychophysiol.* 2000. V. 36. P. 69–72. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(99\)00111-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(99)00111-7)
- Brewster D. On the knowledge of distance given by binocular vision. *Trans Roy Soc Edinb.* 1844a. V. 15. P. 663–674.
- Brewster D. On the law of visible position in single and binocular vision and on the representation of solid figures by the union of dissimilar plane pictures on the retina. *Trans Roy Soc Edinb.* 1844b. V. 15. P. 349–368.
- Fisher G.T. Factors affecting estimation of depth with variations of stereokinetic effect. *Amer. J. Physiol.* 1956. V. 69. P. 252–257.
- Goethe J.W. *Zur Farbenlehre*. Tubingen. English translation in Matthaer R 1971 Goethe's color theory. 1810. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Howard I.P. *Perceiving in depth. Volume 1. Basic mechanisms*. Oxford university press, 2012a. 664 p.
- Howard I.P., Rogers B.J. *Perceiving in depth. Volume 2: Stereoscopic vision*. Oxford university press. 2012. 635 p.
- Howard I.P. *Perceiving in depth. Volume 3. Other mechanisms of depth perception*. Oxford university press, 2012b. 392 p.
- Julesz B. Binocular depth perception of computer-generated patterns. *Bell Syst Techn J.* 1960. V. 39 (5). P. 1125–1162. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1960.tb03954.x>
- Julesz B. Binocular depth perception without familiarity cues. *Science.* 1964. V. 145. P. 356–362. <https://doi.org/10.1126/science.145.3630.356>
- Julesz B. *Foundations of cyclopean perception*. Chicago: Univ. Chicago Press, 1971. 406 p.
- Kramer P., Stefano V., Bressan P. Stereokinetic effect, kinetic depth effect, and structure from motion. *The Oxford handbook of perceptual organization*. Oxford: Oxford University Press, 2014. 521–540. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199686858.013.053>
- Locke J. On single and double vision produced by viewing objects with both eyes: and on an optical illusion with regard to the distance of objects. *Am J Sci Arts.* 1849. V. 7. P. 68–74.
- Logvinenko A.D., Belopolskii V.I. Convergence as a Cue for Distance. *Perception.* 1994. V. 23 (2). P. 207–217. <https://doi.org/10.1068/p230207>
- Logvinenko A.D., Epelboim J., Steinman R.M. The role of vergence in the perception of distance: a fair test of Bishop Berkeley's claim. *Spatial Vision.* 2001. V. 15 (1). P. 77–97. <https://doi.org/10.1163/1568568015269202>
- Marr D.A. *Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*. N.Y., W.H. Freeman & Company. 1982. 415 p.
- Mefferd R.B., Wieland B.A. Perception of depth in rotating objects: Perspective as a determinant of stereopsis. *Perception and Motor Skills.* 1967. V. 25. P. 621–628.
- Meyer H. Uber die Schatzung der Grosse und Entfernung. *Poggendorfs Ann Physik Chem.* 1852. V. 25. P. 198–207.
- Mogylev L.N., Rytchkov I.L., Rizzolatti G. Alcune osservazioni sui fenomeni stereocinetici. *Boll. Soc. It. Biol. Sper.* 1978. V. LIV, P. 1763–1768.

- Musatti C.L. Sui fenomeni stereokinetici. *Archivio Italiano di Psicologia*. 1924. V. 3. P. 105–120.
- Musatti C.L. Forma e assimilazione [Shape and assimilation]. *Archivio Italiano di Psicologia*. 1931. V. 9. P. 61–156.
- Ono H., Mitson L., Seabrook K. Change in convergence and retinal disparities as an explanation for the wallpaper phenomenon. *Journal of Experimental Psychology*. 1971. V. 91 (1). P. 1–10.  
<https://doi.org/10.1037/h0031795>
- Peck D. *Stereoscopic patterns and method of making same*. 1979. US Patent 4135502.
- Proffitt D., Rock I., Hecht H., Schubert J. Stereokinetic effect and its relation to the kinetic depth effect. *Journal of Experimental Psychology*. 1992. V. 18 (1). P. 3–21.  
<https://psycnet.apa.org/doi/10.1037/0096-1523.18.1.3>
- Ramon y Cajal S. Recreaciones estereoscópicas y binoculares. *La Fotografía*. 1901. V. 27. P. 41–48.
- Sawada T., Rozhkova G.I. Two rediscoveries of the autostereogram in the 1960s. *i-Perception*. 2020. V. 11 (1). P. 1–5. <https://doi.org/10.1177/2041669520908895>
- Smith R. *A complete system of optiks in four books*. 1738. Cambridge.
- Trent E. Stereo designs as an art form. *Bulletin of the Stereoscopic Society*. 1972. V. 37. P. 7–10.
- Tyler C. Autostereogram. *Scholarpedia*, 2014. 9 (4):9229. <http://dx.doi.org/10.4249/scholarpedia.9229>
- Tyler C.W., Clarke M.B. Autostereogram. *Stereoscopic Displays and Applications. Proc. SPIE*. 1990. V. 1258. P. 182–196. <https://doi.org/10.1117/12.19904>
- Wallach H., Centrella N.M. Identity imposition and its role in a stereokinetic effect. *Perception and Psychophysics*. 1990. V. 48 (6). P. 535–542.  
<https://doi.org/10.3758/BF03211599>
- Ullman S. *The Interpretation of Visual Motion*. MIT Press, Cambridge, Mass. 1979. 229 p.

УДК 159.953.3

## ОБРАБОТКА И ЗАПОМИНАНИЕ НЕВЕРБАЛЬНОГО БЕССМЫСЛЕННОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ ВРЕМЕНИ ЭКСПОЗИЦИИ

© 2022 г. Л. В. Черемошкина<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> Московский педагогический государственный университет  
119991 Москва, ул. Малая Пироговская, д. 1, стр. 1, Россия

<sup>2</sup> Государственный гуманитарно-технологический университет  
142611 Московская обл., г. Орехово-Зуево, ул. Зеленая, д. 22, Россия

\*E-mail: LVCH2007@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.03.2022 г.

После доработки 15.06.2022 г.

Принята к публикации 30.06.2022 г.

Статья содержит обобщенные данные, полученные в течение последних 35 лет при помощи метода развертывания мнемической деятельности, который разработан для исследования памяти лиц разного возраста. Осуществлено несколько серий экспериментального исследования качественного своеобразия обработки тестовой фигуры (ТФ) из четырех пересекающихся линий, предъявляемой для запоминания испытуемым разного возраста (7–80 лет). Экспериментальный материал экспонировали дробно: в первых десяти предъявлениях экспозиция ТФ составляла 1 с, во втором – 2 с, в третьем – 3 с, и так далее. После каждой экспозиции испытуемый по памяти воспроизводил на бумаге предъявленную ему ТФ. При суммарном времени предъявления ТФ в пределах 4 с сложных способов ее анализа, требующих развернутых мыслительных операций, не зафиксировано. По-видимому, период 4 с можно отнести к этапу сенсорно-перцептивной обработки, которая совершается на уровне неосознаваемых (относительно неосознаваемых) перцептивных и мнемических процессов и предполагает выделение элементов стимула, фиксацию соотношения линий, определение характера пересечений и ориентации фигуры на плоскости. Отсутствие осмысленной категоризации ТФ из четырех пересекающихся линий, предъявляемой по одной секунде от 1 до 4 раз, дает основания рассматривать временной интервал до 4 с в качестве периода неосознаваемой обработки невербального бессмысленного материала. Суммарную длительность экспозиции, составляющую 4 с, можно рассматривать в качестве условной границы неосознаваемой (относительно неосознаваемой) и осознаваемой обработки данного невербального бессмысленного материала в процессе его произвольного запоминания.

*Ключевые слова:* запоминание, запечатление, невербальный бессмысленный материал, 4 с как граница осознаваемой и относительно неосознаваемой обработки запоминаемого материала, метод развертывания мнемической деятельности, память, категоризация

DOI: 10.31857/S0235009222040023

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из ключевых проблем когнитивных наук является определение условий и механизмов обработки запоминаемой информации. Скорость и точность запоминания обусловлены скоростью и точностью категоризации субъективного образа поступающей информации, и эффективностью функциональной системы мнемических способностей. Результативность мнемических процессов зависит от связей между модулями интеллектуальных операций и функциональной основы памяти. Природная основа памяти в наибольшей степени проявляется в точности и прочности запечатления как относительно неосознаваемого, “мгновенного”, запоминания. Запечатление вос-

принятой информации может превратиться в процесс запоминания при помощи многоуровневой ее обработки. Точность запоминания и длительность хранения образа воспринятой информации обусловлены глубиной сознательной обработки. Произвольно регулируемая умственная активность в процессе запоминания направлена на то, чтобы воспринимаемый материал мог быть воспроизведенным в будущем. При наличии соответствующей цели субъект вынужден предпринимать усилия по “присвоению” воспринимаемой информации. Умственные действия, сопровождающие в этом случае мнемический процесс, называются обработкой запоминаемого материала. Обработка запоминаемой информации совершается с разной долей участия сознания. Катего-

ризация образа происходит почти мгновенно и развернутого анализа предъявляемого материала не предполагает (Ярбус, 1965; Глезер, 1966; Шехтер, 1978; Зинченко, Вергилес, 1969; Ганзен, 1974; Зинченко, Величковский, Вучетич, 1980; Розов, 1980; Величковский, 1985; Зинченко, 2002; Барабанщиков, 2006) и вызывает ориентировочные действия, составляющие основу любой деятельности. Однако и творческая, и любая исполнительская деятельность предполагают не только ориентировку в материале, но и планирование, контроль и предвидение будущих результатов. При столкновении с проблемой, например, с необходимостью запомнить и воспроизвести незнакомый бессмысленный материал в условиях ограниченного времени его экспозиции, испытуемый неминуемо начинает его анализировать. Способы обработки запоминаемого материала могут быть различными. Это зависит как от субъективных факторов (уровня развития памяти, типологических характеристик интеллекта, продуктивности и уровня развития перцептивных, мыслительных и аттенционных способностей), так и от объективных, в частности, длительности экспозиции экспериментального материала и его объема. Различного рода группировки, выделение опорных пунктов, установление последовательностей и классификации изучались на протяжении всей истории экспериментальной психологии памяти. На сегодняшний день подробно описано 13 мнемических приемов (ассоциации, группировки, мнемический план, выделение опорного пункта, аналогии, сериации, готовые мнемотехники, привнесения, перекодирование, классификации, структурирование, систематизация, повторение), которые могут употребляться с различной долей участия сознания (Черемошкина, 1987; 1988; 2000; 2002; 2009). Например, ассоциация как относительно неосознаваемое установление связи воспринимаемого материала с чем-либо знакомым, сопровождает процесс категоризации, но не всегда может способствовать его запоминанию. Незнакомый материал требует выделения его элементов, связей между элементами, принципиальных, основных и вспомогательных компонентов материала, несущих смысловую нагрузку или нет, сложных для воспроизведения или относительно простых, иначе говоря, активного анализа. Успешность обработки подлежащего запоминанию бессмысленного материала обусловлена не только уровнем развития перцептивных и мыслительных операций, но и спецификой имеющихся у субъекта способов (форм) репрезентации поступающей информации. Точность и скорость разложения незнакомого зрительного материала на части зависит и от уровня развития операций анализа, синтеза, сравнения, обобщения, абстрагирования, конкретизации, и от зрелости репрезентационных структур (наличия или

отсутствия понятийного мышления), иначе говоря, от уровня развития интеллектуального “багажа”.

Результативность запоминания значимо зависит от того, какими содержательными образованиями оперирует испытуемый: наглядными или абстрактными образами, отдельными вербальными обозначениями или словосочетаниями, ассоциациями или понятиями. Чем выше уровень развития интеллекта, тем выше вероятность при решении любой мнемической задачи. Интеллект и память функционируют как “вложенные друг в друга” открытые системы (Черемошкина, 2000; 2002; 2009). Указанная тенденция проявилась при экспериментальном изучении памяти испытуемых разного возраста в процессе применения метода развертывания мнемической деятельности. Ее можно назвать объективной закономерностью, которая предполагает конкретизацию в зависимости от целого ряда индивидуальных характеристик, проявляющихся неосознаваемо (относительно неосознаваемо) и осознанно. Конкретизацию универсальной тенденции при анализе результатов отдельно взятого испытуемого можно назвать собственно психологическим контекстом ее рассмотрения: субъектно-деятельностным и субъективно-личностным.

С одной стороны, собственно психологические закономерности, конкретизирующие объективные тенденции, обусловлены продуктивностью и качественным своеобразием перцептивных способностей, продуктивностью способностей к запечатлению, спецификой когнитивных стилей (полезависимостью – полнезависимостью, аналитичностью – синтетичностью), а с другой, – тем, что принято называть способами управления умственными процессами. В теории мнемических способностей эти образования называются регулируемыми механизмами (Черемошкина 1988; 2000; 2002; 2009). Регулирующие механизмы мнемических процессов представляют собой системное взаимодействие процессов ориентировки, планирования, принятия решения, контроля, оценки, коррекции и антиципации будущих результатов с мотивами, эмоциями, я-концепцией, волей, другими словами, с личностной регуляцией поведения и деятельности. Развертывание регулирующих действий не может совершаться мгновенно, их применение требует времени. Это означает, что углубленное, осознанное, запоминание является более длительным процессом, нежели относительно неосознаваемое запечатление информации. Условия включения в процесс познания способов обработки материала весьма разнообразны, а последствия противоречивы. Чем глубже анализ предъявляемого стимула, тем длительнее процесс его запоминания. Если процесс запоминания удлиняется, то качество

воспроизведения улучшается, но производительность памяти, а также интеллектуальной активности в целом, снижается. Возникает закономерный вопрос о существовании количественных показателей, которые могли бы обозначить границы неосознаваемой (относительно неосознаваемой) и осознаваемой обработки материала в процессе его запоминания.

Количественные показатели функционирования и развития когнитивных процессов являются предметом изучения различных отраслей психологической науки. Полуторавековая история экспериментальных исследований памяти содержит множество эмпирических данных результативности запоминания в зависимости от целей и характера деятельности (Смирнов, 1987; Зинченко, 1961; Craik, Lockhart, 1972; Флорес, 1973; Солсо, 1996), условий ее выполнения (Сперлинг, 1967; Miller, 1956; Найсер, 1981; Баддли, Айзенк, Андерсон, 2011; Линдсей, Норман, 1974), вида экспериментального материала (Зинченко, Величковский, Вучетич, 1980; Зинченко, 2002; Заика, Кузнецов, 1989; Величковский, 2006; Корж, Шпагонова, 1989; Корж, 2009), уровня умственного развития испытуемых (Леонтьев, 2021; Смирнов, 1987).

Однако количественные ориентиры, которые широко используют при объяснении закономерностей функционирования памяти, ограничиваются «магическим» числом  $7 \pm 2$  элемента Дж. Миллера, как показателя объема кратковременной памяти, и знаменитой кривой забывания Г. Эббингауза (Флорес, 1973; Солсо, 1996).

Способы преобразования материала в процессе его запоминания имеют качественную специфику и различную результативную выраженность на разных этапах онтогенеза. Свойства и виды обработки запоминаемой информации исследованы в нашей работе при помощи метода развертывания мнемической деятельности. Показано, что скорость запоминания обусловлена продуктивностью запечатления и уровнем развития мнемических действий. Чем выше уровень развития мнемических действий, тем быстрее они включаются в процессы преобразования конкретной информации. Метод развертывания мнемической деятельности позволяет изучать качественное своеобразие процессов оперативной обработки информации и их эффективность благодаря нарастающей сложности и соответствующей процедуре предъявления тестового материала.

Многолетние исследования показали, что процессы обработки невербального бессмысленного материала являются многоуровневыми: от относительно неосознаваемых (например, группировки) до схематизации, классификаций, аналогий, от ассоциаций до интеллектуально емких приемов (например, структурирования), от про-

извольной концентрации сознания на стимуле в соответствии с инструкцией до развернутой регуляции с применением контролирующих, планирующих, корректирующих, оценочных и антиципирующих действий. В частности, установлено, что у испытуемых в возрасте 7–12 лет механизмы преобразования незнакомого материала в целях его запоминания ограничиваются, как правило, повторением и выделением опорных пунктов. Память подростков 13–14 лет и юношей при решении той же задачи отличается не только усложнением способов обработки, но и наличием регуляции процессов оперативного сохранения и преобразования информации. Следует подчеркнуть, что при использовании интеллектуально емких способов обработки материала время запоминания может увеличиваться. Показано, что скорость включения в процесс запоминания мнемических действий теснее связана с эффективностью решения интеллектуальных задач, нежели с прочностью долговременной памяти (Черемошкіна, 1988; 2000; 2002; 2009).

Цель настоящей статьи – обоснование временных показателей процесса запоминания, выделяющих этапы относительно неосознаваемой и осознаваемой обработки запоминаемого материала в условиях ограниченного времени его экспозиции. Объект исследования – мнемическая деятельность. Предмет исследования – соотношение скорости и точности запоминания невербального бессмысленного материала при ограниченном времени экспозиции и степени осознанности его обработки.

## ИСПЫТУЕМЫЕ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

В течение 1984–2019 гг. мною и под моим руководством обследовано более 1900 человек в возрасте 7–80 лет. В разных возрастных группах испытуемых число варьировало и составляло: у 7–8-летних – 120, у 9–10-летних – 120, у 11–12-летних – 400, у 13–14-летних – 260, у 15–17-летних – 270, у 18–20-летних – 360, у 21–22-летних – 250, у 31–40-летних – 30, у 41–55-летних – 30 и у 80-летних – 20.

Испытуемые в возрасте от 7 до 14 лет – школьники (Черемошкіна, 1988; 2000; Косунина, 2004; Черемошкіна, Осинина, 2019); 15–17-летние – школьники и учащиеся средних учебных заведений (Черемошкіна, 1988; 2000; Черемошкіна, Осинина, 2019); 18–22-летние – студенты вузов (Черемошкіна, 2002; 2009; Ковригина, 2004; Черемошкіна, Дюпина, 2013; Дюпина, 2015). Выбор школьников и студентов был сбалансирован по полу, возрасту и образованию.

Выборка 25–55-летних испытуемых отличалась менее четкой структурой по возрастному, половому и образовательному признакам. Все ис-

пытуемые 25–55 лет имели среднее специальное или высшее образование. Среди 25–30-летних было 47% мужчин и 53% женщин; при этом 25- и 30-летних – по пять человек, а остальных – по десять человек в каждой годичной группе. В выборке 31–40-летних было 46% мужчин и 54% женщин, 32-летних – двое, 33-летних и 35-летних – по пять человек, других возрастов – по три человека (Черемошкина, 2009; Шипихина, 2005). В выборке 41–55-летних было 45% мужчин и 55% женщин, 41- и 42-летних – по двое; 43-летних – четверо; 44-летних – двое; 46–55-летних – по пять человек.

Кроме того, были также исследованы мнемические способности у испытуемых в возрасте 80 лет (20 человек: 16 женщин и четверо мужчин), когнитивно сохранных, без явных патопсихологических признаков (Черемошкина, Молчанов, 2006).

Выборка формировалась на основе закономерностей онтогенеза памяти как системы организации информации, реализующейся разноразноуровневыми механизмами.

Метод развертывания мнемической деятельности, разработанный в середине 80-х годов прошлого века, позволяет вычленив продуктивность запечатления, время включения в процесс запоминания мнемических действий, набор применяемых способов запоминания и воспроизведения, умение субъекта управлять процессом запоминания, а также исследовать эффективность развитой мнемической деятельности. Развертывание мнемической деятельности представляет собой процесс включения специальных способов обработки запоминаемого материала, феноменологически проявляющийся в изменении ее продуктивности. Выделение этапов развертывания мнемической деятельности достигается за счет увеличения объема или усложнения запоминаемого материала, а также сокращения времени, отводимого на запоминание. Метод развертывания мнемической деятельности основан на использовании незнакомого испытуемым невербального бессмысленного материала нарастающей сложности, предъявляемого дискретно.

При малых периодах экспозиции стимула времени для развернутой обработки материала недостаточно. В этом случае субъект стремится к непосредственному запоминанию (запечатлению), в основе которого лежат генотипически и врожденно обусловленные механизмы памяти. Успешность запоминания с опорой на природные механизмы можно рассматривать в качестве первого показателя эффективности и уровня развития памяти. По мере увеличения времени экспозиции объем и точность запомненного материала будут расти вследствие развертывания мнемической деятельности, иначе говоря, включения в

процесс запоминания специальных приемов. Включение в процесс запоминания мнемических действий – это зона перехода от неосознаваемого (относительно неосознаваемого) к осознанному применению способов запоминания, другими словами, к развернутой мнемической деятельности, которая отличается индивидуально своеобразным операционным составом. Скорость перехода на новую стратегию запоминания характеризуется индивидуальной выраженностью и служит вторым показателем эффективности и уровня развития памяти. По мере увеличения времени экспозиции происходит изменение диапазона используемых мнемических действий. Количество мнемических действий и качественный их состав – третий показатель эффективности и уровня развития памяти. Умение использовать мнемические приемы характеризует наличие и степень выраженности регулирующих механизмов, что является четвертым показателем эффективности и уровня развития памяти. Результативность запоминания (объем, точность и скорость) благодаря генотипически и врожденно обусловленным механизмам, наличию мнемических действий и умению ими пользоваться может рассматриваться в качестве пятого показателя эффективности и уровня развития памяти.

Экспериментальный материал представлял собой десять фигур нарастающей сложности, состоящих из прямых пересекающихся линий (рис. 1).

Для того чтобы разработать максимально абстрактный экспериментальный материал, были сформулированы следующие принципы: отсутствие симметричности в расположении линий; невозможность вычленив однозначно законченной части изображения; максимизация числа пересечений линий при обязательном соблюдении первого и второго принципов.

Исследование мнемической деятельности для определения указанных выше показателей предполагает обоснование и опробование разных вариантов предъявления экспериментального материала. На основе теоретической и эмпирической проработки предложен следующий порядок: с 1- по 10-е предъявление использовать экспозицию в 1 с; с 11- по 20-е – 2 с; с 21- по 30-е – 3 с; и далее. Принципиальным вопросом является определение начального времени экспозиции стимула, которое должно быть необходимым и достаточным для формирования зрительного образа фигур нарастающей сложности испытуемыми разного возраста. Исследование условий формирования зрительных образов (Глезер, 1966; Ярбус, 1965), изучение микрогенеза зрительного образа (Завалова и др., 1980; Веккер, 1976; Зинченко, Вергилес, 1969), результаты хронометрического изучения зрительного восприятия (Ве-

личковский, 1985); исследования перцептивных процессов на ранних этапах онтогенеза (Запорожец и др., 1967), изучение условий и этапов процесса опознания (Глезер, 1966; Соколов, 1969; Шехтер, 1978; Грановская, 1974; Грановская, Беззная, 1974) предоставили основания для принятия решения о необходимом и достаточном для формирования субъективного образа невербального бессмысленного материала значений длительности его экспозиции в 1 с.

Целесообразность выбранной стратегии предъявления невербального бессмысленного материала для изучения продуктивности и качественной специфики разноуровневых механизмов мнемических способностей подтверждена пилотными исследованиями на разновозрастных выборках.

Полученные результаты пилотных исследований позволили заключить, что основным показателем определения продуктивности запечатления (относительно неосознаваемого запоминания) невербального бессмысленного материала является суммарное время запоминания фигуры № 2. Фигуры №№ 3–10 не поддаются запечатлению, для их запоминания требуется сознательный анализ пересечений и количества линий, ориентации фигуры на плоскости. На основе анализа показателей результативности, качественного своеобразия и уровня развития мнемической деятельности испытуемых разных возрастов были разработаны шкалы оценок продуктивности запоминания с опорой на природную память и взаимодействие модулей функциональных механизмов и мнемических действий.

Процедура эксперимента, направленного на определение продуктивности природной основы памяти, включает следующие этапы.

– Инструкция: “Сейчас я покажу карточку, на которой нарисована фигура, состоящая из прямых пересекающихся линий. Эту фигуру ты должен постараться запомнить, а потом нарисовать. Я буду показывать фигуру на короткий отрезок времени, если ты ее сразу не запомнишь, не волнуйся, я покажу ее еще раз, и мы будем повторять это столько раз, сколько потребуется для того, чтобы ты запомнил фигуру и нарисовал. Словом “внимание” я буду предупреждать тебя о том, что сейчас покажу карточку, и ты должен приготовиться. Когда я закрою карточку, можешь начать рисовать”. – Пробное задание с использованием фигуры № 1 (4–5 предъявлений). – Основное задание – запоминание фигуры № 2, дальше сокращенно обозначаемой как ТФ (тестовая фигура). – Опрос испытуемого (30 вопросов) в соответствии с методикой диагностики мнемических способностей: что запомнил; как запомнил; считал линии или нет; какие части фигуры выделил; старался ли повторить то, что запоминаешь; пытался ли назвать фигуру; если фигура показалась слож-

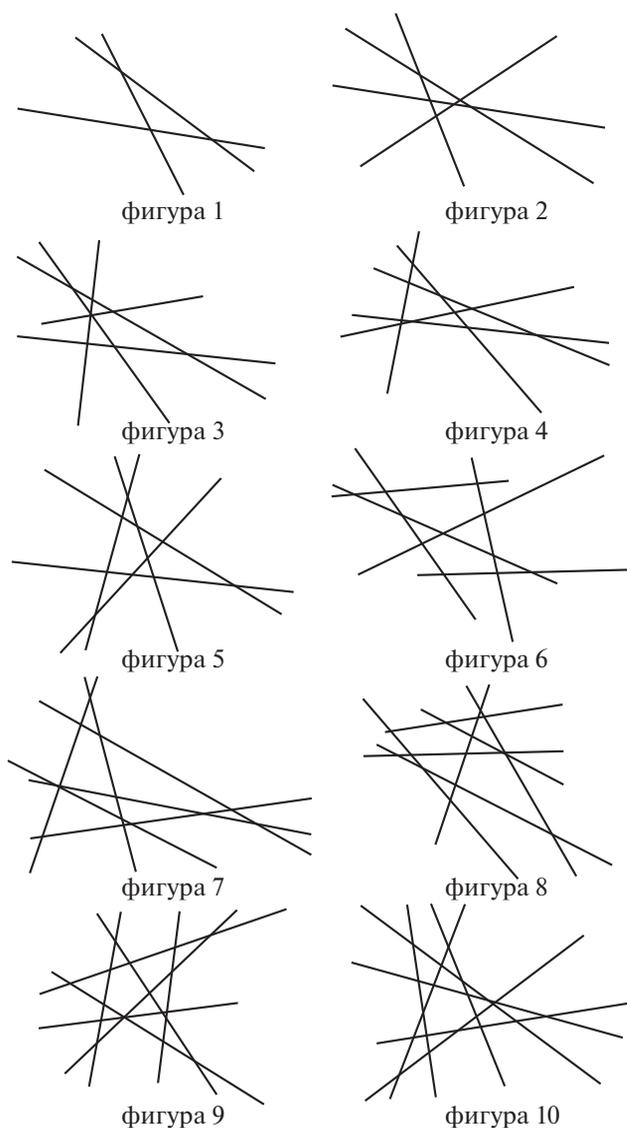


Рис. 1. Экспериментальный материал метода развертывания мнемической деятельности.

ной, пытался ли каким-либо образом ее упростить; пытался ли выделить треугольники, кресты или лучи на рисунке, и многое другое. Итак, при изучении продуктивности природной основы памяти фиксировались: суммарное время запоминания ТФ до первого правильного воспроизведения; наличие осознанной обработки ТФ по материалам опроса испытуемого; характер рисунка и его динамика в процессе приближения к правильному воспроизведению.

Тестовая фигура считается правильно воспроизведенной, если оригиналу соответствуют: количество линий; количество пересечений; ориентация рисунка на плоскости; пропорции изображения (Черемошкина, 1988; 2000; 2002; 2009; Шадриков, Черемошкина, 1990).

**Таблица 1.** Распределение испытуемых (в %) по группам (1–7) с разным временем запоминания ТФ в одиннадцати возрастных выборках (от 7–8 до 80 лет)

Гр. №	Время (с)	Испытуемые (возраст в годах и число человек в выборке)										
		7–8 120	9–10 120	11–12 400	13–14 260	15–17 270	18–20 360	21–22 250	25–30 60	31–40 60	41–55 30	80 20
1	1–4	1.7	2.8	13	20.8	24.8	63.3	57	45	38	23.3	10
2	5–10	3.4	2.8	21	28.6	30.2	33.3	38	38	45	40.4	0
3	12–20	10	57.4	19	31.2	14.8	3.4	5	13.6	10.2	13.2	10
4	22–30	20	14.2	18	9	24.8	0	0	3.4	3.4	13.2	30
5	33–45	21.7	11.4	15	5.2	5.4	0	0	0	1.7	3.3	20
6	48–60	23.2	2.8	8	2.6	0	0	0	0	1.7	3.3	20
7	>60	20	8.6	6	2.6	0	0	0	0	0	3.3	10

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Методика диагностики мнемических способностей, разработанная на основе метода развертывания мнемической деятельности, предусматривает оценку продуктивности запоминания с опорой на природные механизмы от очень высокой (время запоминания 1–4 с) до очень низкой (время запоминания свыше 60 с) (Черемошкина, 1988; 2009). В рамках этой методики экспериментально полученные значения времени запоминания ТФ были разбиты на семь групп, соответствующих разной продуктивности памяти, и для каждой выборки были определены процентные соотношения испытуемых, данные которых попали в указанные группы. Результирующие распределения испытуемых по продуктивности памяти, полученные для младших школьников, подростков, юношей, взрослых, лиц среднего и позднего онтогенеза представлены в табл. 1 и на рис. 2.

Результаты запоминания ТФ испытуемыми 7–8 лет отличаются широким разбросом данных: от максимально высокой до крайне низкой скорости запоминания данной фигуры. Отметим, что пятая часть (20%) испытуемых этой выборки не смогла справиться с заданием за 60 с дискретного предъявления ТФ, состоящей из четырех пересекающихся линий. Им понадобилось более 30 предъявлений ТФ для правильного запоминания. При этом 1, 7% испытуемых смогли репродуцировать эту фигуру после четырех предъявлений по 1 с. Полученные результаты отчетливо демонстрируют индивидуальную степень выраженности природной основы мнемических способностей детей в возрасте 7–8 лет.

Результативность запоминания ТФ испытуемыми 9–10 лет также характеризуется очевидным разнообразием: от очень высокой до очень низкой. При этом наблюдается смещение в сторону увеличения доли максимальных показателей по сравнению с результатами предыдущей выборки.

Можно думать, что это смещение свидетельствует о развитии мнемических способностей 9–10-летних, в первую очередь, о созревании функциональных механизмов памяти, другими словами, проявлении генотипически и врожденно обусловленной ее основы. Вместе с тем очевидны изменения в соотношении количества испытуемых с показателями запоминания выше и ниже средних. Отметим, что больше половины выборки 9–10-летних смогли запомнить ТФ за 12–20 с, тогда как в выборке 7–8-летних таких испытуемых было всего 10%. Это означает, что мнемические способности к концу младшего школьного возраста обогащаются способами запоминания, которые выполняют компенсаторную функцию в случае низкой продуктивности функциональных механизмов (Черемошкина, 1988; 2000; 2002; 2009; Черемошкина, Осинина, 2020).

Из выборки 11–12-летних в интервал (1–4 с) смогли “уложиться” 13% испытуемых. При этом число испытуемых, которые продемонстрировали высокие, выше среднего и средние показатели, было примерно одинаковым (около 20%). Полученные результаты демонстрируют проявление разноуровневых мнемических действий в ситуации невозможности непосредственно запомнить невербальный бессмысленный материал.

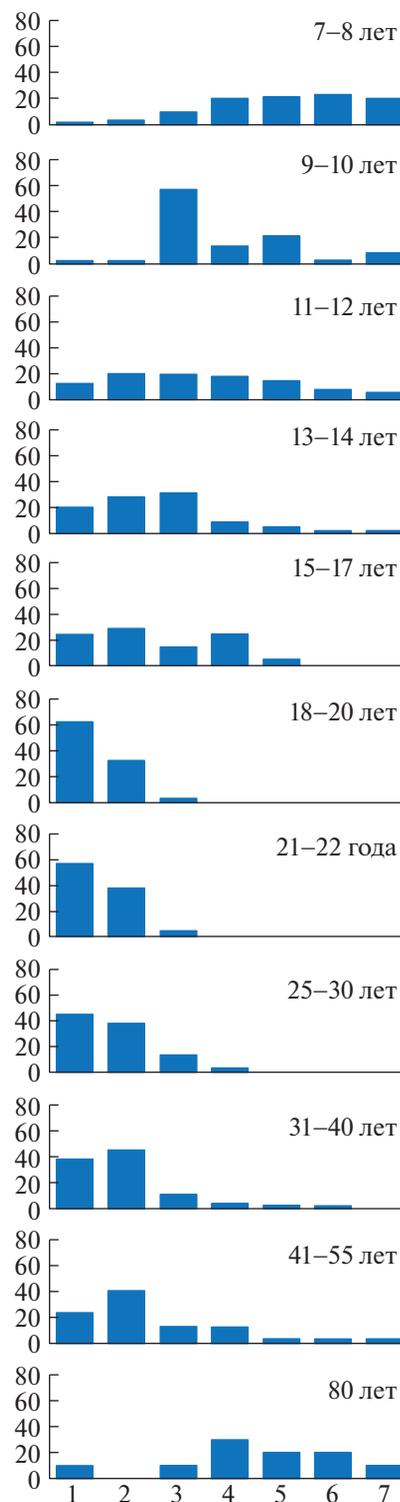
Феноменологически данную тенденцию в той или иной мере описывали многие авторы, в частности, А.Н. Леонтьев, А.А. Смирнов и их последователи (Леонтьев, 2021; Смирнов, 1987). На основе результатов, полученных при помощи метода развертывания мнемической деятельности, процесс превращения непосредственного запоминания в опосредствованное проанализирован достаточно подробно (Черемошкина, 1988; 2000; 2002; 2009; Черемошкина, Дюпина, 2013; Дюпина, 2015; Черемошкина, Осинина, 2020).

Результаты запоминания ТФ испытуемыми 13–14 лет демонстрируют рост продуктивности непосредственной памяти у подростков. Пятая

часть выборки (20, 8%) справилась с заданием в течение 1–4 с. При этом наблюдалось смещение распределения показателей результативности запоминания вверх: увеличение доли высоких показателей при уменьшении доли низких. Данные следующих трех выборок (15–17-, 18–20- и 21–22-летних) подтверждают максимальные возможности мнемической функции старших подростков и юношей по сравнению с представителями других возрастных категорий. Скорость запоминания и правильного воспроизведения ТФ испытуемыми разного возраста существенно различается, но значительный процент справившихся с заданием за 1–4 с присутствует в каждой выборке. Данные результаты отчетливо демонстрируют развитие функциональной системы запоминания как взаимодействия способностей запечатления, мнемических действий и регулирующих механизмов. Функциональная система разноразличных механизмов памяти проявляется в отсутствии у испытуемых этих групп “долгого” запоминания простого материала.

Почти половина выборки 25–30-летних показала максимальную скорость запоминания ТФ. При этом, в отличие от 21–22-летних, появились средние результаты в диапазоне от 22 до 30 с. Выборку 21–22-летних составляли студенты, иначе говоря, лица с активной интеллектуальной нагрузкой, которая у 25–30-летних не столь выражена. Натренированность функциональной системы мнемических способностей у 25–30-летних снижается, что и нашло выражение в увеличении разброса скорости запоминания ими простого материала. Указанная тенденция еще сильнее заметна в результатах запоминания ТФ 31–40- и 41–55-летними испытуемыми, которые продемонстрировали разброс показателей от максимально высоких до низких и очень низких.

Особый интерес могут представлять показатели испытуемых в возрасте 80 лет. Объективные закономерности инволюции когнитивных функций, в первую очередь перцептивных и мнемических, позволяют предполагать скорее низкие результаты запоминания даже простого материала лицами позднего онтогенеза. Однако двое испытуемых из данного выбора смогли запомнить и правильно воспроизвести ТФ за 4 с. Стоит уточнить, что один из них в то время – активно работающий академик, а второй – пенсионер, имевший высокое воинское звание. Оба испытуемых проявили ярко выраженную заинтересованность в результатах исследования и стремились помочь, по их словам, молодому аспиранту. Регулирующие механизмы оказали определяющее влияние на функциональное состояние их перцептивных и мнемических процессов, которое нашло выражение в показателях, совпадающих с результатами молодых испытуемых. При запоминании фигур №№ 3 и 10 результаты лиц позднего онтогене-



**Рис. 2.** Гистограммы времени запоминания ТФ для одиннадцати возрастных выборок (от 7–8 до 80 лет). Цифры по горизонтали – номера интервалов, включающих следующие значения времени запоминания ТФ: 1 – (1–4 с); 2 – (5–10 с); 3 – (12–20 с); 4 – (22–30 с); 5 – (33–45 с); 6 – (48–60 с); 7 – (>60 с). Высота каждого столбика соответствует проценту испытуемых, значения времени запоминания которых попали в данный интервал.

за значимо уступали показателям молодых и зрелых испытуемых, что обусловлено низкой эффективностью их аттенционных способностей (Черемошкина, Молчанов, 2006).

Соотношения продуктивности быстрого и развернутого запоминания для разных возрастных групп наглядно представлены на рис. 2. Отчетливо виден переход к опосредствованному запоминанию невербального бессмысленного материала у 9–10-летних испытуемых. Созревание природных механизмов в сочетании с формированием мнемических действий отразилось в показателях продуктивности запечатления испытуемых от 11 до 22 лет. Результаты испытуемых 25-летнего возраста и старше выявили расширение диапазона времени запоминания простого невербального бессмысленного материала, которое может свидетельствовать о проявляющейся инволюции природных механизмов памяти.

Настоящее исследование предполагало не только подтверждение наличия справившихся с заданием за 1–4 с в каждой возрастной группе, но и анализ тех механизмов, которые и обусловили данный результат. Для этого проводили соответствующий опрос испытуемых, в процессе которого регистрировали:

- ответы испытуемых после успешного воспроизведения ТФ на вопрос: что запоминали;
- ответы испытуемых, которые не смогли правильно воспроизвести ТФ, на тот же вопрос;
- ответы справившихся с заданием на вопрос: как запоминали;
- ответы на тот же вопрос тех, кто не сумел запомнить ТФ за 1–4 с.

Подчеркнем, что в соответствии с методикой диагностики мнемических способностей опрашивались все, без исключений, испытуемые. Большинство испытуемых от 7 и до 80 лет после суммарной экспозиции ТФ длительностью 4 с отвечали на вопрос о предмете запоминания одинаково: *запоминал линии*. Встречались иные ответы, но гораздо реже: *какую-то путаницу, какие-то кресты*. При этом начальная семантизация бессмысленного материала (кресты) могла и не отразиться на скорости запоминания. В ряде случаев те испытуемые, которые обозначили ТФ как путаницу, смогли воспроизвести ее после 1–4 с экспозиции, а те, что выделили кресты, с заданием в указанный период не справились. Ответы тех и других испытуемых о способах запоминания красноречиво показывают доминирование непосредственной памяти на начальных этапах развертывания мнемической активности: *запомнил и все; вы еще раз показали, и запомнила; повнимательнее посмотрела и увидела пересечение*. Во всех случаях ответы на вопрос о предмете и способе запоминания у справившихся с заданием и не запомнивших ТФ после 1–4 с экспозиции характе-

ризуются однообразием вне зависимости от возраста испытуемых и уровня развития их мнемических способностей (Черемошкина, 1988; 2000; 2002; 2009).

Результаты соотнесения изображений ТФ и самоотчетов испытуемых, запомнивших ее и не справившихся с заданием, подтверждают этот вывод. Испытуемые начинали рисовать ТФ с вертикальных линий, присоединяя линии, расположенные горизонтально. Последовательность изображения элементов ТФ изучена в полном объеме для выборки 9–10- и 11–12-летних испытуемых, хотя этапы “сборки” фигуры из линий и их сочетаний фиксировались в каждой серии экспериментов с испытуемыми всех возрастных групп (Черемошкина, 1988; 2000; 2002).

На рис. 3 представлены варианты (*a, b, c*) последовательности изображения ТФ испытуемыми, справившимися с заданием за 1–4 с, специфика которых в их самоотчетах не отразилась.

Вне зависимости от сенсорно-перцептивного, мнемического и интеллектуального опыта, на вопрос о характере запоминания испытуемые разных возрастных групп отвечали: *запоминал линии; увидел линии, они пересекаются; внимательно посмотрел и нарисовал*. Вариант *a* можно назвать наиболее эффективным: фиксируется и количество линий, и характер пересечений. Вариант *b* встречается реже, он отличается тем, что ориентация фигуры “схватывается” сразу, об этом свидетельствует наличие линии ЕК в рисунке испытуемых после первого предъявления. В третьем варианте, напротив, линия ЕК “занимает свое место” только после четырех секунд экспозиции этой фигуры. Если эксперимент прекращается после четырех предъявлений, то последовательность запоминания линий испытуемыми не осознается и в самоотчетах не отражается.

В качестве исключений из этого “правила” приведем примеры осознанного запоминания ТФ двумя испытуемыми в возрасте 25 лет за 2 с. Одна испытуемая семантизировала ТФ как “перечеркнутый треугольник” (И.С.), а другая – как “фигуру № 1, дополненную одной линией” (О.С.). На вопрос: как запоминали, обе ответили в соответствии с результатами категоризации: “запоминала как перечеркнутый треугольник” (И.С.); “как первую фигуру, дорисованную еще одной линией” (О.С.). Обе имели максимальные IQ по методикам Равена, Векслера и Амтхауэра, что проявилось и при запоминании наиболее сложного материала. Запоминание фигуры № 10 требует наличия развитой системы разноуровневых механизмов, обе показали высокие результаты: 42 с (И.С.) и 26 с (О.С.) (Черемошкина, 2000; 2002; 2009).

При низкой продуктивности функциональных механизмов мнемических способностей процесс

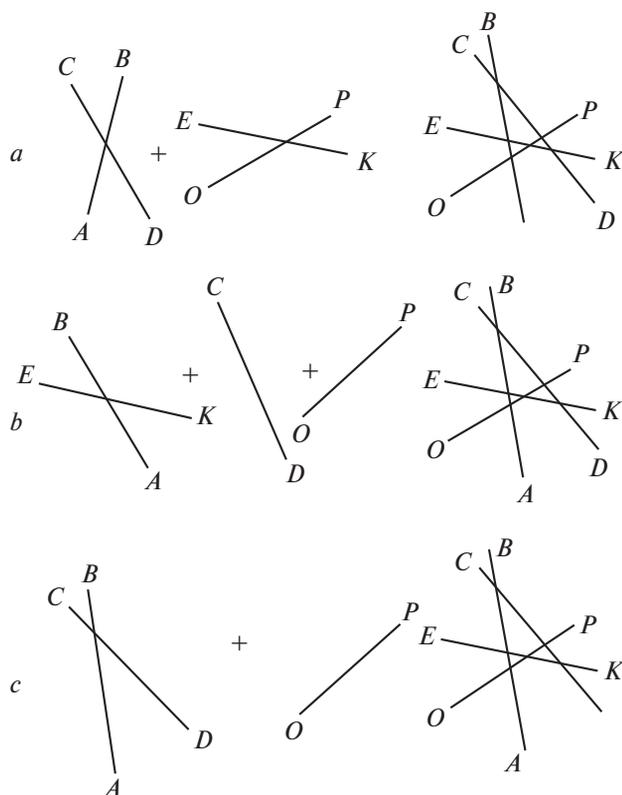


Рис. 3. Варианты последовательности изображения элементов ТФ испытуемыми разных возрастов, справившихся с заданием в течение 1–4 с.

запоминания значительно удлиняется, но период от 1 с до 4 с остается этапом сенсорно-перцептивной, т.е. относительно неосознаваемой, обработки ТФ. На рис. 4 представлен процесс изображения ТФ испытуемого О.Б. (11 лет) с “уходами” от почти правильного воспроизведения.

Испытуемый О.Б. на 28 с суммарного времени предъявления изобразил принципиально иное сочетание линий, но следующие 2 с экспозиции “прояснили” образ. Рисунок 5 содержит изображение ТФ испытуемого М.К. (11 лет) после 33 с суммарного времени ее экспозиции, эксперимент продолжался до 30 предъявлений (60 с) и закончился отрицательным результатом.

Как видим, вне зависимости от длительности запоминания ТФ испытуемыми разных возрастов (1–4 с или более), а также при отсутствии положительного результата, временной отрезок от 1 до 4 с оставался периодом неосознаваемой или относительно неосознаваемой обработки данного материала.

Полученные результаты показывают следующее.

1. В каждой возрастной выборке есть представители, справившиеся с заданием в течение 1–4 с.

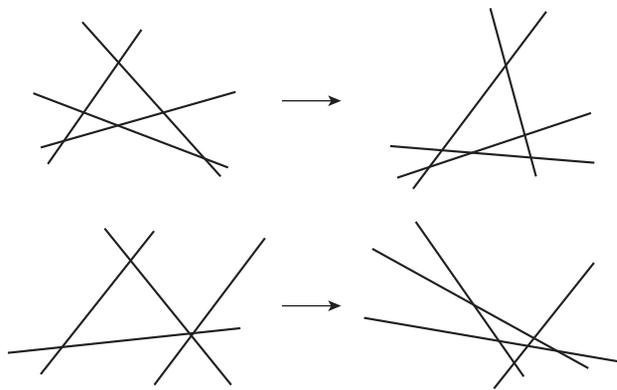


Рис. 4. Пример развернутого запоминания ТФ в течение 30 с (О.Б., 11 лет).

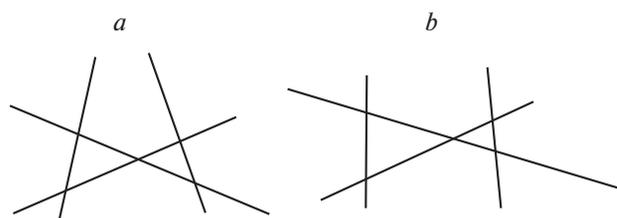


Рис. 5. Пример изображения ТФ после 33 с суммарного времени предъявления (М.К., 11 лет).

2. Для самоотчетов испытуемых о предмете и характере запоминания ТФ за 1–4 с типично однообразие.

3. Не зафиксировано различий в самоотчетах испытуемых разных возрастных групп, имеющих положительные и отрицательные результаты.

4. Не выявлено различий в характере изображений ТФ испытуемыми разных возрастных групп, запомнивших ее и не справившихся с заданием в течение 1–4 с.

5. Не выявлено связей между характером изображения ТФ и его представленностью в самоотчетах испытуемых разного возраста, запомнивших ее и не справившихся с заданием за 1–4 с.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Процесс формирования зрительного образа незнакомого объекта состоит из нескольких этапов: обнаружения объекта, выделения его составляющих, определения взаимосвязей между ними и категоризации объекта. Первые три этапа совершаются скорее на неосознаваемом или относительно неосознаваемых уровнях функционирования сенсорно-перцептивной системы. Категоризация и знакомого, и незнакомого объекта обусловлена прошлым опытом и характером репрезентации информации в памяти конкретного человека. Актуализация необходимого сенсорно-

го эталона совершается с увеличением доли сознания, тем более при категоризации бессмысленного материала. Категоризация стимула до его осознанного и предметного образа в условиях дефицита времени и при наличии мнемической задачи может совершаться с разной степенью “глубины” анализа.

Результат осознания раздражителя зависит от сочетания продуктивности перцептивных, мнемических и мыслительных способностей. Если развитая и эффективная сенсорно-перцептивная система сочетается с сильной природной памятью, то необходимости в углубленном анализе материала нет: как только воспроизведение без усилий получилось, эксперимент прекращается. В этом случае категоризации объекта как фигуры, предполагающей выделение не только элементов, но и связей между ними, не происходит; поэтому ответ испытуемого: *запоминал линии*. Есть основания предполагать, что сильная зрительная память может тормозить развертывание мыслительных операций в процессе решения мнемической задачи. По крайней мере, эта тенденция проявляется по отношению к испытуемым с инертной нервной системой (Черемошкина, 2000; 2002).

Однообразные ответы испытуемых разного возраста о характере запоминания дают основания рассматривать временной отрезок до 4 с в качестве периода неосознаваемой (относительно неосознаваемой обработки) невербального бессмысленного материала, предъявляемого дискретно. Именно однообразные ответы испытуемых разного возраста после правильного воспроизведения ТФ заставили обратиться к опросу тех, кто не смог справиться с заданием, как правило, по причине ошибочного воспроизведения ориентации фигуры на плоскости. На протяжении всей истории создания и применения в исследовательских и диагностических целях метода развертывания мнемической деятельности одним из наиболее удивительных “открытий” являлось однообразие ответов испытуемых разных возрастов о характере запоминания ТФ после первых секунд ее предъявления: *посмотрел и запомнил; вы еще раз показали, и я нарисовала*.

При изучении мнемических способностей детей 9–10 и 11–12 лет в ход эксперимента вносились изменения, в частности, опрашивались испытуемые после четырех неправильных воспроизведений, которым в дальнейшем было позволено вернуться к выполнению этого задания. Этапность формирования целостного образа после 4 с первоначального опыта представлена на рис. 3. Подавляющее большинство справились с заданием за 5–10 с или 12–20 с. После повторного эксперимента характер ответов менялся в сторону категоризации фигуры и осмысленности про-

цесса запоминания: “Четыре линии” (О.Н.), “Линии вот так перечеркнуты, а я не увидела сразу” (О.У.), “Похоже на букву А, но она перечеркнута, а я не мог запомнить” (И.С.), “Кресты тут, но я наклон не понял” (Ч.Д.) (Черемошкина, 2002; 2009). Это означает, что вопросы помогли испытуемому проанализировать фигуру, выделить элементы, связи между ними и сформировать целостный образ. Невербальный бессмысленный материал из четырех пересекающихся линий “превращался” в кресты, перечеркнутую букву А или фигуру, похожую на первую (пробную).

Подчеркнем, что перед испытуемыми не ставилась задача каким-либо образом обозначить, назвать фигуру, понять расположение линий. Инструкция предполагала произвольную мнемическую активность: “постарайтесь запомнить и нарисовать”. Это означает, что сенсорно-перцептивная обработка в течение 1–4 с могла и не завершиться категоризацией стимула. Испытуемый мог, благодаря сильной природной памяти, запечатлеть стимул за 1–4 с и правильно воспроизвести, но “не понять” его. Это обстоятельство является отличительной особенностью испытуемых разных возрастов, обладающих сильной зрительной природной памятью.

Предмет настоящего исследования с необходимостью требовал микрогенетического анализа не только запоминания, но и сохранения невербального бессмысленного материала, образ которого неосознаваемо (относительно неосознаваемо) динамичен в зависимости от эффективности и качественного своеобразия когнитивных способностей субъекта и условий его деятельности. С этой целью были предприняты дополнительные исследования: повторное воспроизведение ТФ без дополнительной экспозиции; ретестирование; срисовывание ТФ справившимися с мнемической задачей за 1–4 с без ограничения времени на выполнение данного задания.

Около 10% от каждой выборки 7–12-летних подверглись дополнительному исследованию особенностей сохранения и забывания невербального бессмысленного материала. Через несколько минут после правильного воспроизведения ТФ испытуемых просили воспроизвести ее без дополнительной экспозиции. Оказалось, что большинство успешных испытуемых не могли безошибочно воспроизвести ранее правильно запомненную ТФ. В экспериментах с испытуемыми разного возраста встречались два варианта ошибок: линии АВ и ЕК утрачивали наклон (рис. 3). Вследствие этого менялась ориентация ТФ на плоскости. Воспроизведение линий и их пересечений на очередном витке знакомства с объектом совершалось параллельно с категоризацией. При столкновении с проблемой (“что же не так?”)

испытываемые заново возвращались к выделению элементов, затем — к пересечению линий и ориентации фигуры на плоскости. Если в случае неудачи экспериментатор прекращал опыт со словами: “Все хорошо”, то испытуемый был уверен в правильности своего рисунка.

Дети 7–12 лет с задержкой психического развития, а также взрослые, перенесшие хирургические вмешательства под наркозом, не могли правильно воспроизвести ориентацию фигуры на плоскости (отсутствовал наклон линии ЕК, рис. 3) даже после 30 предъявлений. Эксперимент мог продолжаться до полутора-двух минут суммарных предъявлений с последующим опросом, который демонстрировал развернутый процесс изучения ориентации фигуры на плоскости и характера пересечения линий. Принципиальной разницы в категоризации ТФ запомнившими ее после 30 предъявлений и не запомнившими, как правило, не было: “Линии запоминала” (О.Ф., 11 лет), “Какая-то путаница” (Ц.Г., 12 лет), “Похоже на снежинку” (К.Я., 11 лет). В условиях значительного удлинения процесса запоминания существенных изменений характера обработки невербального бессмысленного материала не обнаружено: доминировала непосредственная память. Количество повторений фигуры из четырех линий приводило к правильному запоминанию, но результат был обусловлен скорее “стимулирующей” функциональных механизмов памяти, нежели сознательной обработкой материала. Подчеркнем, что отсутствие опосредствованного запоминания сочетается в этих случаях с очевидным дефицитом произвольного внимания на фоне недоразвития зрительных перцептивных способностей (Черемошкина, 2000; 2002; 2009). Словесные отчеты испытуемых разного возраста во всех сериях наших исследований показывали, что наименование стимула не только увеличивает вероятность правильного воспроизведения, но и доказывает наличие сознательной или более осознанной обработки невербального бессмысленного материала. Разнообразие качественно-количественных показателей процесса отсроченного воспроизведения данного материала показывает, что отдельный стимул приобретает дополнительные смыслы и трансформируется не только под влиянием такого свойства памяти, как активность сохранения (Черемошкина, 2000; 2002), но и под влиянием уровня развития обобщенного знания и его представленности в системе репрезентаций субъекта мнемической деятельности.

В разных парадигмальных трактовках эта проблема проявлялась как перцептивные интерпретации (Канеман, 2006), как переструктурирование воспоминаний (Craik, Lockhart, 1972; Roudier, Morey, Morey, Cowan, 2011; Schachter, 2001), как обретение сенсорным эталоном богатой “фактуры” (Корж, Шпагонова, 1989; Корж, 2009). В тео-

рии мнемических способностей исследованы уровни сенсорно-перцептивной, образно-мнемической и понятийно-мыслительной репрезентации запоминаемого материала (Черемошкина, 2002, 2009).

Рестестирование осуществлялось на выборке 11–12-летних школьников (30 испытуемых) через шесть месяцев после первого этапа эксперимента: в течение недели в тех же условиях и по той же процедуре испытуемым повторно предъявлялась для запоминания ТФ. Результаты повторного исследования отличались от первоначальных, но статистически значимых различий не обнаружено, коэффициент ранговой корреляции по Спирмену равняется 0.79 (Черемошкина, 1988). Можно было предположить наличие значимых различий в связи с тем, что полного забывания не существует, а память, как динамичная система, могла перейти на более высокий уровень развития. Действительно, все без исключения испытуемые узнали ТФ, по завершении тестирования вспомнили первоначальный эксперимент, однако существенных различий в продуктивности функциональных механизмов не было обнаружено. Это свидетельствует в пользу высказанных утверждений о том, что фигура из четырех пересекающихся линий запоминается относительно неосознаваемо и в течение первых четырех секунд восприятия ее целостный образ из кратковременной памяти в долговременную, как правило, не поступает. Невербальный бессмысленный материал для долговременного запоминания должен не только осмысливаться, но и обрести личностную значимость (Cheremoshkina, Osinina, 2013; Cheremoshkina, Dymnikova, 2017).

Представляют особый интерес результаты срисовывания ТФ через 5–10 мин после ее правильного воспроизведения. Сначала при изучении памяти детей с задержкой психического развития, а затем и на испытуемых без явных когнитивных отклонений был обнаружен эффект неспособности срисовать ТФ после ее правильного воспроизведения. Количество линий, количество и характер пересечений в процессе срисовывания фигуры отражались правильно, но ориентация фигуры на плоскости искажалась: линия ЕК (рис. 3) утрачивала наклон (Черемошкина, 2009). Эффект неспособности срисовать ТФ после ее запоминания и правильного воспроизведения может служить одним из доказательств того, что временной интервал до 4 с является кратковременным и неосознаваемым (относительно неосознаваемым) периодом хранения образа фигуры из четырех пересекающихся линий.

Соотнесение качественных и количественных показателей запоминания ТФ испытуемыми разного возраста, отличающимися продуктивностью запоминания с опорой на природные механизмы

памяти, уровнем развития способов обработки запоминаемого материала и характером регуляции мнемических процессов, позволяет сформулировать следующие критерии выделения условной границы неосознаваемого (относительно неосознаваемого) и осознаваемого уровней функционирования познавательных процессов в условиях произвольного запоминания невербального бессмысленного материала:

- наличие сенсорно-перцептивной или понятийно-осознанной категоризации стимула по результатам анализа самоотчетов;
- наличие или отсутствие осознанного запоминания как конструирования целостного предметного образа фигуры из четырех пересекающихся линий по результатам сравнительного анализа изображений ТФ и самоотчетов;
- наличие или отсутствие правильного повторного (без дополнительной экспозиции) воспроизведения ТФ через 5–10 мин после ее правильного запоминания;
- отсутствие различий в ответах о предмете и способах запоминания у справившихся с заданием и тех, кто не сумел достичь результата за 1–4 с;
- результаты ретестирования 11–12-летних испытуемых с интервалом в полгода, доказывающие, что запоминание ТФ совершается с опорой на функциональные механизмы памяти;
- результаты срисовывания ТФ после ее правильного воспроизведения испытуемыми разных возрастных групп.

Совокупные результаты качественного анализа ответов испытуемых разного возраста, исследование характера воспроизведений и срисовываний ТФ дают основания для следующих заключений.

Обработка невербального бессмысленного материала, предъявляемого дискретно, в течение первых четырех секунд совершается неосознаваемо (относительно неосознаваемо) и позволяет испытуемому выделить линии и их пересечения. Выделение линий и их пересечений реализуется на уровне сенсорно-перцептивной активности, которая при столкновении с невозможностью правильно воспроизвести, перерастает в исследовательскую деятельность с опорой на мыслительные способности. Несмотря на различия в эффективности и уровне развития перцептивных, мнемических, мыслительных, аттенционных, имажитивных способностей субъекта когнитивной активности, временной отрезок до 4 с можно рассматривать в качестве неосознаваемого (относительно неосознаваемого) периода запоминания невербального бессмысленного материала. Границей неосознаваемой (относительно неосознаваемой) и осознаваемой обработки невербального бессмысленного материала, предъявляемого для запоминания по 1 с, можно считать 4 с.

## ВЫВОДЫ

– Обработка невербального бессмысленного материала, состоящего из четырех пересекающихся линий, предъявляемого по одной секунде 4 раза, совершается на неосознаваемом (относительно неосознаваемом) уровне функционирования перцептивных и мнемических процессов.

– Запоминание невербального бессмысленного материала, предъявляемого по одной секунде 4 раза, совершается с опорой на его сенсорно-перцептивную обработку, предполагающую выделение элементов стимула, фиксацию соотношения линий и наличия пересечений, а также определение ориентации фигуры на плоскости.

– Отсутствие осмысленной категоризации фигуры из четырех пересекающихся линий, предъявляемой по одной секунде от 1 до 4 раз, дает основания рассматривать временной интервал до 4 с в качестве периода неосознаваемой (относительно неосознаваемой) обработки данного невербального бессмысленного материала в процессе его запоминания.

– Границей неосознаваемой (относительно неосознаваемой) и осознаваемой обработки невербального бессмысленного материала, предъявляемого для запоминания по 1 с, можно считать 4 с.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баддли А., Айзенк М., Андерсон М. *Память*. СПб.: Питер, 2011. 560 с.
- Барабанщиков В.А. *Психология восприятия: Организация и развитие перцептивного процесса*. М.: Когито-Центр, 2006. 240 с.
- Веккер Л.М. *Психические процессы: В 2 т.* Ленинград: Изд-во Ленингр. ун-та, 1976. 335 с.
- Величковский Б.М. Зрительные автоматизмы в памяти человека. *Психологический журнал*. 1985. Т. 6. № 5. С. 32–38.
- Величковский Б.М. *Когнитивная наука: Основы психологии познания: в 2 т.* М. Смысл: Издательский центр “Академия”, 2006. 448 с.
- Ганзен В.А. *Восприятие целостных объектов*. Ленинград: Изд-во Ленингр. ун-та, 1974. 152 с.
- Глезер В.Д. *Механизмы опознания зрительных образов*. М.; Ленинград: Наука, Ленингр. отд-ние, 1966. 204 с.
- Грановская Р.М. *Восприятие и модели памяти*. Ленинград: Наука, Ленингр. отд-ние, 1974. 360 с.
- Грановская Р.М., Березная И.Я. *Запоминание и узнавание фигур*. Ленинград: Изд-во Ленингр. ун-та, 1974. 96 с.
- Дюпина С.А. *Когнитивные стили в структуре мнемических способностей*. Дисс. канд. психол. наук. М.: 2015. 369 с.

- Завалова Н.Д., Ломов Б.Ф., Пономаренко В.А. *Образ в системе психической регуляции деятельности*. М.: Наука, 1980. 111 с.
- Заика Е.В., Кузнецов М. А. Кратковременная память и усвоение практических умений. *Вопросы психологии*. 1989. № 2. С. 120–123.
- Запорожец А.В., Венгер Л.А., Зинченко В.П., Рузская А.Г. *Восприятие и действие*. М.: Просвещение, 1967. 323 с.
- Зинченко П.И. *Непроизвольное запоминание*. М.: Изд-во Акад. пед. наук РСФСР, 1961. 562 с.
- Зинченко В.П., Величковский Б.М., Вучетич Г.Г. *Функциональная структура зрительной памяти*. М.: Изд-во МГУ, 1980. 271 с.
- Зинченко В.П., Вергилес Н.Ю. *Формирование зрительного образа: (исследование деятельности зрительной системы)*. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1969. 106 с.
- Зинченко Т.П. *Память в экспериментальной и когнитивной психологии*. СПб.: Питер, 2002. 320 с.
- Канеман Д. *Внимание и усилие*. М.: Смысл, 2006. 287 с.
- Ковригина В.И. *Эффективность мнемических способностей студентов 18–20 лет*. М.: МГСУ, 2004.
- Косунина О.И. *Исследование регуляции процессов запоминания школьников 13–14 лет*. М.: МГСУ, 2004.
- Корж Н.Н., Шпагонова Н.Г. Сенсорно-перцептивная память: (психофизиологический аспект). *Психологический журнал*. 1989. Т. 10. № 3. С. 85–92 с.
- Корж Н.Н. Личностные черты невербальной памяти (психофизический аспект). *Междисциплинарные исследования памяти*. Под ред. Журавлева А.Л. М.: Изд-во “Институт психологии РАН”, 2009. С. 157–178.
- Линдсей П., Норман Д. *Переработка информации у человека*. М.: Мир, 1974. 550 с.
- Леонтьев А.Н. *Избранные психологические произведения: Том 1*. М.: Книга по Требованию, 2021. 392 с.
- Найссер У. *Познание и реальность: Смысл и принципы когнитивной психологии*. М.: Прогресс, 1981. 230 с.
- Розов А.И. Проблемы категоризации: Теория и практика. *Вопросы психологии*. 1980. № 3. С. 90–97.
- Смирнов А.А. *Избранные психологические труды: В 2 т.* Под ред. Ломова Б.Ф. М.: Педагогика, 1987. 343 с.
- Соколов Е.Н. *Механизмы памяти: Опыт эксперим. исследования*. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1969. 176 с.
- Солсо Р.Л. *Когнитивная психология*. М.: Тривола, 1996. 598 с.
- Сперлинг Дж. Информация, получаемая при коротких зрительных предъявлениях. *Инженерная психология за рубежом*. 1967. С. 5–7.
- Флорес Ц. *Память. Экспериментальная психология*. Под ред. Флореса Ц., Пиаже Ж. М. 1973.
- Черемошкина Л.В. Анализ способов обработки материала при запоминании и воспроизведении. *Профориентация школьников: Сб. науч. тр.* Ярославль. ЯГПИ, 1987. С. 135–144.
- Черемошкина Л.В. *Диагностика мнемических способностей школьников 10–12 лет*. Дисс. канд. психол. наук. Ленинград. 1988. 257 с.
- Черемошкина Л.В. *Психология мнемических способностей*. Дисс. докт. психол. наук. Ярославль. 2000. 587 с.
- Черемошкина Л.В. *Психология памяти*. М.: Академия, 2002. 367 с.
- Черемошкина Л.В. *Психология памяти. Учебное пособие*. М.: Аспект Пресс, 2009. 317 с.
- Черемошкина Л.В., Молчанов К.А. Особенности мнемических процессов в пожилом возрасте. *Педагогика и психология в высшем образовании. Сборник науч. статей*. Под ред. Кудрявой М.В. М.: МГМСУ, 2006. С. 138–140.
- Черемошкина Л.В., Дюпина С.А. Скорость запоминания невербального бессмысленного материала и когнитивный стиль полезависимость / полнезависимость. *Новое в психолого-педагогических исследованиях*. 2013. № 4. С. 120–134.
- Черемошкина Л.В., Осинина Т.Н. *Память: закономерности воспроизведения учебного материала: монография*. М.: Юрайт, 2019. 235 с.
- Черемошкина Л.В., Осинина Т.Н. Мнемические способности в период перехода от подросткового к юношескому возрасту (по материалам лонгитюдного исследования). *Психологический журнал*. 2020. Т. 41. № 6. С. 35–47.
- Шадриков В.Д., Черемошкина Л.В. *Мнемические способности: развитие и диагностика*. М.: Педагогика, 1990. 175 с.
- Шехтер М.С. Проблемы одномоментного зрительного опознания. *Вест. Моск. ун-та. Сер. 14. Психология*. 1978. № 4. С. 11–25.
- Шипихина И.И. *Сравнительный анализ результатов воспроизведения вербального и невербального материала испытуемыми разного возраста*. М.: РГСУ, 2005.
- Ярбус А.Л. *Роль движений глаз в процессе зрения*. М.: Наука, 1965. 166 с.
- Cheremoshkina L.V., Dymnikova M.V. Working Memory Span Research for Geometric Material Processing. *Asian Journal of Humanities and Social Studies*. 2017. V. 05–I. 6. P. 366–370.
- Cheremoshkina L.V., Osinina T.N. *About the laws of reproduction of educational material. European Applied Sciences, Germany*. 2013. V. 5. P. 151–155.
- Craik F.I.M. & Lockhart R.S. Level of processing. A framework for memory research. *Journal of Verbal Learning & Verbal Behavior*. 1972. V. 11. P. 671–684.
- Miller George A. The Magical Number Seven, Plus or Minus Two. *The Psychological Review*. 1956. V. 63. P. 81–97.
- Rouder J.N., Morey R.D., Morey C.C., Cowan N. How to measure working memory capacity in the change detection paradigm. *Psychon Bull Rev*. 2011. V. 18 (2). P. 324–330.
- Schachter D. *The seven sins of memory*. Boston, Houghton Mifflin Company. 2001. 272 p.

## Processing and memorizing non-verbal non-meaning material when the exposure time is limited

L. V. Cheremoshkina<sup>a,b,#</sup>

<sup>a</sup> Moscow Pedagogical State University

119991 Moscow, st. Malaya Pirogovskaya, 1, building 1, Russia

<sup>b</sup> State Humanitarian and Technological University

142611 Moscow region, Orekhovo-Zuevo, st. Zelenaya, 22, Russia

<sup>#</sup>E-mail: LVCH2007@yandex.ru

The article contains generalized data obtained over the past 35 years using the method of deploying mnemonic activity, which was developed to study the memory of people of different ages. Several series of experimental studies of the qualitative originality of the processing of a figure of four intersecting lines, presented for memorization by 7–80-year-olds subjects. The experimental material was exposed in fractions, the first 10 presentations were 1s each, from the 11th to the 20th – 2s each, from the 21st to the 30th – 3 s each, etc. After each presentation, the subject reproduced on paper the figure shown to him. With a total exposure time of figure No. 2 within 4 s. complex methods of its analysis, requiring extensive mental operations, have not been recorded. The total time for memorizing a figure of four intersecting lines, which is 4 s, can be attributed to the period of sensory-perceptual processing, which involves the selection of stimulus elements, fixing the ratio of lines, the nature of intersections, the orientation of the figure on a plane, performed at an unconscious (relatively unconscious) level of functioning of perceptual and mnemonic processes. The absence of a meaningful categorization of the figure of four intersecting lines, presented for one second from one to four times, gives reason to consider the time interval from 1 to 4 s as a period of unconscious processing of non-verbal meaningless material. The total duration of the exposure, which is 4 s, can be considered as a conditional boundary between the unconscious (relatively unconscious) and conscious processing of this non-verbal meaningless material in the process of its arbitrary memorization.

*Key words:* memorization, imprinting, non-verbal meaningless material, conscious and relatively unconscious processing of memorized material, method of deploying mnemonic activity, memory, categorization, period from 1 s to 4 s

### REFERENCES

- Baddeley A., Eysenck M.W., Anderson M.C. *Memory*. SPb. Piter, 2011. 560 p. (in Russian).
- Barabanshchikov V.A. *Psikhologiya vospriyatiya: Organizatsiya i razvitie pertseptivnogo protsessa* [Psychology of perception: Organization and development of the perceptual process]. M.: Kogito-Tsentr, 2006. 240 p. (in Russian).
- Vekker L.M. *Psikhicheskie protsessy: V 2 t.* [Mental processes: In 2 V.]. Leningrad. Izd-vo Leningr. un-ta, 1976. 335 p. (in Russian).
- Velichkovskii B.M. Zritel'nye avtomatizmy v pamyati cheloveka [Visual automatisms in human memory]. *Psikhologicheskii zhurnal* [Psychological Journal]. 1985. T. 6. № 5. P. 32–38. (in Russian).
- Velichkovsky B.M. Cognitive science: Foundations of episodic psychology. Moscow. Smysl: Publishing house Academia, 2006. 448 p. (in Russian).
- Ganzen V.A. *Vospriyatie tselostnykh ob"ektov* [Perception of integral objects]. Leningrad. Izd-vo Leningr. un-ta, 1974. 152 p. (in Russian).
- Glezer V.D. *Mekhanizmy opoznaniya zritel'nykh obrazov* [Mechanisms of recognition of visual images]. Moscow; Leningrad. Nauka. [Leningr. otd-nie], 1966. 204 p. (in Russian).
- Granovskaya R.M. *Vospriyatie i modeli pamyati* [Perception and memory models]. Leningrad. Nauka. [Leningr. otd-nie], 1974. 360 p. (in Russian).
- Granovskaya R.M., Bereznaya I.Ya. *Zapominanie i uznavanie figure* [Memorization and recognition of figures]. Leningrad. Izd-vo Leningr. un-ta, 1974. 96 p. (in Russian).
- Dyupina S.A. *Kognitivnye stili v strukture mnemicheskikh sposobnostei*. Diss. kand. psikhol. nauk [Cognitive styles in the structure of mnemonic abilities. Ph.D. psych. sci. diss.]. Moscow. 2015. 369 p. (in Russian).
- Zavalova N.D., Lomov B.F., Ponomarenko V.A. *Obraz v sisteme psikhicheskoi regulyatsii deyatel'nosti* [Image in the system of mental regulation of activity]. Moscow. Nauka, 1980. 111 p. (in Russian).
- Zaika E.V., Kuznetsov M.A. *Kratkovremennaya pamyat' i usvoenie prakticheskikh umenii* [Short-term memory and assimilation of practical skills]. *Voprosy psikhologii* [Questions of psychology]. 1989. V. 2. P. 120–123. (in Russian).
- Zaporozhets A.V., Venger L.A., Zinchenko V.P., Ruzskaya A.G. *Vospriyatie i deistvie* [Perception and action]. Moscow. Prosveshchenie, 1967. 323 p. (in Russian).
- Zinchenko P.I. *Neproizvol'noe zapominanie* [Involuntary memorization]. Moscow. Izd-vo Akad. ped. nauk RSFSR, 1961. 562 p. (in Russian).
- Zinchenko V.P., Velichkovskii B.M., Vuchetich G.G. *Funktsional'naya struktura zritel'noi pamyati* [Functional structure of visual memory]. Moscow. Moscow University press, 1980. 271 p. (in Russian).

- Zinchenko V.P., Vergiles N.Yu. *Formirovanie zritel'nogo obraza: (issledovanie deyatelnosti zritel'noi sistemy)* [Formation of a visual image: (study of the activity of the visual system)]. Moscow. Moscow University press, 1969. 106 p. (in Russian).
- Zinchenko T.P. *Pamyat' v eksperimental'noi i kognitivnoi psikhologii* [Memory in experimental and cognitive psychology]. SPb. Piter, 2002. 320 p. (in Russian).
- Kaneman D. *Vnimanie i usilie* [Attention and effort]. Moscow. Smysl, 2006. 287 p. (in Russian).
- Kovrigina V.I. *Effektivnost' mnemicheskikh sposobnostei studentov 18–20 let*. Diplomnaya rabota. Nauchnyi rukovoditel' Cheremoshkina L.V. [The effectiveness of mnemonic abilities of students aged 18–20. Graduate work. Scientific supervisor Cheremoshkina L.V.]. Moscow. MGSU, 2004. (in Russian).
- Kosunina O.I. *Issledovanie regulatsii protsessov zapominaniya shkol'nikov 13–14 let*. Diplomnaya rabota. Nauchnyi rukovoditel' Cheremoshkina L.V. [The study of the regulation of the processes of memorization of schoolchildren aged 13–14 years. Graduate work. Scientific supervisor Cheremoshkina L.V.]. Moscow. MGSU, 2004. (in Russian).
- Korzh N.N., Shpagonova N.G. *Sensorno-pertseptivnaya pamyat': (psikhofiziologicheskii aspekt)* [Sensory-perceptual memory: psychophysiological aspect]. *Psikhologicheskii zhurnal* [Psychological Journal]. 1989. T. 10. V.3. P. 85–92. (in Russian).
- Korzh N.N. *Lichnostnye cherty neverbal'noi pamyati (psikhofizicheskii aspekt)* [Personality traits of nonverbal memory (psychophysical aspect)]. *Mezhdistsiplinarnye issledovaniya pamyati* [Interdisciplinary studies of memory]. Pod red. Zhuravleva A.L. Moscow. The Publishing house "Institute of psychology Russian academy of sciences", 2009. P. 157–178. (in Russian).
- Lindsei P., Norman D. *Pererabotka informatsii u cheloveka* [Processing of information in humans]. Moscow. Mir, 1974. 550 p. (in Russian).
- Leont'ev A.N. *Izbrannye psikhologicheskie proizvedeniya: Tom 1* [Selected psychological works: Volume 1]. Moscow. Kniga po Trebovaniyu, 2021. 392 p. (in Russian).
- Naisser U. *Poznanie i real'nost': Smysl i printsipy kognitivnoi psikhologii* [Cognition and Reality: The Meaning and Principles of Cognitive psychology]. Moscow. Progress Publishers Moscow, 1981. 230 p. (in Russian).
- Rozov A.I. *Problemy kategorizatsii: Teoriya i praktika* [Problems of categorization: Theory and practice]. *Voprosy psikhologii* [Questions of psychology]. 1980. V. 3. P. 90–97. (in Russian).
- Smirnov A.A. *Izbrannye psikhologicheskie trudy: V 2 t* [Selected psychological works: In 2 V.]. Pod red. Lomov B.F. Moscow. Pedagogika, 1987. 343 p. (in Russian).
- Sokolov E.N. *Mekhanizmy pamyati: Opyt eksperim. Issledovaniya* [Memory mechanisms: The experience of experim. researches]. Moscow. Moscow University press, 1969. 176 p. (in Russian).
- Solso R.L. *Cognitive psychology*. Moscow. Trivola, 1996. 598 p. (in Russian).
- Sperling G. *Informatsiya, poluchaemaya pri korotkikh zritel'nykh pred'yavleniyakh* [Information obtained with short visual presentations]. *Inzhenernaya psikhologiya za rubezhom* [Engineering Psychology abroad] 1967. P. 5–7. (in Russian).
- Flores Ts. *Pamyat'* [Memory]. *Eksperimental'naya psikhologiya* [Experimental psychology]. Pod red. Flores R., Piazhe Zh. Moscow. 1973. (in Russian).
- Cheremoshkina L.V. *Analiz sposobov obrabotki materiala pri zapominanii i vosproizvedenii* [Analysis of material processing methods during memorization and reproduction]. *Proforientatsiya shkol'nikov: Sb. nauch. trudov* [Vocational guidance of schoolchildren: Collection of scientific works]. Yaroslavl'. YaGPI, 1987. P. 135–144. (in Russian).
- Cheremoshkina L.V. *Diagnostika mnemicheskikh sposobnostei shkol'nikov 10–12 let*. Diss. kand. psikhol. nauk. [Diagnostics of mnemonic abilities of schoolchildren 10–12 years old. Ph.D. psych. sci. diss.]. Leningrad. 1988. 257 p. (in Russian).
- Cheremoshkina L.V. *Psikhologiya mnemicheskikh sposobnostei*. Diss. dokt. psikhol. Nauk [Psychology of mnemonic abilities. Dr. psych. sci. diss.]. Yaroslavl'. 2000. 587 p. (in Russian).
- Cheremoshkina L.V. *Psikhologiya pamyati* [Psychology of memory]. Moscow. Akadema, 2002. 367 p. (in Russian).
- Cheremoshkina L.V. *Psikhologiya pamyati. Uchebnoe posobie* [Psychology of memory. Study guide]. Moscow. Aspect Press Ltd, 2009. 317 p. (in Russian).
- Cheremoshkina L.V., Molchanov K.A. *Osobennosti mnemicheskikh protsessov v pozhilom vozraste* [Features of mnemonic processes in old age]. *Pedagogika i psikhologiya v vysshem obrazovanii. Sbornik nauch.statei* [Pedagogy and psychology in higher education. Collection of scientific articles]. Pod red. Kudryavoi M.V. Moscow. MGMSU, 2006. P. 138–140. (in Russian).
- Cheremoshkina L.V., Dyupina S.A. *Skorost' zapominaniya neverbal'nogo bessmyslennogo materiala i kognitivnyi stil' polezavisimost'/polenezavisimost'* [Speed of memorization of nonverbal meaningless material and cognitive style of usefulness / polenezavisimost']. *Novoe v psikhologo-pedagogicheskikh issledovaniyakh* [New in psychological and pedagogical research]. 2013. V. 4. P. 120–134. (in Russian).
- Cheremoshkina L.V., Osinina T.N. *Pamyat': zakonomernosti vosproizvedeniya uchebnogo materiala: monografiya* [Memory: patterns of reproduction of educational material: monograph]. Moscow. Yurait, 2019. 235 p. (in Russian).
- Cheremoshkina L.V., Osinina T.N. *Mnemicheskie sposobnosti v period perekhoda ot podrostkovogo k yunosheskomu vozrastu (po materialam longitudnogo issledovaniya)* [Mnemonic abilities during the transition from adolescence to adolescence (based on the materials of a longitudinal study)]. *Psikhologicheskii zhurnal* [Psychological Journal]. 2020. T. 41. V. 6. P. 35–47. (in Russian).
- Shadrikov V.D., Cheremoshkina L.V. *Mnemicheskie sposobnosti: razvitie i diagnostika* [Mnemonic abilities: development and diagnosis]. Moscow. Pedagogika, 1990. 175 p. (in Russian).
- Shekhter M.S. *Problemy odnomomentnogo zritel'nogo opoznaniya* [Problems of simultaneous visual identification]

- cation]. Moscow University Psychology Bulletin. Series 14. Psychology. 1978. V. 4. P. 11–25. (in Russian).
- Shipikhina I.I. *Sravnitel'nyi analiz rezul'tativnosti vosproizvedeniya verbal'nogo i neverbal'nogo materiala ispytue-myimi raznogo vozrasta*. Diplomnaya rabota. Nauchnyi rukovoditel' Cheremoshkina L.V. [Comparative analysis of the effectiveness of reproduction of verbal and nonverbal material by subjects of different ages. Graduate work. Scientific supervisor Cheremoshkina L.V.] Moscow. RGSU, 2005. (in Russian).
- Yarbus A.L. *Rol' dvizhenii glaz v protsesse zreniya* [The role of eye movements in the process of vision]. Moscow. Nauka, 1965. 166 p. (in Russian).
- Cheremoshkina L.V., Dymnikova M.V. Working Memory Span Research for Geometric Material Processing. *Asian Journal of Humanities and Social Studies*. 2017. V. 05–I. 6. P. 366–370.
- Cheremoshkina L.V., Osinina T.N. *About the laws of reproduction of educational material*. European Applied Sciences, Germany. 2013. V. 5. P. 151–155.
- Craik F.I.M. & Lockhart R.S. *Level of processing*. A framework for memory research. *Journal of Verbal Learning & Verbal Behavior*. 1972. V. 11. P. 671–684.
- Miller George A. *The Magical Number Seven, Plus or Minus Two*. *The Psychological Review*. 1956. V. 63. P. 81–97.
- Rouder J.N., Morey R.D., Morey C.C., Cowan N. *How to measure working memory capacity in the change detection paradigm*. *Psychon Bull Rev*. 2011. V. 18 (2). P. 324–330.
- Schachter D. *The seven sins of memory*. Boston, Houghton Mifflin Company. 2001. 272 p.

УДК 612.858.78

## ПЕРСПЕКТИВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА РЕГИСТРАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ ОТОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ВНУТРИЧЕРЕПНОГО ДАВЛЕНИЯ

© 2022 г. О. Б. Пасекова<sup>1,\*</sup>, Е. Э. Сигалева<sup>1</sup>, Л. Ю. Марченко<sup>1</sup>, К. П. Иванов<sup>1,2</sup>, Э. И. Мащнев<sup>1</sup>,  
О. И. Орлов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН  
123007 Москва, Хорошевское шоссе, 76А, Россия

<sup>2</sup> Российский университет дружбы народов  
117198 Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, Россия

\*E-mail: obp1710@gmail.com

Поступила в редакцию 05.04.2022 г.

После доработки 14.06.2022 г.

Принята к публикации 20.07.2022 г.

Экспериментальное исследование выполнено в условиях наземного моделирования физиологических эффектов микрогравитации – 21-суточной “сухой” иммерсии. На протяжении эксперимента десять здоровых добровольцев находились в ванне, наполненной термонейтральной ( $t = 33 \pm 1^\circ\text{C}$ ) водой, в положении лежа на спине, отделенные от поверхности воды водонепроницаемой пленкой и полностью погруженные в воду. Исследование функционального состояния улитки внутреннего уха проводилось с использованием методов задержанной вызванной отоакустической эмиссии (ЗВОАЭ) и отоакустической эмиссии на частоте продукта искажения (ПИОАЭ). Анализ полученных данных показал статистически значимое снижение показателя отношения сигнал/шум ЗВОАЭ на частоте стимуляции 1 кГц ( $p \leq 0.05$ ) и тенденцию к снижению показателя отношения сигнал/шум ПИОАЭ на частотах стимуляции ниже 1 кГц (556; 684; 988 Гц). Регистрация отоакустической эмиссии предлагается в качестве перспективного неинвазивного метода для изучения механизмов перераспределения жидких сред организма в краниальном направлении в условиях моделируемой микрогравитации и космического полета.

**Ключевые слова:** задержанная вызванная отоакустическая эмиссия, отоакустическая эмиссия на частоте продукта искажения, микрогравитация, “сухая” иммерсия, внутричерепное давление

**DOI:** 10.31857/S0235009222040059

### ВВЕДЕНИЕ

Физиологическое моделирование микрогравитационных эффектов на организм человека с использованием метода “сухой” иммерсии было разработано специалистами ГНЦ РФ-ИМБП РАН в 1970-х гг. Е.Б. Шульженко и И.Ф. Виль-Вильямс предложили метод длительного проведения иммерсионных исследований, основанный на принципе “сухого” погружения, создаваемого специальной водонепроницаемой и высокоэластичной тканью (Шульженко, Виль-Вильямс, 1976; Шульженко, 1975). В этом случае испытуемый в положении лежа укладывался на гидроизолирующую ткань и погружался в иммерсионную среду (ванну, наполненную термонейтральной водой) до уровня шеи. Площадь поверхности используемой ткани значительно превышала площадь водной поверхности. Складки гидроизоли-

рующего материала вместе с иммерсионной средой, заключенной в них, смыкались на средней линии тела испытуемого, свободно облекая его со всех сторон. Никаких ложементов, которые могли бы служить опорой для тела испытуемого в иммерсионной среде, не применялось. Высокоэластичные свойства ткани искусственно повышали плотность жидкости, создавая условия практически нулевой плавучести. С момента появления модель “сухой” иммерсии стала основной в России для изучения эффектов невесомости (Томиловская и др., 2020).

На сегодняшний день проведен ряд исследований, результаты которых свидетельствуют об односторонних изменениях, происходящих в организме человека во время кратковременных реальных космических полетов и в условиях пребывания в “сухой” иммерсии. Микрогравитация

и ограничение двигательной активности космонавтов в условиях космического полета приводят к различным физиологическим изменениям в отдельных органах и системах их организма. К этим изменениям в первую очередь следует отнести перераспределение жидких сред организма в краниальном направлении, опорную и весовую аксиальную разгрузку, гиподинамию. Указанные факторы моделируются в земных условиях при использовании модели “сухой” иммерсии (Козловская, 2008; Tomilovskaya et al., 2019).

Перераспределение жидких сред организма в краниальном направлении, происходящее, как в условиях реального космического полета, так и при моделировании факторов космического полета, не исключает возможности повышения внутричерепного давления (ВЧД). По данным американских исследователей, у некоторых членов экипажей Международной космической станции, совершивших длительные полеты, отмечены изменения зрительных функций и отек сосочков зрительных нервов, что, предположительно, связано с повышением ВЧД в условиях невесомости (Рукавишников и др., 2013).

У астронавтов и космонавтов, совершивших длительные космические полеты, по данным функциональной магнитно-резонансной томографии отмечаются признаки кортикальной реорганизации, изменения функциональных взаимодействий кортикальных нейронных сетей (Pechenkova et al., 2019; Demertzi et al., 2016).

Проспективное исследование количественных изменений объема цереброспинальной жидкости в желудочках головного мозга космонавтов по результатам анализа данных магнитно-резонансной томографии до и после полета, а также через 7 мес после приземления, показало значительное увеличение объемов бокового и третьего желудочков мозга, а также общего объема желудочков мозга в послеполетном периоде. В позднем послеполетном периоде сохранялось остаточное увеличение объемов желудочков, что было обусловлено, по мнению авторов, снижением реорборции цереброспинальной жидкости в условиях микрогравитации (Van Ombergen et al., 2019).

Мониторинг изменений ВЧД необходим для динамической оценки функционального состояния космонавтов, что является важным компонентом медицинского обеспечения пилотируемых космических полетов. Предполагается возможность осуществления неинвазивного мониторинга ВЧД с использованием регистрации различных классов отоакустической эмиссии (ОАЭ) (Avan et al., 2018; Väiki et al., 2009).

ОАЭ представляет собой колебания, генерируемые волосковыми клетками улитки внутреннего уха спонтанно или в ответ на воздействие акустического стимула. Колебания наружных волоско-

вых клеток передаются ретроградным путем через цепь слуховых косточек к барабанной перепонке, которая колеблется подобно мембране громкоговорителя и передает сигналы в виде звуковых волн в наружный слуховой проход. Слуховой нерв в генерации ОАЭ не участвует. ОАЭ может быть зарегистрирована в наружном слуховом проходе при нормальном функционировании среднего уха. Параметры отоакустического ответа имеют различные показатели в зависимости от частоты предъявления стимулов. В случае сохранения нормальной слуховой функции эти параметры остаются стабильными (Beattie et al., 2003). В настоящее время метод регистрации ОАЭ нашел широкое применение в отоларингологической и аудиологической практике для диагностики нарушений слуха (Harris, Probst, 2002).

Известно, что изменения ВЧД оказывают влияние на внутреннее ухо путем связи субарахноидального пространства головного мозга с перилимфатическим пространством внутреннего уха через кохлеарный водопровод (Väiki et al., 1996). Передача давления цереброспинальной жидкости во внутреннее ухо через кохлеарный водопровод осуществляется в течение нескольких секунд (Thalen et al., 2001). Повышение ВЧД, передающееся на внутривлабиринтное пространство, приводит к увеличению гидростатической нагрузки на стремячко в области овального окна, увеличению жесткости его кольцевидной связки, что вызывает в свою очередь изменения параметров ОАЭ. В связи с этим предполагают возможность осуществлять мониторинг изменений уровня ВЧД путем оценки вызванного ответа наружных волосковых клеток улитки на стимуляцию акустическими стимулами, на чем и основан метод регистрации ОАЭ (Kemp, 1978).

В исследовании И.В. Рукавишникова и соавт. в условиях 7-часовой и 3-суточной “сухой” иммерсии изучалась динамика параметров ОАЭ с использованием метода регистрации электрической активности наружных волосковых клеток (DPMC – Phase Shift of Microphonic Cochlear Potential) при изменении положения тела по схеме: положение “сидя” – “горизонтальное” положение – “антиортостатическое” положение под углом  $-6^\circ$  – положение “сидя”. Были получены результаты, свидетельствующие о тенденции сдвига параметров фазы отоакустического ответа в сторону увеличения при переходе из “горизонтального” положения в “антиортостатическое”, что, по мнению авторов, связано с возможным повышением ВЧД. В данном исследовании была предложена перспектива использования регистрации ОАЭ для неинвазивной оценки параметров ВЧД в условиях моделирования физиологических эффектов невесомости (Рукавишников и др., 2013).

Цель настоящей работы – изучение влияния отдельных факторов микрогравитации в условиях моделируемого эксперимента с 21-суточной “сухой” иммерсией на функциональное состояние внутреннего уха человека и оценки информативности и перспективы применения метода регистрации отоакустической эмиссии для неинвазивного контроля возможных изменений ВЧД в условиях “сухой” иммерсии.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании приняли участие десять соматически здоровых мужчин-добровольцев в возрасте от 23 до 34 лет, медиана возраста – 30.5 лет, с отсутствием указаний на заболевания органа слуха в анамнезе. По данным тональной аудиометрии была исключена патология слуховой системы на момент начала испытаний. Все добровольцы имели допуск врачебно-экспертной комиссии ГНЦ РФ ИМБП РАН и подписали Информированное согласие на участие в исследовании. Программа эксперимента была одобрена Комиссией по биомедицинской этике ГНЦ РФ ИМБП РАН (протокол № 483 от 3 августа 2018 г.).

Регистрацию и математический анализ параметров ОАЭ проводили при помощи широко используемого в аудиологической практике прибора “Нейро-Аудио” производства компании “Нейрософт”, Россия. Применялись методики регистрации задержанной вызванной отоакустической эмиссии (ЗВОАЭ) и отоакустической эмиссии на частоте продукта искажения (ПИОАЭ).

Регистрацию ОАЭ у добровольцев проводили в период пребывания их в иммерсионной ванне, в положении лежа на спине, в условиях минимизации внешнего шумового фона, последовательно на 3-и, 7-, 14- и 21-е сутки эксперимента.

Исследования фоновых параметров (“фон”) и периода последствия (“после воздействия”) были выполнены в аналогичных внешних условиях, в помещении стенда “сухая” иммерсия, в положении испытуемого лежа на кушетке, вне иммерсионной ванны. Уровень внешнего шума в момент проведения исследований не превышал 40 дБ (по данным приложения “Шумомер” для ОС Android).

Для регистрации различных классов ОАЭ (ЗВОАЭ и ПИОАЭ) использовали внутриушной датчик со сменной индивидуальной насадкой, помещенной в наружный слуховой проход. Последовательно проводили моноауральную стимуляцию левого и правого уха соответственно.

При регистрации ЗВОАЭ использовали стимуляцию широкополосными звуковыми щелчками с частотой 1–5 кГц, интенсивностью 70 дБ УЗД, длительностью 1 мс. Звуковые стимулы предъявлялись в так называемом “нелинейном режиме”.

Предъявляемые акустические стимулы были объединены в группы, состоящие из четырех щелчков. Первые три звуковых щелчка в каждой группе имели одинаковую полярность и равную интенсивность. Четвертый щелчок имел противоположную полярность и превосходил предыдущие стимулы по интенсивности в 3 раза. Последовательно осуществляли регистрацию вызванного ответа волосковых клеток внутреннего уха на предъявленные стимулы. Анализ параметров ЗВОАЭ проводили по 1000 усреднениям. Критериями репрезентативности ответа для дальнейшего анализа результатов были: воспроизводимость ответа ОАЭ – не менее 60%, соотношение сигнал/шум – не менее 6 дБ УЗД. Оценивали показатели отношения сигнал/шум (дБ) для частот 1, 2, 3 и 4 кГц.

При регистрации ПИОАЭ использовали стимуляцию парой чистых тонов с частотами  $f_1 - f_2$ , интенсивностью  $F_1 - 65, F_2 - 55$  дБ УЗД, длительностью 5 мс в частотной полосе стимуляции 556–4000 Гц. Отношение между частотами составляло:  $f_1 = 1.2 f_2$ . В ответ на стимуляцию в связи с нелинейными свойствами улитки в слуховом проходе, помимо подаваемых тонов, появлялись их кубические продукты искажения. Регистрировали самый мощный из них – на частоте  $2f_1 - f_2$ . Критериями оценки результатов были: воспроизводимость ответа не менее 70%, соотношение сигнал/шум – не менее 6 дБ УЗД. Оценивали показатели отношения сигнал/шум (дБ) для частот 556; 684; 988; 1481; 2222; 2963 и 4444 Гц.

Для ЗВОАЭ измерения выполнены с участием десяти добровольцев ( $n = 10$ ).

Регистрация ПИОАЭ проведена с участием шести добровольцев ( $n = 6$ ).

Для оценки результатов исследований использовали средние по группе испытуемых ( $M \pm m$ ) показатели отношения сигнал/шум ОАЭ (дБ), для правого и левого уха соответственно.

Статистическую обработку полученных результатов проводили методом описательной статистики с использованием пакета STATISTICA (версия 10.0) для Windows. Для сравнения значимости различий между средними значениями выборок использовали непараметрический критерий Вилкоксона. На всех этапах эксперимента различия оценивали по сравнению с фоновыми значениями. Статистически значимыми считали различия при  $p \leq 0.05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Всего было выполнено 952 измерения. Для ЗВОАЭ общее количество измерений в частотной полосе 1–4 кГц составило – 448, из которых критерий “воспроизводимости ответа не менее 60%” соответствовали: 334 (74.55%); для “фоновых из-

**Таблица 1.** Показатели отношения сигнал/шум (дБ) ЗВОАЭ ( $n = 10$ ) в эксперименте с 21-суточной “сухой” иммерсией ( $M \pm m$ )

Показатели		Частота стимуляции						
		Исследуемое ухо	Фон	3-и сутки	7-е сутки	14-е сутки	21-е сутки	После воздействия
Сигнал/шум, дБ ЗВОАЭ ( $n = 10$ )	1 кГц	Правое ухо	$3.8 \pm 1.6$	$-0.7 \pm 0.8^*$	$-1.1 \pm 1.1^*$	$-1.2 \pm 1.5^*$	$-2.4 \pm 1.8^*$	$5.2 \pm 1.9$
		Левое ухо	$5.2 \pm 1.2$	$-1.8 \pm 1.6^*$	$-0.9 \pm 1.7^*$	$-2.1 \pm 1.4^*$	$-1.4 \pm 1.7^*$	$6.3 \pm 2.5$
	2 кГц	Правое ухо	$11.3 \pm 1.2$	$10.5 \pm 1.9$	$7.5 \pm 2.3$	$10.4 \pm 2.1$	$8.0 \pm 2.8$	$10.8 \pm 1.5$
		Левое ухо	$9.0 \pm 1.4$	$6.8 \pm 3.5$	$3.7 \pm 2.5$	$8.7 \pm 1.5$	$7.5 \pm 1.9$	$11.3 \pm 0.7$
	3 кГц	Правое ухо	$9.6 \pm 0.7$	$10.5 \pm 1.2$	$9.8 \pm 2.0$	$10.5 \pm 0.9$	$10.1 \pm 1.4$	$7.3 \pm 0.4$
		Левое ухо	$7.1 \pm 1.1$	$7.2 \pm 2.3$	$6.2 \pm 1.3$	$9.9 \pm 0.8$	$9.0 \pm 0.9$	$7.5 \pm 0.8$
	4 кГц	Правое ухо	$2.3 \pm 1.2$	$5.0 \pm 1.3$	$6.8 \pm 1.3$	$5.7 \pm 1.2$	$5.2 \pm 1.2$	$1.0 \pm 2.3$
		Левое ухо	$0.2 \pm 1.0$	$2.8 \pm 2.5$	$4.4 \pm 1.6$	$5.2 \pm 1.0$	$5.4 \pm 0.9$	$2.8 \pm 1.4$

Примечание: \* – достоверно значимые различия ( $p \leq 0.05$ ).

мерений” – 65 из 80 измерений (81.25%), для измерений “на 3-и сутки” – 57 из 80 измерений (71.25%), для измерений “на 7-е сутки” – 55 из 80 измерений (68.75%), для измерений “на 14-е сутки” – 61 из 80 измерений (76.25%), для измерений “на 21-е сутки” – 56 из 80 измерений (70%), для измерений в периоде последействия (“после воздействия”) – 40 из 48 измерений (83.33%).

Для ПИОАЭ общее количество измерений в частотной полосе 556 – 4444 Гц составило 504 измерения, из которых безартефактных, доступных для обработки и анализа измерений, составили 420 из 504 (83.33%); критерию “воспроизводимости ответа не менее 70%” соответствовали: 390 из 504 измерений (77.4%); по “фоновым измерениям” – 56 из 56 измерений (100%); по измерениям на “3-и сутки” – 64 из 70 измерений (91.4%); по измерениям “на 7-е сутки” – 75 из 84 измерений (89.2%); “на 14-е сутки” – 75 из 84 измерений (89.2%), на “21-е сутки” – 67 из 70 измерений (95.7%) и для периода последействия (“после воздействия”) – 53 из 56 измерений (94.6%) соответственно.

Таким образом, зарегистрированные ответы ОАЭ, полученные в ходе исследования, характеризовались высокой репрезентативностью и могли быть учтены в статистическом анализе.

При анализе полученных данных ЗВОАЭ для частоты стимуляции 1 кГц показатели отношения сигнал/шум ( $M \pm m$ ) в фоне составили в среднем по группе ( $n = 10$ ) для правого уха –  $3.8 \pm 1.6$  дБ, для левого уха –  $5.2 \pm 1.2$  дБ. Во время пребывания испытуемых в иммерсионной ванне при измерениях на 3-и, 7-, 14- и 21-е сутки воздействия отмечалось статистически достоверное ( $p \leq 0.05$ ) снижение (до отрицательных значений) параметров отношения сигнал/шум ЗВОАЭ (дБ), что со-

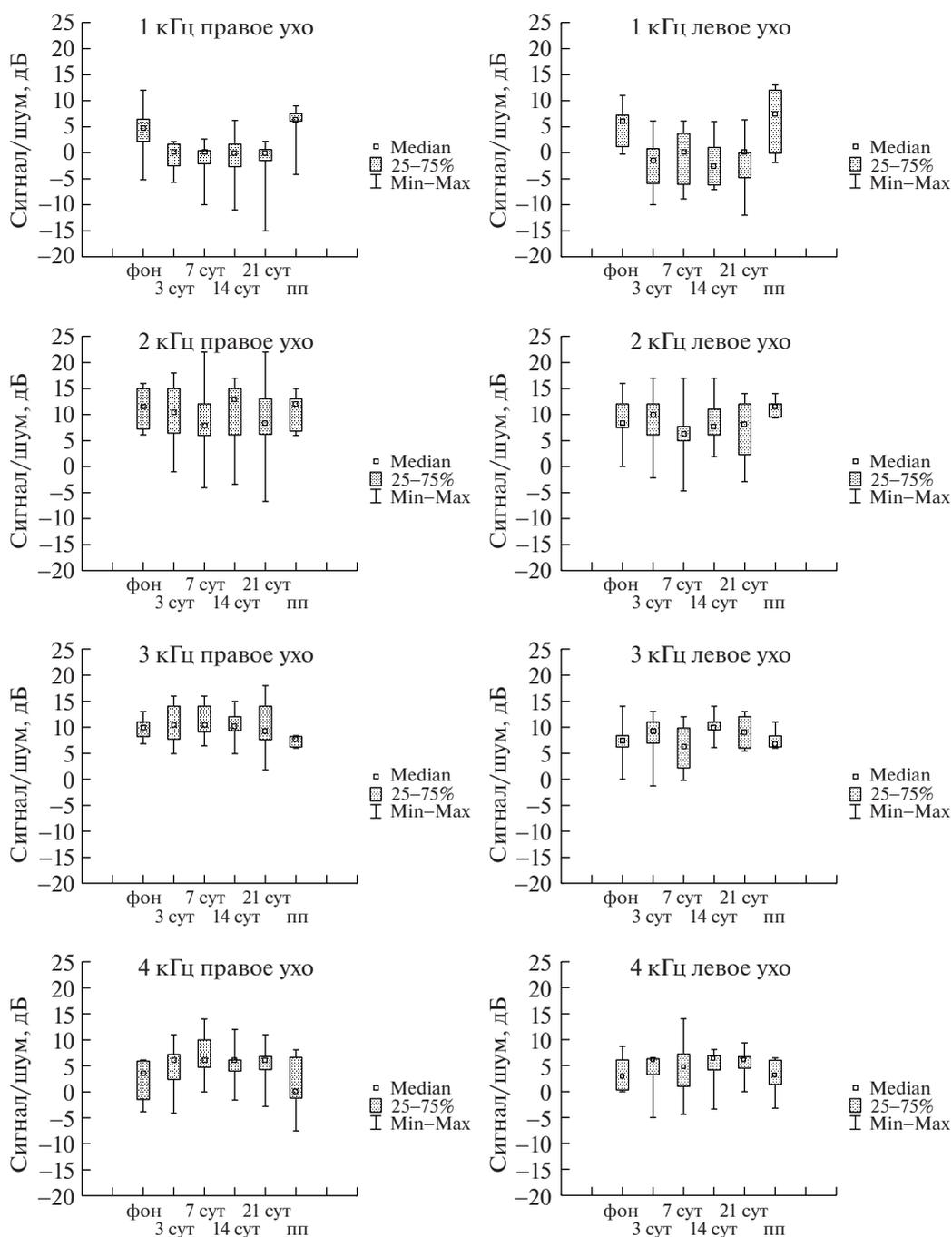
ставляло: на 3-и сутки воздействия –  $-0.7 \pm 0.8^*$  ( $p = 0.021825$ ) и  $-1.8 \pm 1.6^*$  ( $p = 0.012516$ ) дБ, на 7-е сутки –  $-1.1 \pm 1.1^*$  ( $p = 0.046854$ ) и  $-0.9 \pm 1.7^*$  ( $p = 0.024933$ ) дБ, на 14-е сутки –  $-1.2 \pm 1.5^*$  ( $p = 0.036659$ ) и  $-2.1 \pm 1.4^*$  ( $p = 0.012516$ ) дБ, на 21-е сутки –  $-2.4 \pm 1.8^*$  ( $p = 0.036659$ ) и  $-1.4 \pm 1.7^*$  ( $p = 0.021825$ ) дБ (правое и левое ухо соответственно).

В периоде последействия на 14-е сутки, а для двух испытуемых измеренные на 1- и 2-е сутки по окончании воздействия показатели ЗВОАЭ для частоты 1 кГц вернулись к положительным величинам.

Для показателей отношения сигнал/шум ЗВОАЭ в частотном диапазоне стимуляции 2–4 Гц при измерениях на протяжении эксперимента и в последействии отмечались незначительные, разнонаправленные, в границах положительных значений изменения, статистически достоверных изменений для данных показателей выявлено не было (табл. 1).

Анализ динамики параметров медиан и интерквартильного размаха отношения сигнал/шум ЗВОАЭ показал вариабельный диапазон степеней дисперсии внутригрупповых индивидуальных значений и достоверное снижение отношения сигнал/шум ЗВОАЭ на частоте 1 кГц. Для частот стимуляции выше 1 кГц достоверных отклонений параметров выявлено не было (рис. 1).

При анализе динамики изменения параметров ПИОАЭ для частот стимуляции 556; 684 и 988 Гц обращает на себя внимание выраженное снижение до отрицательных значений показателей отношения сигнал/шум в период иммерсионного воздействия с восстановлением параметров к фоновым значениям в периоде последействия (табл. 2).



**Рис. 1.** Показатели отношения сигнал/шум, дБ ЗВОАЭ для частот стимуляции 1–4 кГц. Представлены медианы и интерквартильный размах 25–75%.

Примечание: фон – фоновые параметры, 3-и, 7-, 14-, 21-е сутки – период воздействия, пп – период последствия.

Для частот стимуляции 2222; 2963 и 4444 Гц прослеживается тенденция к снижению параметров ПИОАЭ на протяжении всего периода иммерсионного воздействия. С увеличением частоты тенденция снижения приобретает более “плавный” характер, разница между фоновыми показателями и показателями ПИОАЭ в процессе воздействия с увеличением частоты стимуляции становится менее выраженной. В послед-

ствии показатели отношения сигнал/шум ПИОАЭ приблизились к фоновым значениям. Для частот стимуляции 2222; 2963 и 4444 Гц значения параметра отношения сигнал/шум в фоне и последствии были также выше значений, отмеченных в процессе воздействия, однако, различия показателей были менее выраженными, отмечались небольшие в границах положительных значений изменения параметров ПИОАЭ (табл. 2).

**Таблица 2.** Показатели отношения сигнал/шум (дБ) ПИОАЭ ( $n = 6$ ) в эксперименте с 21-суточной “сухой” иммерсией ( $M \pm m$ )

Показатели		Частота стимуляции						
		Исследуемое ухо	фон	3-и сутки	7-е сутки	14-е сутки	21-е сутки	После воздействия
Сигнал/шум, дБ ПИОАЭ ( $n = 6$ )	556 Гц	Правое ухо	4.8 ± 1.6	-3.7 ± 3.4	-8.2 ± 3.3	-5.6 ± 2.5	-0.9 ± 1.6	2.4 ± 2.0
		Левое ухо	1.5 ± 3.0	-6.9 ± 1.2	-2.9 ± 2.4	-6.0 ± 1.4	-4.6 ± 2.6	-1.8 ± 3.6
	684 Гц	Правое ухо	1.3 ± 4.6	-6.1 ± 2.5	-4.7 ± 2.6	-4.9 ± 2.2	0.6 ± 2.0	2.1 ± 2.6
		Левое ухо	4.9 ± 1.5	-0.6 ± 3.2	-1.8 ± 3.0	-5.2 ± 1.8	-1.0 ± 3.5	3.6 ± 1.3
	988 Гц	Правое ухо	5.0 ± 0.2	-0.9 ± 2.1	-2.7 ± 2.3	-3.4 ± 1.5	1.8 ± 2.5	5.1 ± 0.7
		Левое ухо	5.8 ± 1.1	-1.1 ± 2.0	-2.3 ± 3.5	-4.0 ± 4.3	-0.4 ± 3.4	3.2 ± 2.8
	1481 Гц	Правое ухо	11.4 ± 3.9	4.4 ± 0.1	4.7 ± 0.4	5.0 ± 0.2	7.0 ± 1.5	11.2 ± 2.5
		Левое ухо	12.4 ± 4.4	5.8 ± 1.0	5.0 ± 0.6	5.1 ± 0.6	7.0 ± 1.9	8.7 ± 2.6
	2222 Гц	Правое ухо	12.4 ± 2.9	8.5 ± 1.8	7.1 ± 1.6	8.7 ± 1.9	8.5 ± 2.8	13.8 ± 3.5
		Левое ухо	14.8 ± 3.8	10.0 ± 2.1	8.4 ± 1.9	7.5 ± 1.1	7.7 ± 1.4	10.1 ± 2.0
	2863 Гц	Правое ухо	15.5 ± 3.7	12.9 ± 1.6	8.9 ± 2.1	12.5 ± 2.1	9.6 ± 2.2	15.7 ± 3.3
		Левое ухо	11.5 ± 2.4	10.3 ± 2.8	8.1 ± 2.0	10.7 ± 2.3	10.8 ± 1.5	13.8 ± 2.7
	4444 Гц	Правое ухо	17.5 ± 4.4	16.7 ± 2.7	13.5 ± 2.2	12.6 ± 2.9	16.8 ± 2.8	20.3 ± 2.8
		Левое ухо	9.1 ± 3.5	12.2 ± 3.8	10.8 ± 2.5	11.0 ± 2.0	11.4 ± 2.4	13.9 ± 3.3

Примечание: \* – достоверно значимые различия ( $p \leq 0.05$ ).

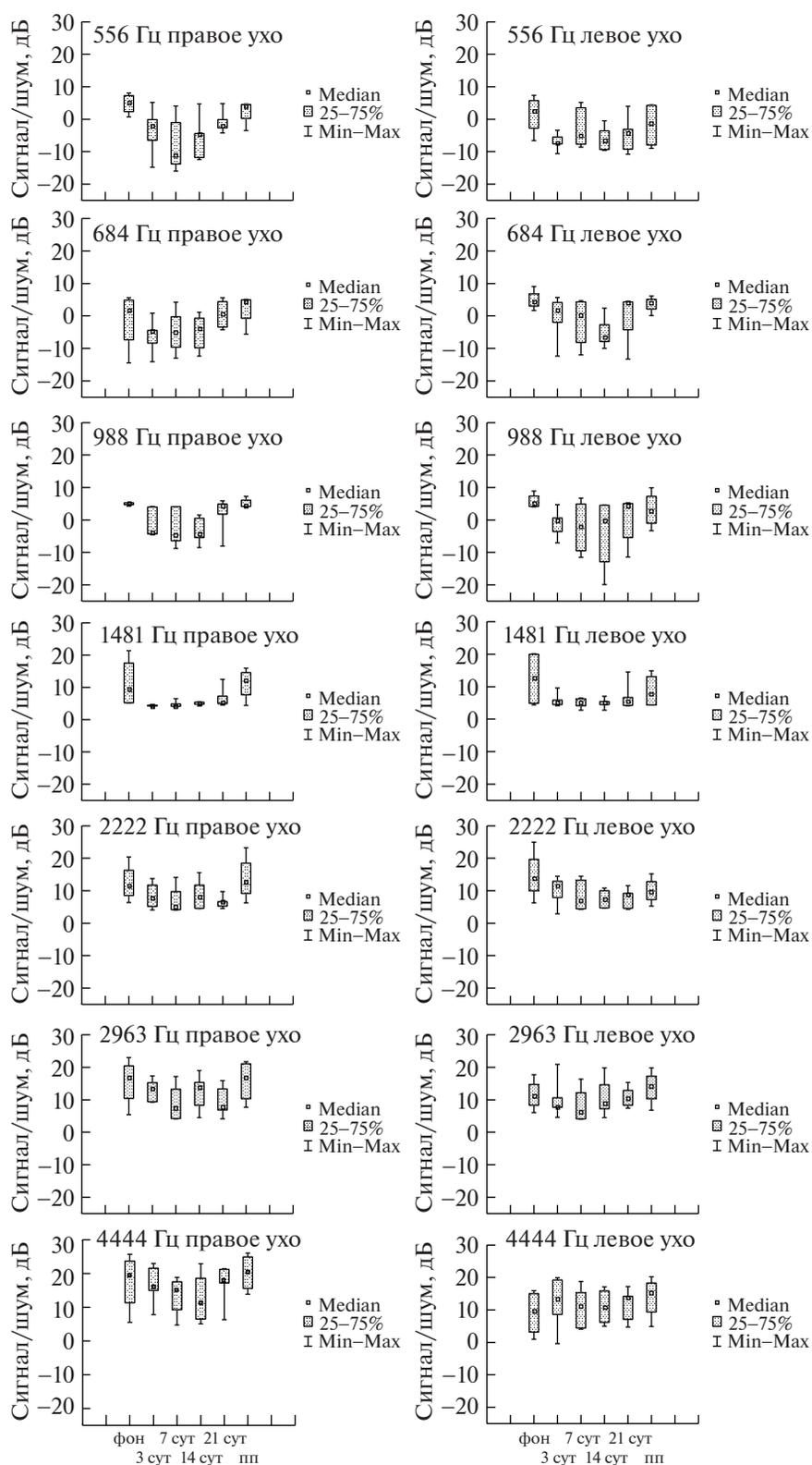
Достоверных различий при статистическом анализе данных ПИОАЭ получено не было. Возможно, это связано с недостаточным для статистической обработки количеством измерений (на отдельных этапах исследования корректные измерения получены не для всей группы испытуемых). Однако при визуальном анализе графиков, представляющих динамику изменения параметров медиан и интерквартильного размаха внутригрупповых показателей отношения сигнал/шум ПИОАЭ, обращает на себя внимание выраженное снижение до отрицательных значений, величин для частот стимуляции 556; 684 и 988 Гц. На частоте стимуляции 1481 Гц отмечена отчетливая тенденция к снижению параметров ПИОАЭ в сравнении с фоновыми (в границах положительных величин) и сохранении относительно стабильных значений на протяжении всего периода воздействия. Для частот стимуляции 2222; 2963 и 4444 Гц отмечены незначительные изменения параметров ПИОАЭ (рис. 2).

### ОБСУЖДЕНИЕ

Со времени открытия феномена отоакустической эмиссии (ОАЭ) (Кетр, 1978) были проведены ряд исследований, касающиеся как теоретических аспектов механизмов генерации ОАЭ, так и возможностей использования метода для неинвазивного мониторинга ВЧД. Было выдвинуто

предположение о влиянии интралабиринтного давления на параметры отоакустического ответа (Wilson, 1980). Описано влияние изменения положения тела из “вертикального” в положение “лежа на спине” на параметры различных классов отоакустической эмиссии (Bell, 1992). В дальнейших исследованиях было показано, что изменения ВЧД могут быть выявлены при помощи метода регистрации ОАЭ. Ряд авторов указывали на изменение показателей ОАЭ в зависимости от изменения уровня ВЧД. В серии экспериментов с регистрацией ОАЭ при изменении положения тела из положения “сидя” в положение “лежа” с наклоном головного конца кровати от 0 до -30° показана высокая чувствительность частот ОАЭ, ниже 2 кГц к изменениям ВЧД (Büki et al., 2000).

В исследовании с регистрацией параметров ПИОАЭ при перемене положения тела испытуемого, находящегося на наклонном столе с различным углом наклона головного конца (90°, 0°, -30° и -45°), были показаны достоверные изменения ( $p \leq 0.01$ ) параметров ПИОАЭ. При перемене положения тела из “вертикального” в положение “лежа под углом -45°”, были продемонстрированы достоверные изменения параметров ПИОАЭ на частотах от 750 до 1500 Гц, тогда как на частотах выше 1500 Гц изменения ПИОАЭ были минимальными (Voss et al., 2006). В исследовании с применением различных методов регистрации отоакустического ответа – спонтанной



**Рис. 2.** Показатели отношения сигнал/шум, дБ ПИОАЭ для частот стимуляции 556; 684; 988; 1481; 2222; 2963; 4444 Гц. Представлены медианы и интерквартильный размах 25–75%.

Примечание: фон – фоновые параметры, 3-и, 7-, 14-, 21-е сутки – период воздействия, пп – период последействия.

отоакустической эмиссии (СОАЭ), ЗВОАЭ и ПИОАЭ у здоровых добровольцев и пациентов с нормотензивной гидроцефалией при положениях тела горизонтально “лежа на спине” и положении “лежа с различным углом наклона” ( $-30^{\circ}/+30^{\circ}$ ) было отмечено, что повышение ВЧД у здоровых добровольцев приводит к снижению амплитуды ответа СОАЭ и ЗВОАЭ. При регистрации ПИОАЭ выявлено частотно-зависимое снижение амплитуды ответа с максимальной выраженностью изменений на низких частотах как в контрольной группе, так и в группе пациентов (Frank et al., 2000). Лоули и соавт. было проведено инвазивное измерение ВЧД в условиях изменения положения тела из “вертикального” в положение “лежа” моделируемой 24-часовой микрогравитации в антиортостатическом положении ( $-6^{\circ}$ ) и во время острой микрогравитации в параболическом полете, выявившее умеренно выраженные изменения ВЧД в этих условиях (Lawley et al., 2017). В эксперименте с использованием неинвазивного метода регистрации ОАЭ в условиях острой микрогравитации при параболических полетах было доказано, что этот метод является сопоставимым и конкурентным по сравнению с инвазивными методами для оценки динамики ВЧД (Avan et al., 2018).

Таким образом, полученные в эксперименте с 21-суточной “сухой” иммерсией достоверные изменения параметров ОАЭ обусловлены физиологическими эффектами моделируемых эффектов микрогравитации, связанными с перераспределением жидких сред организма в краниальном направлении, что полностью согласуется с данными исследований других авторов и литературными источниками.

Полученные результаты подтверждают перспективность использования регистрации различных классов ОАЭ для изучения возможного феномена микрогравитационного повышения ВЧД у космонавтов в космическом полете.

## ВЫВОДЫ

– В эксперименте с моделируемой микрогравитацией в условиях 21-суточной “сухой” иммерсии при регистрации задержанной вызванной отоакустической эмиссии (ЗВОАЭ) выявлено достоверное ( $p \leq 0.05$ ) снижение показателей отношения сигнал/шум для частоты стимуляции 1 кГц.

– При регистрации отоакустической эмиссии на частоте продукта искажения (ПИОАЭ) выявлена тенденция к снижению показателей отношения сигнал/шум для частот стимуляции ниже 1 кГц (556; 684 и 988 Гц).

– Полученные в настоящем эксперименте результаты полностью согласуются с данными других исследователей об изменении показателей

ОАЭ в низкочастотном диапазоне при повышении ВЧД.

– Подтверждена связь изменений параметров ОАЭ в низкочастотном диапазоне с перераспределением жидких сред организма в краниальном направлении, что свидетельствует о возможной нарастающей гидратации субарахноидального пространства головного мозга, повышении внутрилабиринтного и внутричерепного давления в условиях моделируемой микрогравитации.

– Метод регистрации ОАЭ предлагается в качестве перспективного метода неинвазивного мониторинга динамики ВЧД в условиях космического полета.

Работа выполнена в рамках базовых тем 65.1 и 64.1 ФНИ РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Козловская И.Б. Фундаментальные и прикладные задачи иммерсионных исследований. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2008. Т. 42. № 5. С. 3–7.
- Рукавишников И.В., Томиловская Е.С., Мацнев Э.И., Дениз П., Эван П. Отоакустическая эмиссия как опосредованный метод оценки внутричерепного давления в условиях моделирования физиологических эффектов микрогравитации. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2013. № 47. С. 130.
- Томиловская Е.С., Рукавишников И.В., Амирова Л.Е., Шигуева Т.А., Савеко А.А., Китов В.В., Васильева Г.Ю., Пономарев С.А., Смирнова Т.А., Козловская И.Б., Орлов О.И. 21-суточная “сухая” иммерсия: особенности проведения и основные итоги. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2020. Т. 54. № 4. С. 5–14. <https://doi.org/10.21687/0233-528X-2020-54-4-5-14>
- Шульженко Е.Б. *Физиологические эффекты измененной гравитации* (модельные эксперименты в модельных условиях): Дис. ... докт. мед. наук. М. 1975.
- Шульженко Е.Б., Виль-Вильямс И.Ф. Возможность проведения длительной водной иммерсии методом сухого погружения. *Космическая биология и авиакосмическая медицина*. 1976. Т. 10. № 2. С. 82–84.
- Avan P., Normand H., Giraudet F., Gerenton G., Denise P. Noninvasive in-ear monitoring of intracranial pressure during microgravity in parabolic flights. *J. Appl. Physiol.* 2018. V. 125. № 2. P. 353–361. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00032.2018>
- Beattie R.C., Kenworthy O.T., Luna C.A. Immediate and short-term reliability of distortion-product otoacoustic emissions. *Int. J. Audiol.* 2003. V. 42. № 6. P. 348–354. <https://doi.org/10.3109/14992020309101328>
- Bell A. Circadian and menstrual rhythms in frequency variations of spontaneous otoacoustic emissions from human ears. *Hear. Res.* 1992. V. 58. P. 91–100. [https://doi.org/10.1016/0378-5955\(92\)90012-c](https://doi.org/10.1016/0378-5955(92)90012-c)
- Büki B., Avan P., Lemaire J.J., Dordain M., Chazal J., Ribári O. Otoacoustic emissions: a new tool for monitoring intracranial pressure changes through stapes dis-

- placements. *Hear Res.* 1996. V. 94. № 2. P. 125–139.  
[https://doi.org/10.1016/0378-5955\(96\)00015-9](https://doi.org/10.1016/0378-5955(96)00015-9)
- Büki B., Chomicki A., Dordain M., Lemaire J.J., Wit H.P., Chazal J., Avan P. Middle-ear influence on otoacoustic emissions. II: contributions of posture and intracranial pressure. *Hear Res.* 2000. V. 140. P. 202–211.  
[https://doi.org/10.1016/S0378-5955\(99\)00202-6](https://doi.org/10.1016/S0378-5955(99)00202-6)
- Büki B., Giraudet F., Avan P. Non-invasive measurements of intralabyrinthine pressure changes by electrocochleography and otoacoustic emissions. *Hear Res.* 2009. V. 251. № 2. P. 51–59.  
<https://doi.org/10.1016/j.heares.2009.02.004>
- Demertzi A., Van Ombergen A., Tomilovskaya E., Jenrisen B., Pechenkova E., Di Perri C., Litvinova L., Amico E., Rumshiskaya A., Rukavishnikov I., Sijbers J., Sinitsyn V., Kozlovskaya I.B., Sunaert S., Parizel P.M., Van de Heyning P.H., Laureys S., Wuyts F.L. Cortical reorganization in an astronaut's brain after long-duration spaceflight. *Brain Structure and function.* 2016. V. 221. № 5. P. 2873–2876.  
<https://doi.org/10.1007/s00429-015-1054-3>
- Frank A.M., Alexiou C., Hulin P., Janssen T., Arnold W., Trappe A.E. Non-invasive measurement of intracranial pressure changes by otoacoustic emissions (OAEs) – a report of preliminary data. *Zentralbl Neurochir.* 2000. V. 61. № 4. P. 177–180.  
<https://doi.org/10.1055/s-2000-15597>
- Harris F.P., Probst R. Otoacoustic emissions and audiometric outcomes // In: Robinette RS, Glatcke TJ (eds) *Otoacoustic emissions. Clinical applications.* New York. 2002. P. 213–242.
- Kemp D.T. Stimulated acoustic emissions from within the human auditory system. *J. Acoust. Soc. Am.* 1978. V. 64. № 5. P. 1386–1391.  
<https://doi.org/10.1121/1.382104>
- Lawley J.S., Petersen L.G., Howden E.J., Sarma S., Cornwall W.K., Zhang R., Whitworth L.A., Williams M.A., Levine B.D. Effect of Gravity and Microgravity on Intracranial Pressure. *J. Physiol.* 2017. V. 595. № 6. P. 2115–2127.  
<https://doi.org/10.1113/JP273557>
- Pechenkova E., Nosikova I., Rumshiskaya A., Litvinova L., Rukavishnikov I., Mershina E., Sinitsyn V., Van Ombergen A., Jeurissen B., Jillings S., Laureys S., Sijbers J., Grishin A., Chernikova L., Naumov I., Kornilova L., Wuyts F.L., Tomilovskaya E., Kozlovskaya I.B. Alterations of Functional Brain Connectivity After Long-Duration Spaceflight as Revealed by fMRI. *Frontiers in Physiology.* 2019. V. 10. P. 761: 1–761: 23.  
<https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00761>
- Thalen E.O., Wit H.P., Segenhout J.M., Albers F.W. Dynamics of Inner Ear Pressure Change Caused by Intracranial Pressure Manipulation in the Guinea Pig. *Acta Otolaryngol.* 2001. V. 121. P. 470–476.
- Tomilovskaya E., Shigueva T., Sayenko D., Rukavishnikov I., Kozlovskaya I. Dry Immersion as a Ground-Based Model of Microgravity Physiological Effects. *Front Physiol.* 2019. V. 10. P. 284–289.  
<https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00284>
- Van Ombergen A., Jillings S., Jeurissen B., Tomilovskaya E., Rumshiskaya A., Litvinova L., Nosikova I., Pechenkova E., Rukavishnikov I., Manko O., Danylichev S., Rühl R. Maxine, Kozlovskaya I.B., Sunaert S., Parizel P.M., Sinitsyn V., Laureys S., Sijbers J., zu Eulenburg P., Wuyts F.L. Brain ventricular volume changes induced by long-duration spaceflight. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2019. V. 116. № 21. P. 10531–10536.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1820354116>
- Voss S.E., Horton N.J., Tabucchi T.H., Folowosele F.O., Shera C.A. Posture-induced changes in distortion-product otoacoustic emissions and the potential for noninvasive monitoring of changes in intracranial pressure. *Neurocrit. Care.* 2006. V. 4. № 3. P. 251–157.  
<https://doi.org/10.1385/NCC:4:3:251>
- Wilson J.P. Evidence for a Cochlear Origin for Acoustic Re-Emissions, Threshold Fine-Structure and Tonal Tinnitus. *Hear Res.* 1980. V. 2. № 3. P. 233–252.  
[https://doi.org/10.1016/0378-5955\(80\)90060-x](https://doi.org/10.1016/0378-5955(80)90060-x)

## Otoacoustic emission testing in 21-day dry immersion as prospects for intracranial pressure monitoring

O. B. Pasekova<sup>a, #</sup>, E. E. Sigaleva, L. Yu. Marchenko, K. P. Ivanov<sup>b</sup>, E. I. Matsnev, and O. I. Orlov

<sup>a</sup> State Research Center of the Russian Federation – Institute for Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences  
 123007 Moscow, Choroshevskoe sh., 76A, Russia

<sup>b</sup> Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)  
 117198 Moscow, Miklukho-Maclay st., 6, Russia

<sup>#</sup>E-mail: obp1710@gmail.com

The aim of this work was to estimate the different features of transient-evoked otoacoustic emission (TEOAE) and distortion-product otoacoustic emission (DPOAE) of cochlear under conditions of simulated microgravity (21-day “dry” immersion). The study included 10 healthy male volunteers, aged 23 to 34 years (median age, 30.5 years). TEOAEs and DPOAEs were measured before the 21-day “dry” immersion, on the 3rd, 7th, 14th and 21st day of exposure and in the recovery period. The signal-to-noise ratio, dB were evaluated in the stimulation frequency band of 1 kHz – 4 kHz (for the TEOAE) and in the range from 556 Hz to 4444 Hz – frequencies 556 Hz; 684 Hz; 988 Hz; 1481 Hz; 2222 Hz; 2963 Hz and 4444 Hz (for the DPOAE). The TEOAEs date ( $n = 10$ ) presented a significant ( $p \leq 0.05$ ) decrease for a stimulation frequency of 1 kHz. The DPOAEs date ( $n = 6$ ), presented a pronounced decrease of values for stimulation at frequencies below 1 kHz (556 Hz; 684 Hz; 988 Hz). Thus, a 21-day “dry immersion” experiment data analysis showed a signif-

icant changes in cochlear function status, demonstrating the reduction in TEOAEs and DPOAEs parameters at below 1 kHz frequency. The results prove that otoacoustic emission testing of cochlear is the proposed promising noninvasive method for testing the microgravity-induced intracranial pressure increase observed during spaceflight.

*Key words:* transient-evoked otoacoustic emission, distortion-product otoacoustic emission, microgravity, dry immersion, intracranial pressure

REFERENCES

Kozlovskaya I.B. *Fundamentalnue i prikladnue zadachi immercionnuch issledovaniy* [Fundamental and applied objectives of investigations in immersion]. *Aviakosmicheskay i Ekologicheskay medichina* [Aviakosm. Ekolog. Med.]. 2008. T. 42. N 5. P. 3–7 (in Russia).

Rukavishnikov I.V., Tomilovskaya E.S., Matsnev E.I., Denise P., Avan P. *Otoakusticheskay emissiy kak oposredovannui metod ochenki vnutricherepnogo davleniy v usloviyeh modelirovaniy fiziologicheskikh effektov mikrogravitacii* [Otoacoustic emission as a mediate method of intracranial pressure assesement under conditions of simulation of microgravity physiological effects]. *Aviakosmicheskay i ekologicheskay medichina* [Aviakosm. Ekolog. Med.]. 2013. N 47. P. 130–135 (in Russia).

Shulzhenko E.B., Vill-Villiams I.F. *Vozmoznocti provedeniy dlitelinoi vodnoi immercii metodom suchogo pogrugeniy* [The opportunity to conduct long-term water immersion method dry immersion]. *Kosmicheskay biologiy i aviakosmicheskay medichina* [Biol. Aerospace. Med.]. 1976. T. 10. N 2. P. 82–84 (in Russia).

Shulzhenko E.B. *Fiziologicheskie efektu izmenennoi gravitacii* [Physiological effects of altered gravity (model experiments in model conditions)]: Dis. ... doc. med. sciences. 1975. M.: (in Russia).

Tomilovskaya E.S., Rukavishnikov I.V., Amirova L.E., Shigueva T.A., Saveko A.A., Kitov V.V., Vasilyeva G.Yu., Ponomarev S.A., Smirnova T.A., Kozlovskaya I.B., Orlov O.I. *21-sutochnay "suchay" immersiy osobennosti provedeniy i osnovnue itogi* [21-day "dry" immersion: features and main results]. *Aviakosmicheskay i ekologicheskay medichina* [Aviakosm. Ekolog. Med.] 2020. V. 54. № 4. P. 5–14 (in Russia). <https://doi.org/10.21687/0233-528X-2020-54-4-5-14>

Avan P., Normand H., Giraudet F., Gerenton G., Denise P. Noninvasive in-ear monitoring of intracranial pressure during microgravity in parabolic flights. *J. Appl. Physiol.* 2018. V. 125. № 2. P. 353–361. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00032.2018>

Beattie R.C., Kenworthy O.T., Luna C.A. Immediate and short-term reliability of distortion-product otoacoustic emissions. *Int. J. Audiol.* 2003. V. 42. № 6. P. 348–354. <https://doi.org/10.3109/14992020309101328>

Bell A. Circadian and menstrual rhythms in frequency variations of spontaneous otoacoustic emissions from human ears. *Hear. Res.* 1992. V. 58. P. 91–100. [https://doi.org/10.1016/0378-5955\(92\)90012-c](https://doi.org/10.1016/0378-5955(92)90012-c)

Büki B., Avan P., Lemaire J.J., Dordain M., Chazal J., Ribári O. Otoacoustic emissions: a new tool for monitoring intracranial pressure changes through stapes displacements. *Hear Res.* 1996. V. 94. № 2. P. 125–139. [https://doi.org/10.1016/0378-5955\(96\)00015-9](https://doi.org/10.1016/0378-5955(96)00015-9)

Büki B., Chomicki A., Dordain M., Lemaire J.J., Wit H.P., Chazal J., Avan P. Middle-ear influence on otoacoustic emissions. II: contributions of posture and intracranial pressure. *Hear Res.* 2000. V. 140. P. 202–211. [https://doi.org/10.1016/s0378-5955\(99\)00202-6](https://doi.org/10.1016/s0378-5955(99)00202-6)

Büki B., Giraudet F., Avan P. Non-invasive measurements of intralabyrinthine pressure changes by electrocochleography and otoacoustic emissions. *Hear Res.* 2009. V. 251. № 2. P. 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2009.02.004>

Demertzi A., Van Ombergen A., Tomilovskaya E., Jenrissen B., Pechenkova E., Di Perri C., Litvinova L., Amico E., Rumshiskaya A., Rukavishnikov I., Sijbers J., Sinitsyn V., Kozlovskaya I.B., Sunaert S., Parizel P.M., Van de Heyning P.H., Laureys S., Wuyts F.L. Cortical reorganization in an astronaut’s brain after long-duration spaceflight. *Brain Structure and function.* 2016. V. 221. № 5. P. 2873–2876. <https://doi.org/10.1007/s00429-015-1054-3>

Frank A.M., Alexiou C., Hulin P., Janssen T., Arnold W., Trappe A.E. Non-invasive measurement of intracranial pressure changes by otoacoustic emissions (OAEs) – a report of preliminary data. *Zentralbl Neurochir.* 2000. V. 61. № 4. P. 177–180. <https://doi.org/10.1055/s-2000-15597>

Harris F.P., Probst R. Otoacoustic emissions and audiometric outcomes. Robinette R.S., Glatke T.J. Eds. *Otoacoustic emissions. Clinical applications.* New York. 2002. P. 213–242.

Kemp D.T. Stimulated acoustic emissions from within the human auditory system. *The Journal of the Acoustical Society of America.* 1978. V. 64. № 5. P. 1386–1391. <https://doi.org/10.1121/1.382104>

Lawley J.S., Petersen L.G., Howden E.J., Sarma S., Cornwall W.K., Zhang R., Whitworth L.A., Williams M.A., Levine B.D. Effect of Gravity and Microgravity on Intracranial Pressure. *J. Physiol.* 2017. V. 595. № 6. P. 2115–2127. <https://doi.org/10.1113/JP273557>

Pechenkova E., Nosikova I., Rumshiskaya A., Litvinova L., Rukavishnikov I., Mershina E., Sinitsyn V., Van Ombergen A., Jeurissen B., Jillings S., Laureys S., Sijbers J., Grishin A., Chernikova L., Naumov I., Kornilova L., Wuyts F.L., Tomilovskaya E., Kozlovskaya I.B. Alterations of Functional Brain Connectivity After Long-Duration Spaceflight as Revealed by fMRI. *Frontiers in Physiology.* 2019. V. 10. P. 761: 1–761: 23. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00761>

Thalen E.O., Wit H.P., Segenhout J.M., Albers F.W. Dynamics of Inner Ear Pressure Change Caused by Intracranial Pressure Manipulation in the Guinea Pig. *Acta Otolaryngol.* 2001. V. 121. P. 470–476.

- Tomilovskaya E., Shigueva T., Sayenko D., Rukavishnikov I., Kozlovskaya I. Dry Immersion as a Ground-Based Model of Microgravity Physiological Effects. *Front Physiol.* 2019. V. 10. P. 284–293.  
<https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00284>
- Van Ombergen A., Jillings S., Jeurissen B., Tomilovskaya E., Rumshiskaya A., Litvinova L., Nosikova I., Pechenkova E., Rukavishnikov I., Manko O., Danylichev S., Rühl R. Maxine, Kozlovskaya I.B., Sunaert S., Parizel P.M., Sinitsyn V., Laureys S., Sijbers J., zu Eulenburg P., Wuyts F.L. Brain ventricular volume changes induced by long-duration spaceflight. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2019. V. 116. № 21. P. 10531–10536.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1820354116>
- Voss S.E., Horton N.J., Tabucchi T.H., Folowosele F.O., Shera C.A. Posture-induced changes in distortion-product otoacoustic emissions and the potential for noninvasive monitoring of changes in intracranial pressure. *Neurocrit. Care.* 2006. V. 4. № 3. P. 251–157.  
<https://doi.org/10.1385/NCC:4:3:251>
- Wilson J.P. Evidence for a cochlear origin for acoustic re-emissions, threshold fine-structure and tonal tinnitus. *Hear Res.* 1980. V. 2. № 3. P. 233–252.  
[https://doi.org/10.1016/0378-5955\(80\)90060-x](https://doi.org/10.1016/0378-5955(80)90060-x)

УДК 004.932

# МОДИФИЦИРОВАНИЕ МЕТОДА ПОИСКА И ДЕСКРИБИРОВАНИЯ УСТОЙЧИВЫХ ТОЧЕК SIFT ДЛЯ СОПОСТАВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ И РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

© 2022 г. В. В. Волков<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)  
141701 г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, Россия*

<sup>2</sup> *Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН  
127051 Москва, Большой Каретный пер., д. 19, стр. 1, Россия*

\*E-mail: volkov-vl-v@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.04.2022 г.

После доработки 17.05.2022 г.

Принята к публикации 08.07.2022 г.

Сопоставление изображений — это задача выравнивания (т.е. нахождения общей системы координат) двух или более изображений одной сцены. Достаточно сложным частным случаем данной задачи является сопоставление разнородных изображений — например, оптических и радиолокационных (optical-to-SAR). Необходимость подобного сопоставления возникает в задачах комплексирования изображений и детектирования объектов. Одним из способов сопоставления изображений являются поиск устойчивых точек и их сопоставление по дескрипторам-описаниям, вычисляемым для каждой точки с последующим нахождением преобразования при помощи геометрической модели. В данной работе исследовано влияние модификаций поиска устойчивых точек SIFT на точность детектора и точность всего алгоритма сопоставления оптических и радиолокационных изображений. Дополнительно в работе предлагается модификация SIFT дескриптора и приведено его сравнение с SIFT дескриптором. При сопоставлении изображений рассматривались искажения только в классе сдвигов. Все исследования производились на опубликованном датасете из 100 выравненных пар optical-SAR изображений.

*Ключевые слова:* сопоставление изображений, повторяемость устойчивых точек, дескрибирование устойчивых точек

DOI: 10.31857/S0235009222040060

## ВВЕДЕНИЕ

Сопоставление изображений — это выравнивание изображений одной сцены, полученных в разное время, под разным ракурсом и/или при помощи разных сенсоров. Задача сопоставления изображений, полученных от разных сенсоров, называется сопоставлением разнородных изображений (“multimodal image registration”). Сопоставление оптических и радиолокационных SAR (Synthetic Aperture Radar) изображений — частный случай такого сопоставления. Сопоставление optical-to-SAR широко используется в задачах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), таких как комплексирование изображений (Сидорчук, Волков, 2018), детектирование объектов (Errico et al., 2015), обнаружение изменений (Plank et al., 2016).

Оптические изображения хорошо интерпретируются человеком и не содержат спекл-помех, в то время как SAR изображения не подвержены

влиянию атмосферы и освещенности (Ye et al., 2020; Hamdi et al., 2021). Также на SAR изображениях легче различать застроенные области, благодаря характерной высокой интенсивности их пикселей, вызванной множественным переотражением (Сидорчук, Волков, 2018; Errico et al., 2015).

Сложность сопоставления оптических и SAR изображений обусловлена тем, что (i) изображения подвергаются разным типам и силе шума. Например, зернистый шум присутствует как на оптических, так и на SAR изображениях, но на SAR изображениях шум проявляется сильнее. Более того (ii) значения интенсивности оптических и SAR изображений в некоторых участках изображений могут быть не скоррелированы даже в отсутствие шума. Кроме того, (iii) геометрическое положение (например, высота над землей) сенсора в пространстве может различаться в момент съемки, вследствие чего некоторые линии или

формы объемных объектов могут не совпадать (особенно это заметно на снимках гористой местности).

Методы сопоставления optical-SAR изображений разделяют на две категории: плотные методы (intensity-based methods) и разреженные методы (feature-based methods). Плотные методы основаны на поиске двух соответствующих (т.е. “похожих” по той или иной метрике) подызображений. Для сопоставления используются нормализованная кросс-корреляция (normalized cross-correlation) (Shi et al., 2012) и функция взаимной информации (mutual information) (Suri, Reinartz, 2009). Такие модели могут обладать высокой (субпиксельной) точностью, однако, имеют большую вычислительную сложность и зачастую требуют предварительного приближенного выравнивания изображений (Gong et al., 2013); также они могут быть неэффективны для пар изображений с большими геометрическими различиями (Suri, Reinartz, 2009).

Разреженные методы (feature-based methods) основаны на (i) нахождении некоторых “выделяющихся” точек или элементов изображений (features), легко отличимых как на картинке оптического диапазона, так и радиолокационного; (ii) последующего построения геометрического преобразования, которое сопоставляет найденные элементы изображений. Например, такие методы могут искать точки (Fan et al., 2012; Ma et al., 2016; Paul, Pati, 2018), углы (Xiang et al., 2018; Paul, Pati, 2019; Xiong et al., 2019), линии (Wang et al., 2012) и объекты (например, дороги) (Kunina et al., 2019). Разреженные методы вычислительно проще и зачастую эффективнее (Gong et al., 2013) плотных методов в случаях, когда присутствуют значительные геометрические искажения между изображениями. Однако они могут проигрывать плотным методам в максимальной точности сопоставления (Gong et al., 2013).

#### **Общий алгоритм сопоставления изображений**

В данной статье уделяется основное внимание группе разреженных методов, использующих в качестве “выделяющихся элементов” устойчивые точки. В общем виде разреженные алгоритмы сопоставления на основе устойчивых точек состоят из следующих шагов:

- Нахождение устойчивых точек.
- Вычисление дескрипторов для каждой устойчивой точки.
- Нахождение сопоставлений между устойчивыми точками изображений (например, путем сравнения дескрипторов).
- Нахождение геометрического преобразования между изображениями (например, методом RANSAC (Fischler, Bolles, 1981)), которое воспро-

изводит наибольшую часть найденных на предыдущем шаге сопоставлений точек.

#### **Геометрическая модель**

Методы робастного оценивания, такие как RANSAC, позволяют восстановить правильное геометрическое преобразование даже в случаях, когда значительная часть сопоставлений между устойчивыми точками (найденная на 2-м шаге алгоритма) сформирована неправильно (Чеканов и др., 2020; Tropin et al., 2019; Шемякина, 2017). Тем не менее высокая доля правильных сопоставлений *точек* позволяет повысить долю и точность правильных сопоставлений *изображений* (Skoquukina et al., 2020; Xu et al., 2015). Также точность сопоставления изображений может быть выше, если точки распределены по изображению более равномерно (Тропин и др., 2019), поскольку плотные скопления точек могут создавать менее точные пары (из-за взаимного “перемешивания”) и иметь низкую обусловленность.

#### **Нахождение устойчивых точек и дескрипторов**

Примером способов для более равномерного распределения точек по изображению являются NMS (non-max-suppression) (Yu et al., 2018) и биннинг (Xiong et al., 2019). NMS среди всех пар точек на одном изображении, расположенных ближе некоторого порога, оставляет только одну точку, обладающую наибольшей “важностью”. “Важность” точки определяется детектором устойчивых точек. Таким образом, алгоритм избавляется от скоплений точек в одном месте. Биннинг – это предварительное разделение изображения на непересекающиеся блоки. Для каждого блока происходит независимое вычисление устойчивых точек, после чего найденные множества точек объединяются. Данный метод позволяет избежать скопления точек в одной области изображения, обеспечивая наличие устойчивых точек по всему изображению.

Стоит отметить, что формирование “правильного” сопоставления с участием устойчивой точки невозможно, если на другом изображении не была найдена устойчивая точка в месте, которое соответствует той же позиции в реальной сцене. Поэтому эффективный метод должен находить такие точки, которые с высокой вероятностью будут найдены и на другом изображении той же сцены. Для численной оценки этого качества в литературе используется метрика повторяемости (repeatability) (Xiang et al., 2018). Повторяемость – это доля или среднее количество (определения разнятся) устойчивых точек таких, что для устойчивой точки на одном изображении сцены существует достаточно близкая устойчивая точка на втором изображении сцены. В ходе исследования

было обнаружено, что в разных работах встречаются разные способы вычисления повторяемости. В данной статье приводится пример работ с указанием применяемых в них формул вычисления повторяемости (п. 1).

Для сопоставления точек возникает необходимость вычисления дескрипторов (“описаний”), по которым можно определить, соответствуют ли две точки одному и тому же географическому месту. Для этого алгоритм вычисления дескрипторов должен для точек, соответствующих одному географическому месту, привязывать похожие по той или иной метрике (например, L2) дескрипторы, и, наоборот, для точек из разных мест – разные дескрипторы.

### Постановка задачи

В работе рассматривается метод нахождения устойчивых точек SIFT с точки зрения его эффективности для сопоставления optical-SAR изображений. Разбираются его несколько простых модификаций и оценивается их влияние на результат сопоставления. Дополнительно предлагается метод дескрибирования устойчивых точек, являющийся модификацией SIFT дескриптора. В работе можно выделить несколько смысловых частей.

В п. 1 уделяется внимание метрике повторяемости, используемой для оценки эффективности нахождения устойчивых точек и развернуто показывается, что в литературе нет общепринятого определения повторяемости. В п. 2 описываются используемые данные. В п. 3 представлен общий вид используемого алгоритма сопоставления изображений с описанием его отдельных шагов. Здесь описаны используемые модификации для алгоритма нахождения устойчивых точек SIFT и предлагаемый алгоритм вычисления дескрипторов. В п. 4 показан алгоритм определения оптимальных параметров и результаты алгоритмов, описанных в п. 3. Проведена оценка влияния модификаций для алгоритма нахождения точек на повторяемость и точность сопоставления optical-SAR изображений. Дополнительно проведено сравнение предложенного дескриптора с SIFT дескриптором.

Отдельно отметим, что в литературе встречаются модификации SIFT алгоритма для сопоставления optical-SAR изображений (Fan et al., 2012; Gong et al., 2013; Paul, Pati, 2018), однако, в работах не предоставлено открытого кода, что не позволяет провести объективное сравнение.

## 1. ПОВТОРЯЕМОСТЬ

В литературе встречаются различные способы оценки точности алгоритмов сопоставления оптических и радиолокационных изображений. Ча-

ще всего для оценки всего алгоритма находят долю правильно сопоставленных изображений. В качестве критерия правильно сопоставленной пары изображений можно привести метрику RMSE (Paul, Pati, 2019). Дополнительно к оценке всего алгоритма зачастую в работах приводится оценка его первой части, а именно, детектирование устойчивых точек. Метрики для оценки точности детектирования точек называют метриками повторяемости.

В литературе встречаются разные варианты метрик повторяемости. Отсутствие единой метрики повторяемости не позволяет объективно сравнивать результаты различных работ. Рассмотрим примеры работ и применяемые в них метрики повторяемости.

В работе (Li et al., 2019) авторы оценивают повторяемость своего алгоритма на датасете, состоящем из шести мини датасетов по десять пар изображений в каждом: optical-optical, infrared-optical, optical-SAR, depth-optical, map-optical и day-night. Авторы не выложили датасет в общий доступ. В качестве метрики повторяемости они использовали отношение количества пар повторяемых устойчивых точек к среднему количеству устойчивых точек на обоих изображениях (формула (1)).

$$Rep = \frac{2N_{Rep}}{(n_1 + n_2)}, \quad (1)$$

где  $n_1, n_2$  – количество точек на первом и втором изображении соответственно,  $N_{Rep}$  – количество пар повторяемых точек.

Повторяемой парой точек считается пара, удовлетворяющая

$$\|x_i^1 + Hx_i^2\| < \theta,$$

где  $H$  – правильное преобразование между двумя изображениями,  $x_i^1, x_i^2$  – координаты устойчивых точек на первом и втором изображении соответственно,  $\theta$  – порог повторяемости ( $\theta = 3$  в (Li et al., 2019)).

Авторский метод получил 22.9% по метрике повторяемости и превзошел такие детекторы, как FAST (Rosten et al., 2008), Harris, BRISK (Leutenegger et al., 2011), SIFT (Lowe, 2004), SURF (Bay et al., 2008), MSER (Matas et al., 2004).

В работе (Fan et al., 2018) авторы оценили свой алгоритм на десяти парах optical-SAR изображений (из которых две пары – смоделированные изображения), где также отметили, что использовали метрику повторяемости, описанную в работе (Schmid et al., 2000). Данная метрика, как и предыдущая, считает количество пар повторяемых точек, но только на общих (т.е. пересе-

кающихся) участках двух изображений (формула (2)).

$$Rep = \frac{N_{Rep}}{\min(n_1, n_2)}, \quad (2)$$

где  $n_1, n_2$  — количество точек на общем участке первого и второго изображения соответственно,  $N_{Rep}$  — количество пар повторяемых точек на общем участке двух изображений.

Заметим, что метрика по формуле (2) будет в диапазоне  $[0,1]$  тогда и только тогда, когда каждая точка не может иметь более одной пары. Данного уточнения в работе (Schmid et al., 2000) замечено не было, как и описания принципа, по которому разрешаются такие “конфликтные” ситуации (например, для одной точки подходит несколько точек, какую взять в пару?). В работе (Fan et al., 2018) порог расстояния между повторяемыми точками равен 1.5 пикселям. Результаты показали повторяемость более 50% для всех пар, кроме одной.

Был найден ряд работ, в которых вычисление повторяемости производилось на частично или полностью смоделированных данных (Xiang et al., 2018; Wang et al., 2020; Yu et al., 2021). В работе (Xiang et al., 2018) моделирование optical-SAR пары изображений происходит путем добавления к оптическому изображению с высоким разрешением гауссового и зернистого шума соответственно. В работе исследуется робастность повторяемости алгоритмов детектирования устойчивых точек в зависимости от степени шума. В качестве метрики повторяемости используется отношение количества повторяемых точек к общему количеству устойчивых точек на обоих изображениях, что эквивалентно метрике по формуле (1). Порог для определения повторяемости двух точек равен двум пикселям. Авторы оценили повторяемость на двух смоделированных изображениях и получили значения от 50 до 59% в зависимости от уровня шума.

В работе (Wang et al., 2020) для оценки робастности алгоритмов детектирования также вычислялась повторяемость на смоделированных данных. Моделирование оптического и SAR изображения происходило при помощи добавления гауссового и зернистого шума соответственно. В качестве метрики повторяемости используется метрика, отмеченная в формуле (1), где порог повторяемости равен двум пикселям. Результаты вычислялись для трех пар optical-SAR изображений, к каждой из которых добавили свой шум с несколькими уровнями силы. Повторяемость от 40 до 65% в зависимости от пары картинок и уровня шума.

В работе (Yu et al., 2021) оценка повторяемости проводилась на искусственных двух парах изображений, не использующих спутниковые снимки

в качестве основы. Оценка точности алгоритма сопоставления изображений проводилась на optical-SAR спутниковых снимках, но без оценки повторяемости. Метрика повторяемости совпадает с указанной в формуле (1), где порог повторяемости равен 1.5 пикселям. Значения повторяемости указаны примерно от 41 до 75% в зависимости от пары изображений и уровня шума.

В ряде других работ повторяемость вычисляется на настоящих парах оптических и SAR изображений, но без описания используемого алгоритма повторяемости (Paul, Pati, 2019; Chen et al., 2017; Xie et al., 2021). Поэтому воспроизвести аналогичный метод оценки повторяемости невозможно. В работе (Paul, Pati, 2019) приводятся значения повторяемости, полученные на реальных шести парах optical-SAR изображений. Повторяемость для каждой пары optical-SAR изображений указана около 30–40%. В работе (Chen et al., 2017) приводится среднее значение повторяемости на других шести парах optical-SAR изображений без описания метрики повторяемости. Метод, предложенный авторами, показал повторяемость 57.8%. В другой работе оценка метода детектирования точек производится на двух парах optical-SAR изображений (Xie et al., 2021). Порог расстояния между повторяемыми точками брался равным двум пикселям. Повторяемость равна 14.5 и 16%.

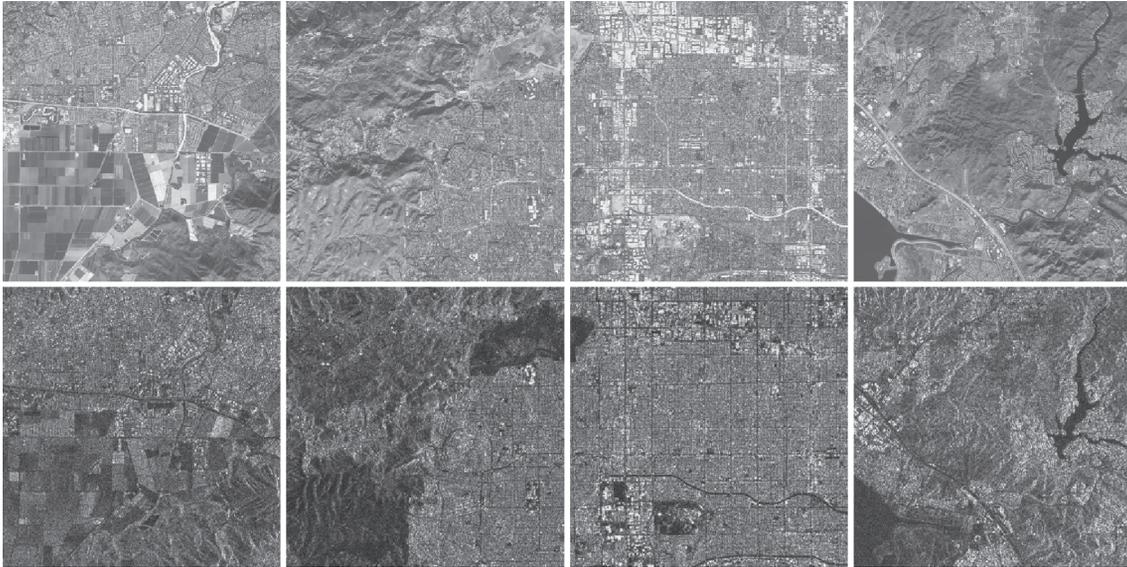
Таким образом, из девяти работ четыре используют метрику повторяемости по формуле (1), две работы — по формуле (2) и в трех работах метрика повторяемости не указана.

## 2. ОПИСАНИЕ ДАННЫХ

Используемый в данной работе датасет состоит из 100 пар optical-SAR изображений размером  $1024 \times 1024$  и опубликован в работе (Волков, Швец, 2021). Изображения в датасете собраны из открытых источников, а лицензии к ним позволяют их распространять и изменять<sup>1</sup>. В качестве источника оптических и SAR данных задействован сайт Copernicus Open Access Hub<sup>2</sup>. В качестве SAR изображений использовались изображения со спутника Sentinel-1A со следующими параметрами: тип продукта Level-1 Ground Range Detected (GRD), режим сенсора Interferometric Wave (IW) swath mode, поляризация VH. В качестве оптических изображений рассматривались трехканальные RGB спутниковые снимки со спутника Sentinel-2A (тип продукта: S2MSI1C). Изображения обоих типов были приведены к пространственному разрешению 10 метров/пиксель. Каждая пара optical-SAR изображений вы-

<sup>1</sup> <https://scihub.copernicus.eu/twiki/do/view/SciHubWebPortal/TermsConditions>

<sup>2</sup> <https://scihub.copernicus.eu/>



**Рис. 1.** Примеры пар изображений из датасета. Верхний ряд – оптические изображения, нижний – соответствующие им SAR изображения.

равнена друг относительно друга с применением геопривязки. Для увеличения точности выравнивания было проведено ручное сопоставление изображений с помощью проективного преобразования. Полученные изображения выравнены преимущественно с субпиксельной точностью, но иногда встречаются небольшие области, где точность ниже (погрешность до двух пикселей). В датасете преимущественно присутствуют изображения сцен городов и полей. Примеры пар изображений представлены на рис. 1.

Готовый к использованию датасет и сопровождающие его метаданные доступны для скачивания и опубликованы в (Волков, Швеиц, 2021). Также данные могут быть скачаны в ручном режиме с ресурсов, указанных выше.

### 3. ОБЩИЙ ВИД АЛГОРИТМА СОПОСТАВЛЕНИЯ

В данной статье рассматривается алгоритм сопоставления оптических и радиолокационных изображений с использованием устойчивых точек. Общий вид рассматриваемого алгоритма сопоставления следующий:

- Нахождение устойчивых точек.
- Вычисление дескриптора для каждой устойчивой точки.
- Нахождение сопоставлений между точками на основе их дескрипторов.
- Нахождение геометрического преобразования при помощи геометрической модели.

В рамках работы находятся оптимальные параметры подалгоритмов, используемых на каждом

из шагов, а также предлагается новый метод дескрибирования устойчивых точек специально для случая оптических и радиолокационных спутниковых изображений. Рассмотрим детальнее каждый из шагов.

#### 3.1. Детектор устойчивых точек

В качестве детектора устойчивых точек использовался SIFT-детектор (из библиотеки OpenCV<sup>3</sup>). Скопление найденных устойчивых точек в одном месте изображения может ухудшать итоговый результат сопоставлений (набор близко расположенных точек может быть плохо обусловлен, кроме того близко расположенные точки могут иметь похожие дескрипторы и путаться друг с другом на этапе сопоставления точек). Для улучшения распределения устойчивых точек на изображении широко используются такие методы, как биннинг (Xiong et al., 2019) и NMS (Yu et al., 2018). В данной работе мы рассматриваем оба метода и оцениваем их эффективность для случая оптических и радиолокационных изображений.

Биннинг представляет собой разбиение изображения на непересекающиеся блоки (в нашем случае  $256 \times 256$  пикселей) перед применением детектора устойчивых точек. При биннинге детектор применяется к каждому блоку независимо, после чего множества найденных точек объединяются, таким образом, итоговый набор точек будет более равномерно распределен по всему изображению (рис. 2).

<sup>3</sup> <https://docs.opencv.org/master/index.html>

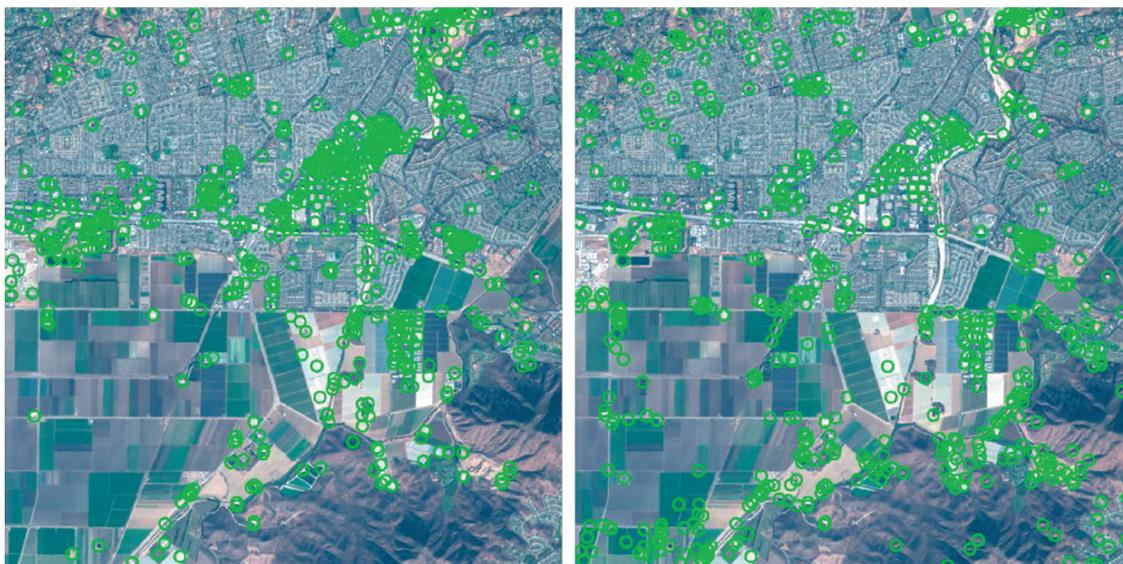


Рис. 2. Пример работы SIFT детектора. Слева без применения биннинга, справа – с применением биннинга.

В наших экспериментах максимальное количество точек, которые могут быть найдены на одном блоке, ограничивалось 50 точками (т.е. суммарно до 800 точек на изображении). Если было найдено больше точек, то отбирались те точки, которые были оценены SIFT-детектором как более важные (наибольший).

Несмотря на биннинг, скопления точек все равно возможны внутри каждого из блоков – для противодействия такому эффекту мы использовали алгоритм фильтрации NMS (non-max-suppression) (Yu et al., 2018), который из любых двух точек, расположенных достаточно близко (определяется параметром), выбирает одну с наибольшим. Влияние биннинга и NMS на получаемый набор устойчивых точек для optical-SAR случая описан в п. 4.1.

### 3.2. Вычисление дескрипторов

После нахождения устойчивых точек на каждом из изображений, необходимо найти соответствия между ними. Поскольку каждая пара точек (точка на оптическом изображении – точка на SAR изображении) должна быть “проверена” на совпадение, то общая сложность операции составляет  $N \cdot M$ , где  $N$  и  $M$  – число точек на соответствующих изображениях. Таким образом, квадратичная сложность алгоритма делает желательным наличие быстрого способа проверки – соответствуют ли две точки друг другу или нет.

Классическим методом для решения этой задачи является нахождение дескрипторов для каждой из точек – векторов рациональных чисел таких, что для похожих точек дескрипторы близки по L2 или другой быстро считающейся метрике, а

для отличающихся – далеки. Тогда после однократного подсчета дескрипторов для каждой из точек (всего  $N + M$  точек) для проведения  $N \cdot M$  операций можно использовать быструю векторизованную операцию L2.

В данной работе мы используем как классический метод дескрибирования алгоритма SIFT, так и предлагаем свой алгоритм, разработанный специально для сопоставления optical-SAR изображений.

### 3.3. Нахождение сопоставлений между точками

После нахождения дескриптора для каждой из устойчивых точек и нахождения расстояний между дескрипторами для каждой пары точек, необходимо на основе этих расстояний сформировать сопоставления между ними. Чем выше доля и количество корректно сопоставленных пар точек, тем, как правило, выше точность сопоставления изображений.

В данной работе использовался метод ближайшего соседа. Для любой пары дескрипторов на optical-SAR изображениях вычислялось дескрипторное расстояние (L2 норма). Две точки считаются сопоставленными, если соответствующие им дескрипторы взаимно ближайшие (т.е. не существует другого дескриптора такого, что дескрипторное расстояние с ним меньше найденного) и дескрипторное расстояние меньше настроиваемого порога. Пороги настраивались индивидуально для каждого используемого алгоритма. Подробное описание процедуры сопоставления и использованных порогов приведено в п. 4.

### 3.4. Нахождение геометрического преобразования

На этом шаге происходит вычисление геометрического преобразования между изображениями по найденным сопоставлениям между точками. Методы для нахождения такого преобразования, например, RANSAC (Fischler, Bolles, 1981), зачастую не требуют, чтобы все сопоставления точек были найдены верно. При целевой точности сопоставления изображений, условно в 10 пикселей, для большинства точек допустим шум, например, в 3 пикселя (некоторая часть точек может иметь больший шум). Кроме того, при достаточно высоком количестве точек с более сильным ограниченным равномерным шумом (т.е. большинство точек равномерно шумят в определенной окрестности вокруг точного их положения) можно достигнуть сопоставления с субпиксельной точностью.

В работе мы рассматриваем только случай, когда сопоставляемые изображения искажены друг относительно друга только сдвигом (что относится и к обучающим, и к тестовым парам изображений). Это позволяет использовать простую голосящую схему для нахождения геометрического преобразования между изображениями.

На вход алгоритм получает координаты пар сопоставленных устойчивых точек  $(x_i^{opt}, y_i^{opt})$ ,  $(x_i^{sar}, y_i^{sar})$ ,  $i \in [1, N]$ , где  $N$  – количество пар. Точки с одинаковым индексом формируют пару. Остальными параметрами алгоритма являются размер бина двумерной гистограммы  $size_{bin}$ , размер ядра размытия  $\sigma_m$  и размер изображения (для определения границ двумерной гистограммы). На выходе выдаются координаты сдвига  $(x_s, y_s)$ .

Алгоритм:

- Для каждой сопоставленной пары точек  $(x_i^{opt}, y_i^{opt})$ ,  $(x_i^{sar}, y_i^{sar})$  вычисляем  $\Delta x_i = x_i^{sar} - x_i^{opt}$ , и  $\Delta y_i = y_i^{sar} - y_i^{opt}$ .

- По этим значениям вычисляем двумерную гистограмму распределения сдвигов между сопоставленными точками. Размер бина гистограммы  $(size_{bin}, size_{bin})$ . Затем нормируем гистограмму, поделив значения в каждом бине на максимальное значение в гистограмме.

$$H_i = \frac{H_i}{\max_i H_i}, \quad (3)$$

где  $2H_i$  – значение  $i$ -го бина, а  $\max_i H_i$  – максимальное значение бина в гистограмме.

- К полученной двумерной матрице применяем двумерный гауссовый фильтр с сигмой  $\sigma_m$ .

- Искомым сдвигом  $(x_s, y_s)$  являются координаты центра бина с максимальным значением.

### 3.5. Критерии оценки

В качестве критерия оценки точности всего алгоритма использовалось количество успешно сопоставленных изображений. Пара изображений считалась успешно сопоставленной, если величина найденного сдвига составила меньше  $T$  (т.е.  $\sqrt{x_s^2 + y_s^2} \leq T$ ), где для изображений с даунскейлингом в 2 раза  $T = 2.5$  и без даунскейлинга  $T = 5$  при размере изображений  $512 \times 512$  и  $1024 \times 1024$  соответственно.

Для настройки параметров и для тестирования получившегося алгоритма датасет был разделен на две части – обучающую (76 пар) и тестовую (24 пары). Подбор оптимальных параметров происходил только на обучающей части датасета, а метрики считались на тестовой.

### 3.6. Алгоритм вычисления дескрипторов

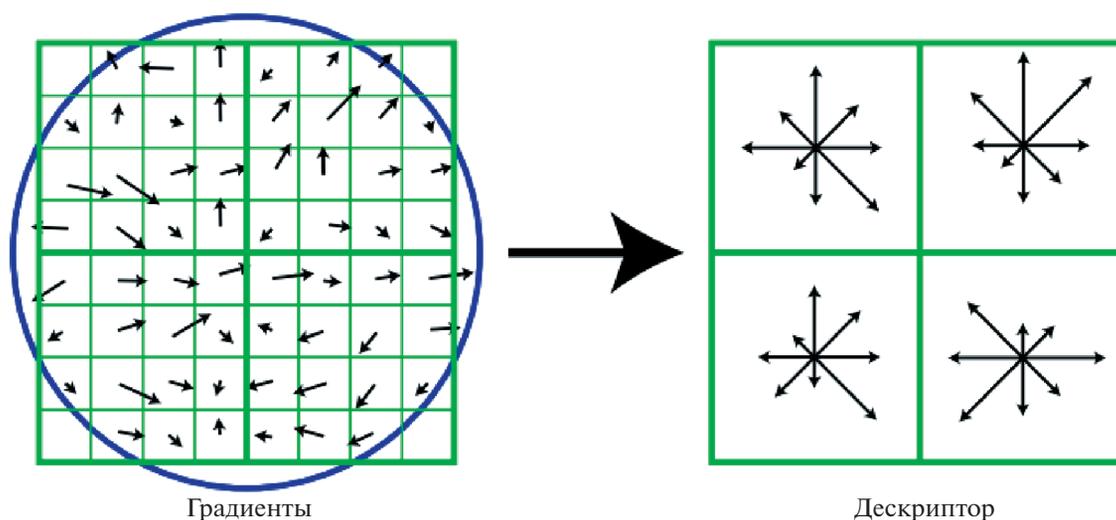
В этом параграфе мы представляем наш алгоритм вычисления дескрипторов, представляющий собой упрощенную модификацию дескриптора SIFT (Lowe, 2004). Для начала рассмотрим SIFT-дескриптор и его недостатки в рамках задачи optical-SAR сопоставления изображений.

#### SIFT-дескриптор

С подробным алгоритмом можно ознакомиться в статье-первоисточнике (Lowe, 2004). Здесь мы отметим основные интересующие нас моменты. Во-первых, SIFT имеет встроенную предобработку изображения (фильтр Гаусса). Во-вторых, основным шагом при подсчете SIFT-дескриптора является построение так называемой “гистограммы ориентаций”. Для ее формирования вокруг устойчивой точки вырезается патч, который делится на не пересекающиеся “кирпичики” в виде сетки  $4 \times 4$ . В каждом пикселе патча считается градиент и вычисляются его длина и угол наклона. “Гистограмма ориентаций” вычисляется для каждого “кирпичика” по этим градиентам – 8 бинов по углу наклона. Значение в каждом бине равно сумме длин градиентов с соответствующим углом наклона, умноженных на гауссовую функцию с окном, равным размеру патча (рис. 3, синий круг).

Таким образом, чем дальше градиент от центра патча, тем меньшее влияние он оказывает на значение бина гистограммы. На рис. 3 приведен пример гистограмм ориентаций для случая патча  $8 \times 8$  пикселей с разбиением на  $2 \times 2$  “кирпичика” (Lowe, 2004).

По “гистограмме ориентаций” формируется дескриптор путем объединения всех значений бинов. Каждый “кирпичик” содержит восемь чисел, конкатенацией векторов всех 16 “кирпичиков” ( $4 \times 4$ ), алгоритм получает вектор-дескрип-



**Рис. 3.** Слева нарисованы градиенты на патче размера  $8 \times 8$ , которые умножаются на вес, определенный гауссовым окном (круг). Эти градиенты образуют гистограммы градиентов справа. Каждый вектор справа отображает сумму длин градиентов с близким направлением в соответствующей области патча.

тор из 128 чисел. Далее вектор нормируется, после чего значения выше некоторого порога “обрезаются” до этого порога и вектор снова нормируется. Более подробное описание алгоритма дескрибирования описано в статье-первоисточнике (Lowe, 2004).

Задача сопоставления оптических и радиолокационных изображений имеет, как минимум, две особенности, ограничивающие эффективность SIFT дескриптора:

– *Инвертирование градиентов.* На оптических и SAR изображениях некоторые объекты отображаются похожим образом, но встречаются и объекты, где интенсивности инвертированы. Например, дорогам на оптическом снимке часто соот-

ветствует высокая интенсивность, в то время как на SAR снимке зачастую, наоборот, низкая (рис. 4).

Внутри квадратиков отмечена “гистограмма ориентаций” с единичным весом. У квадратиков около дороги хорошо видно изменение диагональной составляющей градиента между оптическим и SAR патчем.

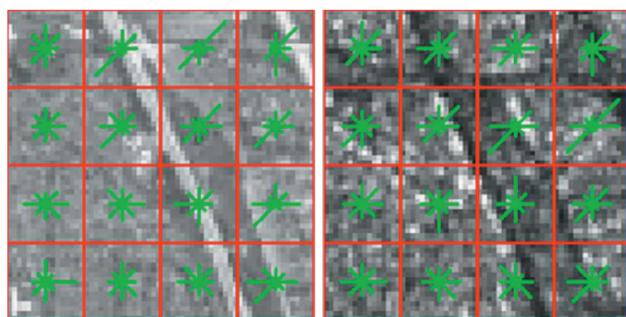
– *Одинаковые параметры предобработки оптических и радиолокационных изображений.* SIFT дескриптор имеет встроенную предобработку изображения в виде гауссового фильтра, но его параметры настраиваются самим алгоритмом без участия человека. Оптические и SAR изображения сильно различаются по уровню шума и детализации, потому оптимальные параметры предобработки для них отличаются (например, наши эксперименты показали, что для SAR изображений нужно использовать большую сигму, чем для оптических), а также могут потребовать дополнительных индивидуальных методов предобработки для одного из типов изображений.

Далее рассмотрим наш алгоритм вычисления дескрипторов.

### *Предобработка изображений*

Перед применением нашего алгоритма вычисления дескрипторов применялась предобработка изображений. SAR изображения подвержены сильному зернистому шуму, поэтому было решено использовать гауссовский фильтр для борьбы с шумом с  $\sigma_{sar}^{pre}$  (рис. 5, вторая и четвертая колонки).

Оптические изображения тоже подвержены шуму, но намного меньше, поэтому к ним также применяется гауссовский фильтр, но с меньшей



**Рис. 4.** Пример инвертированности градиентов. Слева патч оптического изображения, справа – SAR. В каждом из 16 квадратиков нарисованы вектора градиентов, соответствующих сумме всех градиентов в этом квадратике с соответствующим направлением вектора (сектор в  $360^\circ$  разбивается на восемь одинаковых секторов).

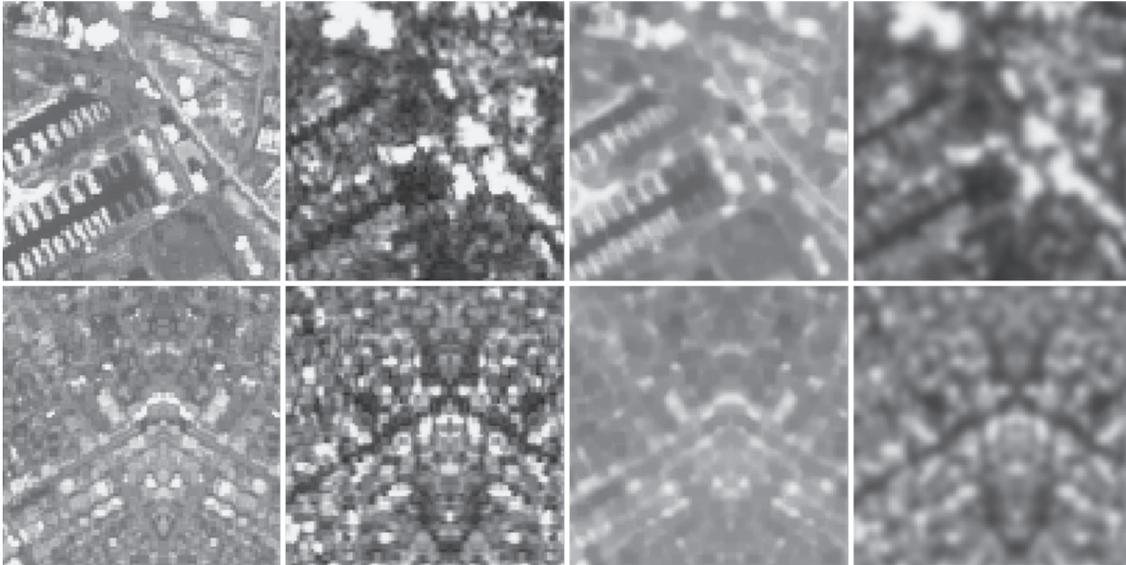


Рис. 5. Пример предобработки патчей. Слева направо: оптический патч, SAR патч, оптический патч с предобработкой ( $\sigma_{opt} = 1$ , окно раздутия и эрозии 1 пиксель), SAR патч с предобработкой ( $\sigma_{sar} = 1.5$ ).

силой размытия. Дополнительно на некоторых фрагментах оптических изображений (например, пристань, рис. 5, верхний ряд) присутствуют мелкие детали, где градиент сильно различается с SAR картинкой, на которой эти детали не различимы. Для ослабления этого эффекта к оптическим картинкам, помимо гауссовского фильтра, применяется последовательность раздутия и эрозии с окном в 1 пиксель. Пример патчей с примененной предобработкой представлен на рис. 5. На верхнем патче видно, что на оптическом патче видна структура пристани, в то время, как на SAR патче структура слабо видна, что может влиять на вычисление градиентов. После применения гауссового фильтра и морфологии структура пристани на оптическом патче уже не такая явная.

#### Предлагаемый алгоритм вычисления дескрипторов

Данный алгоритм основан на алгоритме SIFT-дескриптора.

Пусть имеются координаты устойчивой точки  $(x, y)$ . Вокруг этой точки вырезается патч размера  $64 \times 64$  с центром в точке  $(x, y)$ . В случае, если патч выходит за пределы изображения, то недостающая часть заполняется путем отзеркаливания изображения (рис. 5, нижний ряд — пример частично отзеркаленного патча). Далее выполняется следующий алгоритм:

- Вычисляются градиент в каждом пикселе патча, его длина и угол наклона.
- Патч равномерно делится на 16 непересекающихся “кирпичиков” в виде сетки  $4 \times 4$ .

- Для каждого “кирпичика” вычисляется “гистограмма градиентов по направлению”, состоящая из восьми бинов. Значение в бине равно сумме длин градиентов с соответствующим бину направлением. Визуально будем представлять эти гистограммы в виде восьми векторов, отложенных из одной точки.

- Так как некоторые области на оптических и SAR изображениях, соответствующие одному географическому месту, могут иметь противоположно направленные градиенты (например, дороги на оптических изображениях, как правило, имеют большую интенсивность, чем у окружающей области, а на SAR, наоборот (рис. 4)), то направления, повернутые на  $180^\circ$ , будем считать, как одно направление. Таким образом, получаем четыре вектора, каждый из которых равен сумме двух коллинеарных векторов.

- Нормируем вектора так, чтобы сумма длин векторов равнялась единице.

- Объединяем четыре вектора в 16 “кирпичиках” в единый вектор из 64 значений (по рядам от верхнего левого к нижнему правому).

На рис. 6 представлены примеры гистограмм градиентов нашего метода с четырьмя и восемью направлениями и гистограммы градиентов SIFT дескриптора.

Гистограммы градиентов для нашего метода строились по алгоритму, описанному выше. Гистограммы градиентов для SIFT дескриптора были построены по значениям SIFT дескриптора. Вектор из 128 чисел разбивался на 16 блоков по восемь чисел в каждом. Каждый блок соответствовал одной клетке на патче.

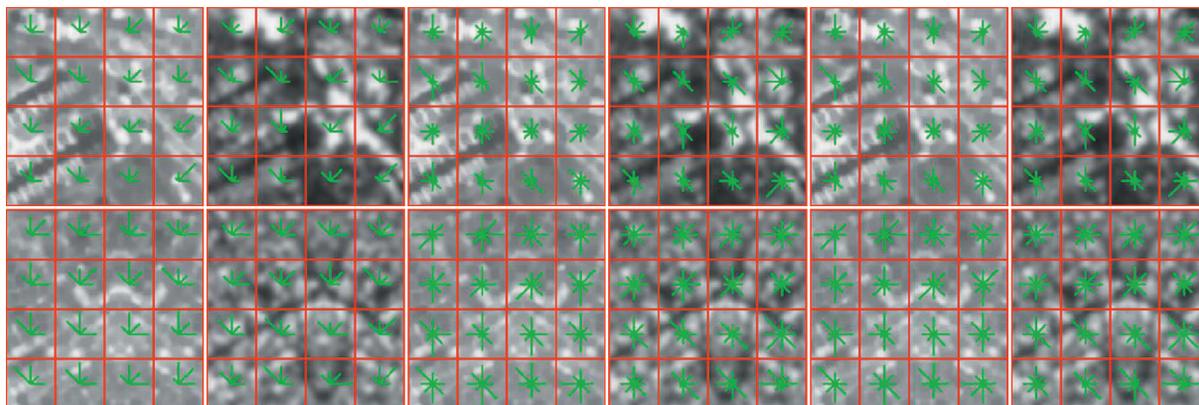


Рис. 6. Гистограммы градиентов для optical-SAR патчей. Слева направо: наш метод с четырьмя направлениями (первая и вторая колонки), наш метод с восемью направлениями (3- и 4-я колонки), SIFT дескриптор (5- и 6-я колонки).

Предложенный алгоритм вычисления дескрипторов показал результат лучше, чем SIFT дескриптор (п. 4.2), а алгоритм заметно проще. Замеры производительности не проводились, так как используемый алгоритм не оптимизирован.

#### 4. НАХОЖДЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АЛГОРИТМОВ

В этом параграфе мы представим ряд модификаций, предлагаемых нами для повышения точности нашего алгоритма дескрибирования, оцениваем влияние этих модификаций на качество сопоставления и сравниваем результат с SIFT-дескриптором. Устойчивые точки для всех экспериментов были одинаковыми, алгоритм их нахождения описан в п. 3.1. Также приведем сравнение методов с и без использования NMS и биннинга на примере SIFT детектора и дескриптора (п. 4.1). Отметим, что нахождение оптимальных параметров алгоритмов всегда происходит только на обучающей части датасета (76 пар).

##### 4.1. Применение NMS алгоритма и биннинга

В этом разделе представлено два эксперимента. В первом эксперименте рассматривалось влияние NMS (non-max-suppression) алгоритма, примененного на шаге детектирования точек, на точность сопоставления optical-SAR изображений. В качестве детектора устойчивых точек и дескриптора использовались SIFT детектор и дескриптор соответственно. Для подбора параметров детектора использовалась метрика повторяемости (п. 1, формула (1)). Параметры SIFT-детектора (из библиотеки OpenCV<sup>4</sup>) приведены ниже:

- *nOctaveLayers*: 3
- *contrastThreshold*: 0.04

<sup>4</sup> <https://docs.opencv.org/master/index.html>

- *edgeThreshold*: 10
- $\sigma$ : optical 2.5, SAR 3.0

Первые три параметра взяты по умолчанию и не менялись, так как при их изменении повторяемость или оставалась такой же, или ухудшалась. Подбор параметра  $\sigma$  происходил индивидуально для оптических и SAR изображений. Порог повторяемости  $\theta$  фиксировался равным 5 пикселей. Оценка повторяемости для нескольких значений  $\sigma$  без применения NMS представлена в табл. 1, а. Из таблицы видно, что оптимальное значение достигается при  $\sigma_{opt} = 2.5$  и  $\sigma_{opt} = 3.0$ .

Результаты для ( $\sigma_{opt} = 2.5, \sigma_{opt} = 3.0$ ) и ( $\sigma_{opt} = 3.0, \sigma_{opt} = 3.0$ ) похожи, поэтому дополнительно отметим, что для  $\theta = \{1, 3, 4\}$  в первом случае доля повторяемости выше на 0.1%, а при  $\theta = 2$  доля повторяемости одинакова, что делает первый случай лучше.

В табл. 1, б приведены результаты повторяемости с теми же параметрами детекторов, но с применением NMS с окном 5 пикселей.

Оптимальные значения  $\sigma_{opt}$  и  $\sigma_{sar}$  остались как и в случае без NMS. Из табл. 1, а, б видно, что в случае с NMS повторяемость хуже, особенно если сравнивать количество повторяемых точек (оно сократилось примерно на треть). Это обусловливается тем, что среди близко расположенных точек удаляются все близко расположенные точки (ближе 5 пикселей), кроме одной. Доля повторяемых точек также уменьшилась, но не значительно — относительная разница составила около 3%. Отсюда можно сделать вывод, что точки детектируются скоплениями, но при этом уменьшение скопившихся рядом точек почти не влияет на долю повторяемых точек. При этом на этапе сопоставления точек будет уменьшена проблема сопоставления близкорасположенных точек, которые могут иметь похожие дескрипторы. Таким обра-

**Таблица 1.** Оценка повторяемости для нескольких значений  $\sigma$  для порога повторяемости  $\theta = 5$  с различными комбинациями применения биннинга и NMS. Числом записано среднее количество повторяемых точек на одну пару изображений, а в скобках их доля среди всех точек

а) Без биннинга и без NMS				
SIFT	$\sigma_{sar} = 2.0$	$\sigma_{sar} = 2.5$	$\sigma_{sar} = 3.0$	$\sigma_{sar} = 3.5$
$\sigma_{opt} = 2.0$	188.9 (11.8%)	198.5 (12.4%)	194.6 (12.2%)	181.3 (11.3%)
$\sigma_{opt} = 2.5$	190.2 (11.9%)	204.6 (12.8%)	<b>206.5 (12.9%)</b>	194.2 (12.1%)
$\sigma_{opt} = 3.0$	179.3 (11.2%)	195.2 (12.2%)	206.0 (12.9%)	201.1 (12.6%)
$\sigma_{opt} = 3.5$	161.4 (10.1%)	177.9 (11.1%)	194.9 (12.2%)	198.8 (12.4%)
б) Без биннинга и с NMS				
SIFT	$\sigma_{sar} = 2.0$	$\sigma_{sar} = 2.5$	$\sigma_{sar} = 3.0$	$\sigma_{sar} = 3.5$
$\sigma_{opt} = 2.0$	119.8 (11.5%)	126.1 (11.9%)	126.3 (11.8%)	119.4 (10.9%)
$\sigma_{opt} = 2.5$	123.9 (11.6%)	133.6 (12.4%)	<b>137.6 (12.5%)</b>	131.0 (11.7%)
$\sigma_{opt} = 3.0$	119.4 (10.9%)	129.5 (11.7%)	139.6 (12.4%)	138.8 (12.2%)
$\sigma_{opt} = 3.5$	108.2 (9.8%)	119.5 (10.7%)	133.6 (11.8%)	138.9 (12.1%)
в) С биннингом и без NMS				
SIFT	$\sigma_{sar} = 2.0$	$\sigma_{sar} = 2.5$	$\sigma_{sar} = 3.0$	$\sigma_{sar} = 3.5$
$\sigma_{opt} = 2.0$	164.1 (10.3%)	170.9 (10.8%)	169.2 (10.7%)	159.1 (10.1%)
$\sigma_{opt} = 2.5$	165.9 (10.4%)	175.7 (11.1%)	<b>180.7 (11.5%)</b>	173.7 (11.0%)
$\sigma_{opt} = 3.0$	153.8 (9.7%)	167.2 (10.6%)	178.9 (11.4%)	176.4 (11.2%)
$\sigma_{opt} = 3.5$	140.1 (8.8%)	153.6 (9.7%)	172.6 (11.0%)	174.1 (11.1%)
г) С биннингом и с NMS				
SIFT	$\sigma_{sar} = 2.0$	$\sigma_{sar} = 2.5$	$\sigma_{sar} = 3.0$	$\sigma_{sar} = 3.5$
$\sigma_{opt} = 2.0$	104.8 (10.0%)	110.2 (10.4%)	111.6 (10.4%)	105.8 (9.7%)
$\sigma_{opt} = 2.5$	108.6 (10.1%)	116.7 (10.8%)	<b>122.0 (11.1%)</b>	118.4 (10.6%)
$\sigma_{opt} = 3.0$	103.3 (9.5%)	112.6 (10.3%)	122.4 (11.0%)	123.0 (10.9%)
$\sigma_{opt} = 3.5$	94.0 (8.5%)	104.4 (9.4%)	118.9 (10.6%)	122.9 (10.8%)

зом, в дальнейшем будем использовать устойчивые точки, найденные при помощи NMS.

В табл. 1, в, г представлены результаты аналогичных экспериментов, только с применением биннинга с окном  $256 \times 256$  (без NMS в табл. 1, в и с NMS в табл. 1, г). Количество и доля повторяемых точек с применением биннинга уменьшились примерно на 4–10% относительно значений без биннинга. Оптимальные значения  $\sigma_{opt}$  и  $\sigma_{sar}$  сохранились. Напомним, что биннинг позволяет более равномерно распределить точки по изображению, что может улучшить точность сопоставления изображений на этапе нахождения геометрического преобразования в зависимости от используемой геометрической модели. Поэтому в следующем эксперименте мы оценим влияние биннинга и NMS на точность сопоставления изображений.

Для этого по найденным устойчивым точкам вычислялась точность сопоставления изображений (п. 3) для четырех комбинаций точек из про-

шлых экспериментов: без биннинга и без NMS, только с NMS, только с биннингом и с биннингом и с NMS. В качестве дескриптора использовался SIFT-дескриптор, а в качестве геометрической модели – голосующая схема (п. 3.4). Напомним, что параметры настраивались только на обучающей части датасета. Порядок подбора оптимальных параметров был следующим:

- Размер патча для вычисления дескриптора брался  $64 \times 64$  пикселя.

- Начальным дескрипторным порогом брались значение 175.

- Далее настраивались параметры голосующей схемы. Для этого фиксировался размер бина гистограммы  $size_{bin} = \{1, 2, 3\}$  и для каждого  $size_{bin}$  находилось оптимальное значение  $\sigma_m$ . Получаем три числа точности сопоставления изображений, из которых выбираем наибольшее.

**Таблица 2.** Оптимальные параметры и точность сопоставления изображений для четырех комбинаций точек с использованием биннинга и NMS

SIFT	Без модификаций	NMS	Биннинг	Биннинг + NMS
Параметры	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>des\_thr: 175</math></li> <li>• <math>size_{bin}: 2</math></li> <li>• <math>\sigma_m: 5</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>des\_thr: 175</math></li> <li>• <math>size_{bin}: 1</math></li> <li>• <math>\sigma_m: 5</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>des\_thr: 175</math></li> <li>• <math>size_{bin}: 2</math></li> <li>• <math>\sigma_m: 4</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>des\_thr: 160</math></li> <li>• <math>size_{bin}: 2</math></li> <li>• <math>\sigma_m: 3</math></li> </ul>
Обучающая	53/76	53/76	54/76	55/76
Тестовая	12/24	12/24	13/24	17/24
Итого	65/100	65/100	67/100	72/100

**Таблица 3.** Точность сопоставления изображений для двух методов дескрибирования: SIFT и предлагаемый в статье метод на полноразмерных изображениях (первые две колонки) и на даунскейленных в два раза изображениях. В первой строке приведены параметры для преобработки, голосующей схемы и дескрипторный порог

Дескриптор	SIFT	Наш	SIFT + даунскейл	Наш + даунскейл
Параметры	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>des\_thr: 160</math></li> <li>• <math>size_{bin}: 2</math></li> <li>• <math>\sigma_m: 3</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\sigma_{opt}^{pre}: 1</math></li> <li>• <math>\sigma_{sar}^{pre}: 2.5</math></li> <li>• <math>w: 1</math></li> <li>• <math>size_{bin}: 1</math></li> <li>• <math>\sigma_m: 10</math></li> <li>• <math>des\_thr: 2</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>des\_thr: 160</math></li> <li>• <math>size_{bin}: 0.5</math></li> <li>• <math>\sigma_m: 3</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\sigma_{opt}^{pre}: 0.75</math></li> <li>• <math>\sigma_{sar}^{pre}: 1.5</math></li> <li>• <math>w: 0</math></li> <li>• <math>size_{bin}: 0.75</math></li> <li>• <math>\sigma_m: 3</math></li> <li>• <math>des\_thr: 1</math></li> </ul>
Обучающая	55/76	57/76	41/76	57/76
Тестовая	17/24	16/24	13/24	17/24
Итого	72/100	73/100	54/100	74/100

– В завершение донастраивался дескрипторный порог  $des\_thr$  при фиксированных найденных параметрах голосующей схемы.

Используемые параметры применяются ко всем парам изображений из датасета. С одной стороны, высокий размер  $size_{bin}$  приводит к меньшей точности сопоставления из-за уменьшенной дискретности (сдвиг вдоль каждой оси кратен  $size_{bin}$ ). С другой стороны, слишком низкий размер бина приводит к большому влиянию шума (слишком маленькие бины будут содержать несколько (единицы) точек). Применение гауссового фильтра позволяет учитывать сдвиги в соседних бинах.

Значения параметров и точность сопоставления изображений показаны в табл. 2.

Из таблицы видно, что наилучший результат наблюдается при применении биннинга и NMS вместе, подтверждая гипотезу, что более равномерное распределение точек увеличивает точность сопоставления изображений. В дальнейших экспериментах будем использовать набор точек, полученных с применением биннинга и NMS. Отметим, что без биннинга применение NMS не изменило результат. Это можно объяснить тем, что без биннинга точки более сконцентрированы в определенных местах изображения и в результате фильтрации многие из них удаляют-

ся. В случае с биннингом точки более распределены и “скоплений” точек на изображении больше.

#### 4.2. Предлагаемый метод дескрибирования

В этом разделе представлены результаты нашего метода дескрибирования, описанного в п. 3.6, и проведено их сравнение с SIFT дескриптором. В качестве устойчивых точек были использованы точки, найденные в описанном выше эксперименте с применением биннинга и NMS. Параметры и результаты нашего метода дескрибирования представлены в табл. 3.

Параметры настраивались в порядке упоминания в списке по максимизации точности сопоставления изображений на обучающей выборке. Окно для морфологии  $w = 0$  означает отсутствие морфологии. Первые два столбца отражают точность сопоставления изображений алгоритмов, примененных к полноразмерным изображениям (как и в предыдущих экспериментах). Согласно табл. 3, наш метод дескрибирования немного выигрывает у SIFT дескриптора на полноразмерных картинках.

Поскольку изображения подвержены сильному зернистому шуму, было предложено произвести даунскейлинг изображений в 2 раза для уменьшения влияния шума. В этом случае размер

изображений меняется с  $1024 \times 1024$  до  $512 \times 512$ . Окно биннинга было изменено с  $256 \times 256$  до  $128 \times 128$ , а окно фильтрации NMS с 5 пикселей до 2.5. Размер патча для вычисления дескриптора остался прежним  $64 \times 64$  пикселя. Порог для сопоставления изображений был уменьшен с 5 пикселей до 2.5. Оптимальные параметры детектора подбирались аналогично описанному в п. 4.1. Параметры детекторов получились следующие:  $\sigma_{opt} = 1.5$  и  $\sigma_{sar} = 1.5$ .

Сравнение методов дескрибирования на даунскейленных картинках представлены в табл. 3 (последние два столбца). Алгоритм с предлагаемым методом дескрибирования немного улучшился, в то время как алгоритм с SIFT дескриптором сильно ухудшился.

Согласно результатам табл. 3 можно наблюдать, что алгоритм с предлагаемым методом дескрибирования показывает более высокую точность сопоставления, чем с SIFT дескриптором при оценке с использованием голосующей схемы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было продемонстрировано отсутствие общепринятого подхода в вычислении повторяемости устойчивых точек, что не позволяет объективно оценить точность алгоритмов детектирования. В статье приведены некоторые работы и используемые в них метрики повторяемости.

На опубликованном датасете (Волков, Швец, 2021) оптических и радиолокационных изображений было продемонстрировано влияние алгоритмов NMS (non-max-suppression) и биннинга на повторяемость и точность сопоставления изображений на примере SIFT детектора и дескриптора. Для этого датасет из 100 выравненных пар изображений был разделен на обучающую часть (76 пар) и тестовую часть (24 пары). Подбор оптимальных параметров алгоритма происходил только на обучающей части. Было показано, что применение алгоритмов NMS и биннинга уменьшает повторяемость устойчивых точек, но точность сопоставления изображений выше с применением этих алгоритмов. Наилучшая точность сопоставления наблюдалась при совместном использовании NMS и биннинга. В исследовании рассматривались только сдвиговые искажения изображений.

Дополнительно в данной работе предлагается новый метод дескрибирования устойчивых точек, являющийся модификацией SIFT дескриптора. Данный метод сравнивался с SIFT дескриптором по точности сопоставления изображений. Эксперименты показали, что наш метод показал более лучший результат по сравнению с SIFT дескриптором.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-61-47089).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Волков В.В., Швец Е.А. Набор данных и метод оценки алгоритмов сопоставления оптических и радиолокационных изображений на основе устойчивых точек. *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2021. № 2. С. 44–57. <https://doi.org/10.14357/20718632210205>
- Сидорчук Д.С., Волков В.В. Комплексирование радиолокационных изображений и оптических снимков в видимом и тепловом диапазонах с учетом различий в восприятии яркости и цветности. *Сенсорные системы*. 2018. Т. 32. № 1. С. 14–18. <https://doi.org/10.7868/S0235009218010031>
- Тропин Д.В., Шемякина Ю.А., Коноваленко И.А., Фараджев И.А. О локализации плоских объектов на изображениях со сложной структурой проективных искажений. *Информационные процессы*. 2019. Т. 19. № 2. С. 208–229.
- Чеканов М.О., Шипитько О.С., Ершов Е.И. Одноточечный RANSAC для оценки величины осевого вращения объекта по томографическим проекциям. *Сенсорные системы*. 2020. Т. 34. № 1. С. 72–86. <https://doi.org/10.31857/S0235009220010060>
- Шемякина Ю.А. Использование точек и прямых для вычисления проективного преобразования по двум изображениям плоского объекта. *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2017. Т. 3. С. 79–91.
- Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L. Speeded-up robust features (SURF). *Computer vision and image understanding*. 2008. V. 110. № 3. P. 346–359. <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2007.09.014>
- Chen M., Habib A., He H., Zhu Q., Zhang W. Robust feature matching method for SAR and optical images by using Gaussian-gamma-shaped bi-windows-based descriptor and geometric constraint. *Remote Sensing*. 2017. V. 9. № 9. P. 882. <https://doi.org/10.3390/rs9090882>
- Copernicus Open Access Hub, Terms and Conditions. URL: <https://scihub.copernicus.eu/twiki/do/view/SciHubWebPortal/TermsConditions> (дата обращения 18.04.2022).
- Copernicus Open Access Hub. URL: <https://scihub.copernicus.eu/> (дата обращения 18.04.2022).
- Errico A., Angelino C.V., Cicala L., Persechino G., Ferrara C., Lega M., Vallario A., Parente C., Masi G., Gaetano R., Scarpa G. Detection of environmental hazards through the feature-based fusion of optical and SAR data: A case study in southern Italy. *International Journal of Remote Sensing*. 2015. V. 36. № 13. P. 3345–3367. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1054960>
- Fan B., Huo C., Pan C., Kong Q. Registration of optical and SAR satellite images by exploring the spatial relationship of the improved SIFT. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2012. V. 10. № 4. P. 657–661. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2216500>

- Fan J., Wu Y., Li M., Liang W., Cao Y. SAR and optical image registration using nonlinear diffusion and phase congruency structural descriptor. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2018. V. 56. № 9. P. 5368–5379.  
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2815523>
- Fischler M.A., Bolles R.C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*. 1981. V. 24. № 6. P. 381–395.  
<https://doi.org/10.1145/358669.358692>
- Gong M., Zhao S., Jiao L., Tian D., Wang S. A novel coarse-to-fine scheme for automatic image registration based on SIFT and mutual information. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2013. V. 52. № 7. P. 4328–4338.  
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2281391>
- Hamdi I., Tounsi Y., Benjelloun M., Nassim A. Evaluation of the change in synthetic aperture radar imaging using transfer learning and residual network. *Computer Optics*. 2021. V. 45 (4). P. 600–607.  
<https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-814>
- Kunina I., Panfilova E., Gladkov A. Matching of SAR and optical images by independent referencing to vector map. In *Eleventh International Conference on Machine Vision (ICMV 2018)*. 2019. V. 11041.  
<https://doi.org/10.1117/12.2523132>
- Leutenegger S., Chli M., Siegwart R.Y. BRISK: Binary robust invariant scalable keypoints. In *2011 International conference on computer vision*. 2011. P. 2548–2555.  
<https://doi.org/10.1109/ICCV.2011.6126542>
- Li J., Hu Q., Ai M. RIFT: Multi-modal image matching based on radiation-variation insensitive feature transform. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2019. V. 29. P. 3296–3310.  
<https://doi.org/10.1109/TIP.2019.2959244>
- Lowe D.G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*. 2004. V. 60. № 2. P. 91–110.  
<https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>
- Ma W., Wen Z., Wu Y., Jiao L., Gong M., Zheng Y., Liu L. Remote sensing image registration with modified SIFT and enhanced feature matching. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2016. V. 14. № 1. P. 3–7.  
<https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2600858>
- Matas J., Chum O., Urban M., Pajdla T. Robust wide-baseline stereo from maximally stable extremal regions. *Image and vision computing*. 2004. V. 22. № 10. P. 761–767.  
<https://doi.org/10.1016/j.imavis.2004.02.006>
- OpenCV: Main page. URL: <https://docs.opencv.org/master/index.html> (дата обращения 18.04.2022).
- Paul S., Pati U.C. Automatic optical-to-SAR image registration using a structural descriptor. *IET Image Processing*. 2019. V. 14. № 1. P. 62–73.  
<https://doi.org/10.1049/iet-ipr.2019.0389>
- Paul S., Pati U.C. Optical-to-SAR image registration using modified distinctive order based self-similarity operator. In *2018 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*. 2018. P. 1–5.  
<https://doi.org/10.1109/SCEECS.2018.8546950>
- Plank S., Twele A., Martinis S. Landslide mapping in vegetated areas using change detection based on optical and polarimetric SAR data. *Remote Sensing*. 2016. V. 8. № 4. P. 307.  
<https://doi.org/10.3390/rs8040307>
- Rosten E., Porter R., Drummond T. Faster and better: A machine learning approach to corner detection. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 2008. V. 32. № 1. P. 105–119.  
<https://doi.org/10.1109/TPAMI.2008.275>
- Schmid C., Mohr R., Bauckhage C. Evaluation of interest point detectors. *International Journal of computer vision*. 2000. V. 37. № 2. P. 151–172.  
<https://doi.org/10.1023/A:1008199403446>
- Shi W., Su F., Wang R., Fan J. A visual circle based image registration algorithm for optical and SAR imagery. In *2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2012. P. 2109–2112.  
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6351089>
- Skoryukina N., Faradjev I., Bulatov K., Arlazarov V.V. Impact of geometrical restrictions in RANSAC sampling on the ID document classification. In *Twelfth International Conference on Machine Vision (ICMV 2019)*. 2020. V. 11433.  
<https://doi.org/10.1117/12.2559306>
- Suri S., Reinartz P. Mutual-information-based registration of TerraSAR-X and Ikonos imagery in urban areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2009. V. 48. № 2. P. 939–949.  
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2034842>
- Tropin D.V., Nikolaev D.P., Slugin D.G. The method of image alignment based on sharpness maximization. In *Eleventh International Conference on Machine Vision (ICMV 2018)*. 2019. V. 11041.  
<https://doi.org/10.1117/12.2522903>
- Wang H., Wang C., Li P., Chen Z., Cheng M., Luo L., Liu Y. Optical-to-SAR Image Registration Based On Gaussian Mixture Model. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2012. V. 39. P. 179–183.
- Wang L., Sun M., Liu J., Cao L., Ma G. A Robust Algorithm Based on Phase Congruency for Optical and SAR Image Registration in Suburban Areas. *Remote Sensing*. 2020. V. 12. № 20. P. 3339.  
<https://doi.org/10.3390/rs12203339>
- Xiang Y., Wang F., You H. OS-SIFT: A robust SIFT-like algorithm for high-resolution optical-to-SAR image registration in suburban areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2018. V. 56. № 6. P. 3078–3090.  
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2790483>
- Xie Z., Liu J., Liu C., Zuo Y., Chen X. Optical and SAR Image Registration Using Complexity Analysis and Binary Descriptor in Suburban Areas. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2021. V. 19. P. 1–5.  
<https://doi.org/10.1109/LGRS.2021.3071870>
- Xiong X., Xu Q., Jin G., Zhang H., Gao X. Rank-Based Local Self-Similarity Descriptor for Optical-to-SAR Image Matching. *IEEE Geoscience and Remote Sensing*

- Letters. 2019. V. 17. № 10. P. 1742–1746.  
<https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2955153>
- Xu C., Sui H., Li H., Liu J. An automatic optical and SAR image registration method with iterative level set segmentation and SIFT. *International Journal of Remote Sensing*. 2015. V. 36. № 15. P. 3997–4017.  
<https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1070321>
- Ye S.P., Chen C.X., Nedzved A., Jiang J. Building detection by local region features in SAR images. *Computer Optics*. 2020. V. 44. № 6. P. 944–950.  
<https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-703>
- Yu H., Yang W., Liu Y. Coarse-to-fine accurate registration for airborne Sar images using SAR-FAST and DSP-LATCH. *Progress In Electromagnetics Research*. 2018. V. 163. P. 89–106.  
<https://doi.org/10.2528/PIER18070801>
- Yu Q., Ni D., Jiang Y., Yan Y., An J., Sun T. Universal SAR and optical image registration via a novel SIFT framework based on nonlinear diffusion and a polar spatial-frequency descriptor. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2021. V. 171. P. 1–17.  
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.10.019>

## Modification of the method of detecting and describing keypoints SIFT for optical-to-SAR image registration

V. V. Volkov<sup>a,b</sup> #

<sup>a</sup> Moscow Institute of Physics and Technology,  
 141701 Dolgoprudny, Institutskiy per., 9, Russia

<sup>b</sup> Institute for Information Transmission Problems (Kharkevich Institute) RAS,  
 127051 Moscow, Bolshoy Karetny per., 19, Russia

# E-mail: volkov-vl-v@yandex.ru

Image registration is the alignment (i.e. finding a general coordinate system) of two or more images of the same scene. Complex case of this task is the multimodal image registration, for example, optical-to-SAR. The need for such registration appeared in image fusion and object detection. One of the ways for image registration is to detect keypoints, calculate descriptor for each keypoint and form keypoints pairs by comparing descriptors. Further, the geometric transformation between two images is calculated by geometric model. In this paper modifications for the algorithm of detection SIFT keypoints was evaluated for optical-to-SAR image registration. Additionally, in this paper a modification of the SIFT descriptor was proposed and compared with SIFT descriptor. Image distortions is considered to be only shifts. All studies were carried out on a published dataset of 100 aligned pairs of optical-SAR images.

*Key words:* image registration, repeatability of keypoints, description of keypoints

### REFERENCES

- Volkov V.V., Shvets E.A. Dataset and Method for Evaluating Optical-to-Sar Image Registration Algorithms Based on Keypoints. *Informacionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [Journal of Information Technologies and Computing Systems]. 2021. V. 2. P. 44–57.  
<https://doi.org/10.14357/20718632210205> (in Russian).
- Sidorchuk D.S., Volkov V.V. Fusion of radar, visible and thermal imagery with account for differences in brightness and chromaticity perception. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2018. V. 32 (1). P. 14–18.  
<https://doi.org/10.7868/S0235009218010031> (in Russian).
- Tropin D.V., Shemiakina J.A., Konovalenko I.A., Faradjev I.A. Localization of planar objects on the images with complex structure of projective distortion. *Informacionnye processy* [Information processes]. 2019. V. 19 (2). P. 208–229 (in Russian).
- Chekanov M.O., Shipitko O.S., Ershov E.I. 1-point RANSAC for axial rotation angle estimation by tomographic projections. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2020. V. 34 (1). P. 72–86.  
<https://doi.org/10.31857/S0235009220010060> (in Russian).
- Shemiakina J.A. Ispol'zovanie tochek i pryamyh dlya vychisleniya proektivnogo preobrazovaniya po dvum izobrazheniyam ploskogo ob'ekta [Using points and straight lines to calculate a projective transformation from two images of a flat object]. *Informacionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [Journal of Information Technologies and Computing Systems]. 2017. V. 3. P. 79–91 (in Russian).
- Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L. Speeded-up robust features (SURF). *Computer vision and image understanding*. 2008. V. 110. № 3. P. 346–359.  
<https://doi.org/10.1016/j.cviu.2007.09.014>
- Chen M., Habib A., He H., Zhu Q., Zhang W. Robust feature matching method for SAR and optical images by using Gaussian-gamma-shaped bi-windows-based descriptor and geometric constraint. *Remote Sensing*. 2017. V. 9. № 9. P. 882.  
<https://doi.org/10.3390/rs9090882>
- Copernicus Open Access Hub, Terms and Conditions. URL: <https://scihub.copernicus.eu/twiki/do/view/SciHubWebPortal/TermsConditions> (дата обращения 18.04.2022).
- Copernicus Open Access Hub. URL: <https://scihub.copernicus.eu/> (дата обращения 18.04.2022).

- Errico A., Angelino C.V., Cicala L., Persechino G., Ferrara C., Lega M., Vallario A., Parente C., Masi G., Gaetano R., Scarpa G. Detection of environmental hazards through the feature-based fusion of optical and SAR data: A case study in southern Italy. *International Journal of Remote Sensing*. 2015. V. 36. № 13. P. 3345–3367.  
<https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1054960>.
- Fan B., Huo C., Pan C., Kong Q. Registration of optical and SAR satellite images by exploring the spatial relationship of the improved SIFT. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2012. V. 10. № 4. P. 657–661.  
<https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2216500>.
- Fan J., Wu Y., Li M., Liang W., Cao Y. SAR and optical image registration using nonlinear diffusion and phase congruency structural descriptor. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2018. V. 56. № 9. P. 5368–5379.  
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2815523>.
- Fischler M.A., Bolles R.C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*. 1981. V. 24. № 6. P. 381–395.  
<https://doi.org/10.1145/358669.358692>.
- Gong M., Zhao S., Jiao L., Tian D., Wang S. A novel coarse-to-fine scheme for automatic image registration based on SIFT and mutual information. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2013. V. 52. № 7. P. 4328–4338.  
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2281391>.
- Hamdi I., Tounsi Y., Benjelloun M., Nassim A. Evaluation of the change in synthetic aperture radar imaging using transfer learning and residual network. *Computer Optics*. 2021. V. 45 (4). P. 600–607.  
<https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-814>.
- Kunina I., Panfilova E., Gladkov A. Matching of SAR and optical images by independent referencing to vector map. In *Eleventh International Conference on Machine Vision (ICMV 2018)*. 2019. V. 11041.  
<https://doi.org/10.1117/12.2523132>.
- Leutenegger S., Chli M., Siegwart R.Y. BRISK: Binary robust invariant scalable keypoints. In *2011 International conference on computer vision*. 2011. P. 2548–2555.  
<https://doi.org/10.1109/ICCV.2011.6126542>.
- Li J., Hu Q., Ai M. RIFT: Multi-modal image matching based on radiation-variation insensitive feature transform. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2019. V. 29. P. 3296–3310.  
<https://doi.org/10.1109/TIP.2019.2959244>.
- Lowe D.G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*. 2004. V. 60. № 2. P. 91–110.  
<https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>.
- Ma W., Wen Z., Wu Y., Jiao L., Gong M., Zheng Y., Liu L. Remote sensing image registration with modified SIFT and enhanced feature matching. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2016. V. 14. № 1. P. 3–7.  
<https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2600858>.
- Matas J., Chum O., Urban M., Pajdla T. Robust wide-baseline stereo from maximally stable extremal regions. *Image and vision computing*. 2004. V. 22. № 10. P. 761–767.  
<https://doi.org/10.1016/j.imavis.2004.02.006>.
- OpenCV: Main page. URL: <https://docs.opencv.org/master/index.html> (дата обращения 18.04.2022).
- Paul S., Pati U.C. Automatic optical-to-SAR image registration using a structural descriptor. *IET Image Processing*. 2019. V. 14. № 1. P. 62–73.  
<https://doi.org/10.1049/iet-ipr.2019.0389>.
- Paul S., Pati U.C. Optical-to-SAR image registration using modified distinctive order based self-similarity operator. In *2018 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*. 2018. P. 1–5.  
<https://doi.org/10.1109/SCEECS.2018.8546950>.
- Plank S., Twele A., Martinis S. Landslide mapping in vegetated areas using change detection based on optical and polarimetric SAR data. *Remote Sensing*. 2016. V. 8. № 4. P. 307.  
<https://doi.org/10.3390/rs8040307>.
- Rosten E., Porter R., Drummond T. Faster and better: A machine learning approach to corner detection. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 2008. V. 32. № 1. P. 105–119.  
<https://doi.org/10.1109/TPAMI.2008.275>.
- Schmid C., Mohr R., Bauckhage C. Evaluation of interest point detectors. *International Journal of computer vision*. 2000. V. 37. № 2. P. 151–172.  
<https://doi.org/10.1023/A:1008199403446>.
- Shi W., Su F., Wang R., Fan J. A visual circle based image registration algorithm for optical and SAR imagery. In *2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2012. P. 2109–2112.  
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6351089>.
- Skoryukina N., Faradjev I., Bulatov K., Arlazarov V.V. Impact of geometrical restrictions in RANSAC sampling on the ID document classification. In *Twelfth International Conference on Machine Vision (ICMV 2019)*. 2020. V. 11433.  
<https://doi.org/10.1117/12.2559306>.
- Suri S., Reinartz P. Mutual-information-based registration of TerraSAR-X and Ikonos imagery in urban areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2009. V. 48. № 2. P. 939–949.  
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2034842>.
- Tropin D.V., Nikolaev D.P., Slugin D.G. The method of image alignment based on sharpness maximization. In *Eleventh International Conference on Machine Vision (ICMV 2018)*. 2019. V. 11041.  
<https://doi.org/10.1117/12.2522903>.
- Wang H., Wang C., Li P., Chen Z., Cheng M., Luo L., Liu Y. Optical-to-SAR Image Registration Based On Gaussian Mixture Model. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2012. V. 39. P. 179–183.
- Wang L., Sun M., Liu J., Cao L., Ma G. A Robust Algorithm Based on Phase Congruency for Optical and SAR Image Registration in Suburban Areas. *Remote Sensing*. 2020. V. 12. № 20. P. 3339.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs12203339>.

- Xiang Y., Wang F., You H. OS-SIFT: A robust SIFT-like algorithm for high-resolution optical-to-SAR image registration in suburban areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2018. V. 56. № 6. P. 3078–3090.  
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2790483>.
- Xie Z., Liu J., Liu C., Zuo Y., Chen X. Optical and SAR Image Registration Using Complexity Analysis and Binary Descriptor in Suburban Areas. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2021. V. 19. P. 1–5.  
<https://doi.org/10.1109/LGRS.2021.3071870>.
- Xiong X., Xu Q., Jin G., Zhang H., Gao X. Rank-Based Local Self-Similarity Descriptor for Optical-to-SAR Image Matching. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2019. V. 17. № 10. P. 1742–1746.  
<https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2955153>.
- Xu C., Sui H., Li H., Liu J. An automatic optical and SAR image registration method with iterative level set segmentation and SIFT. *International Journal of Remote Sensing*. 2015. V. 36. № 15. P. 3997–4017.  
<https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1070321>.
- Ye S.P., Chen C.X., Nedzved A., Jiang J. Building detection by local region features in SAR images. *Computer Optics*. 2020. V. 44. № 6. P. 944–950.  
<https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-703>.
- Yu H., Yang W., Liu, Y. Coarse-to-fine accurate registration for airborne Sar images using SAR-FAST and DSP-LATCH. *Progress In Electromagnetics Research*. 2018. V. 163. P. 89–106.  
<https://doi.org/10.2528/PIER18070801>.
- Yu Q., Ni D., Jiang Y., Yan Y., An J., Sun T. Universal SAR and optical image registration via a novel SIFT framework based on nonlinear diffusion and a polar spatial-frequency descriptor. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2021. V. 171. P. 1–17.  
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.10.019>.

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА “СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ”

DOI: 10.31857/S023500922101011X

Все рукописи подаются в Редакцию журнала через редакционно-издательскую систему (РИС). Для подачи рукописи автор-корреспондент (тот, кто подает рукопись) должен зарегистрироваться в РИС. Данные, которые требуется указать автору при регистрации, необходимы для автоматического заполнения договоров с издателями. Регистрация пользователей в системе производится на сайте <https://publish.sciencejournals.ru/login>. После регистрации возможна подача рукописи через личный кабинет: загрузка всех необходимых файлов (текст, рисунки, при необходимости – сопроводительные материалы), включая договор о передаче авторского права. В дальнейшем все этапы прохождения рукописи, в том числе рецензии и решение Редколлегии, могут быть отслежены через личный кабинет автора. При подаче материалов обязательно дублировать статьи по почте [editor@sensorysystems.ru](mailto:editor@sensorysystems.ru).

Журнал “Сенсорные системы” публикует оригинальные статьи, обзоры, краткие сообщения. Назначение журнала – освещать физические, физиологические, морфологические и информационные аспекты структуры и функции биологических и технических сенсорных систем, принципы представления и переработки информации из окружающего мира и реконструкции его содержания, алгоритмы работы систем автоматического анализа сенсорной информации для управления аппаратами, заменяющими человека в разных сферах деятельности. Журнал принимает только те статьи, которые соответствуют тематике журнала.

Журнал придерживается правил международного Комитета по этике публикаций (Committee on Publication Ethics – COPE, подробнее можно ознакомиться на сайте: <https://sensorysystems.ru/ru/ethics.html>).

К публикации принимаются завершённые экспериментальные и теоретические работы, ранее нигде не публиковавшиеся и не представленные для публикации в другом издании. Поступающие рукописи проверяются на наличие плагиата.

Статьи, опубликованные в журнале “Сенсорные системы”, выборочно публикуются в переводе на английский язык в журнале “Neuroscience and Behavioral Physiology”. Отбор статей для перевода производится редакционными коллегиями и главными редакторами обоих журналов по согласованию с авторами.

Шаблон рукописи в формате doc можно скачать по ссылке: [http://sensorysystems.ru/ru/article\\_submission.html](http://sensorysystems.ru/ru/article_submission.html).

**К рукописи обязательно должны быть приложены:**

- подписанный лицензионный договор (бланк договора можно скачать по адресу: [http://sensorysystems.ru/ru/article\\_submission.html/](http://sensorysystems.ru/ru/article_submission.html/));
- номер телефона и адрес электронной почты контактного лица (на отдельном листе или в тексте письма).

### Прохождение рукописей

Все рукописи, поступившие в редакцию, рецензируются не менее чем двумя рецензентами “слепым” рецензированием. В роли рецензентов могут выступать внешние эксперты и члены редколлегии. Решение о публикации принимается Редколлегией журнала на основе полученных рецензий. Автор может рекомендовать двух-трех рецензентов для своей работы, но право выбора рецензентов остается за Редколлекцией. Редколлегия может поставить условием публикации доработку рукописи в соответствии с рекомендациями рецензентов. Редколлегия оставляет за собой право отклонить рукопись, если она не соответствует профилю журнала, неудовлетворительна по научному содержанию или по техническому исполнению. Рецензии направляются авторам вместе с мотивированным заключением (“принять”, “доработать”, “отклонить”). В случае заключения “доработать”, авторы должны представить доработанный вариант рукописи в течение трех месяцев. При предоставлении измененной рукописи в более поздний срок, она рассматривается как новая. Рецензии и заключения Редколлегии хранятся в редакции и Издательстве в течение 5 лет.

### Авторские экземпляры

Авторам высылается PDF-файл опубликованной статьи.

### Технические требования к рукописи

Рукописи представляются в электронном виде на русском или английском языках. Электронный файл должен быть в формате DOC. Один

электронный файл должен содержать полный набор информации, т.е. основной текст, подрисованные подписи, таблицы и рисунки.

Рукопись должна быть набрана шрифтом Times New Roman 12 pt, отформатирована через 1.5 интервала, на листах А4 с полями 3-5 см с левой стороны, 1 см с правой стороны, не менее 3 см сверху и снизу. Каждый абзац начинается с красной строки, межбазисный отступ должен быть равен межстрочному интервалу. Все страницы рукописи нумеруются по порядку.

При первом введении аббревиатур дается их полная расшифровка. Другие сокращения слов, кроме единичных измерений и сокращения “т.е.”, не допускаются.

При наборе правильно используйте прописные и строчные буквы, буквы русского и латинского алфавитов и другие символы сходных начертаний. Помните, что в компьютерных текстах все эти символы имеют разные коды.

**Рисунки** располагаются в конце рукописи, а не в тексте. Каждый рисунок выполняется на отдельной странице с указанием номера рисунка. Разрешение рисунков должно быть не менее 300 dpi. Рекомендуется, чтобы ширина рисунка на странице составляла 8-8.5 см (на одну колонку) или 17-17.5 см (на две колонки). При этом с рукописью обязательно должны быть сданы исходные файлы иллюстраций.

Векторные иллюстрации должны быть предоставлены в стандартном формате файлов графического редактора, в котором они были подготовлены, также принимается формат EPS. Остальные иллюстрации принимаются в любых стандартных графических форматах, предпочтительно – TIFF.

Если рисунок содержит несколько фрагментов, они обозначаются по порядку курсивными строчными буквами русского алфавита: *a*, *b*, *v* и т.д.

Цветные рисунки допускаются только по предварительному согласованию с редакцией.

Если авторы используют в своей рукописи иллюстрации или таблицы из других публикаций (в том числе своих собственных), то им необходимо запросить у Издателей этих публикаций разрешение на перепечатку или использование материалов. Подробнее: <https://www.pleiades.online/ru/authors/permission/>

**Подписи к рисункам** даются в конце текста статьи на отдельной странице (все на одной) и должны быть лаконичными и не дублировать основной текст рукописи, однако все условные обозначения и символы должны быть расшифрованы, значения координатных осей указаны.

**Таблицы** набираются при помощи редактора таблиц. Каждая таблица выполняется на отдельной странице после текста рукописи.

### **Дополнительные материалы**

Для более полного описания исследования, к статье могут прилагаться дополнительные материалы (аудио- и видеофайлы, презентации, дополнительные таблицы и рисунки и пр.) при условии, если автор является правообладателем прилагаемых материалов, и автором ранее не были переданы авторские права на их использование иным (кроме издателя) лицам, либо автор имеет письменное разрешение правообладателя на их использование в целях опубликования и распространения в журнале. Дополнительные материалы публикуются только в электронной версии на сайте <https://elibrary.ru>.

### **Структура и оформление рукописи**

На первой странице рукописи приводятся:

– УДК (индекс Универсальной десятичной классификации).

– Заглавие. Заголовок статьи должен быть максимально конкретным, желательно не более 1.5-2 строк (лучше в пределах одной строки).

– Инициалы и фамилия (фамилии) автора (авторов).

– Полное название и адрес организации, где выполнена работа. Если авторы публикации – из разных учреждений, то аффилиация каждого отмечается надстрочной цифрой (например, И.И. Иванов<sup>1</sup>). В английском резюме аффилиации отмечаются латинскими буквами (I.I. Ivanov<sup>a</sup>). Контактный адрес e-mail одного из авторов. Контактный автор в тексте отмечается звездочкой (например, И.И. Иванов<sup>1,\*</sup>). В английском резюме контактный автор отмечается надстрочным знаком # (I.I. Ivanov<sup>#</sup>).

– Слова “Поступила в редакцию...”, “После доработки...”, “Принята к публикации...” (даты будут вписаны редакцией).

– Аннотация на русском языке объемом до 3/4 страницы. Аннотация должна давать представление о предмете исследования, использованных методах и основных результатах.

– Ключевые слова.

– DOI: (DOI будет вписан редакцией).

Пример оформления шапки русскоязычной части статьи:

### **НАЗВАНИЕ СТАТЬИ**

© 2018 г. И. И. Иванов<sup>1,\*</sup>, П. П. Петров<sup>1</sup>, С. С. Сидоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Место работы первого автора, 127000 Москва, Один Переулок, д. 19, Россия

<sup>2</sup> Место работы второго автора, 127000 Москва, Другой Переулок, д. 19, Россия

\*E-mail: [author1@mail.ru](mailto:author1@mail.ru)

Поступила в редакцию ...

После доработки ...

Принята к публикации ...

Последующие разделы начинаются со второй страницы. Стандартная структура рукописи, описывающая экспериментальное исследование, включает следующие разделы.

– **Введение** должно содержать изложение проблемы, уровень ее изученности на данный момент и вытекающие отсюда задачи исследования.

– **Описание методики** должно показать соответствие технологии и методов задачам работы и при необходимости обеспечить воспроизводимость результатов другими исследователями. Необходимо указать вид и число наблюдений, дозы веществ, параметры стимуляции, особенности наркоза и пр. При выполнении экспериментов на людях или животных, обязательно описание тех особенностей методики, которые обеспечивают соблюдение норм безвредности экспериментов для людей и гуманного обращения с животными.

– **Результаты исследования** должны содержать описание всех оригинальных данных, представляющих научную ценность и используемых в дальнейшем для обсуждения.

– **Обсуждение** должно касаться рассмотрения и оценки важнейших результатов. Привлекайте для обсуждения только свои оригинальные данные, изложенные в разделе “Результаты”, и данные цитируемых литературных источников. Не включайте в раздел информацию, если не можете точно указать ее источник. При необходимости может привлекаться любая опубликованная информация, но желательно избегать ссылок на нерцензируемые издания, не гарантирующие достоверность сведений (например, краткие тезисы конференций, научно-популярные публикации).

– **Заключение или Выводы.**

– **Финансирование.** Следует указать, каким фондом и грантом поддержано данное исследование и каждая часть работы в отдельности, если источники финансирования разные.

– **Благодарности.** Раздел не является обязательным, заполняется по желанию авторов.

– **Конфликт интересов.** Раздел является обязательным. В случае отсутствия конфликта интересов, авторы также указывают “Авторы данной статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить”.

– **Соблюдение этических норм.** Раздел является обязательным. Если исследования проводились на животных, то в данном разделе указывается: “Все процедуры, выполненные в исследованиях с участием животных, соответствовали этическим стандартам учреждения, в котором проводились исследования, и утвержденным правовым актам РФ и международных организаций”. Если исследования проводились с участием людей, то в разделе “Соблюдение этических норм” указывается: “Все процедуры, выполненные в исследованиях с

участием людей, соответствуют этическим стандартам национального комитета по исследовательской этике и Хельсинкской декларации 1964 года и ее последующим изменениям или сопоставимым нормам этики. От каждого из включенных в исследование участников было получено информированное добровольное согласие”. Если в статьях не содержится описания исследований с участием людей или использованием животных и выполненных кем-либо из авторов, в разделе “Соблюдение этических норм” указывается: “Настоящая статья не содержит описания выполненных авторами исследований с участием людей или использованием животных в качестве объектов”.

– **Участие авторов.** В разделе указывается вклад в работу каждого из авторов.

– **Список литературы.**

– **Резюме** на английском языке.

– **REFERENCES.**

Резюме на английском языке включает:

– Заглавие.

– Инициалы и фамилии авторов. Если в статье более одного автора, перед фамилией последнего пишется “and” (I.I. Ivanov, P.P. Petrov, and S.S. Sidorov).

– Название и адрес учреждения. Адрес учреждения обязательно содержит название страны. Если авторы из разных учреждений, то в английском резюме аффилиации отмечаются латинскими буквами (I.I. Ivanov<sup>a</sup>).

– Контактный адрес e-mail одного из авторов. В английском резюме контактный автор отмечается надстрочным знаком # (I.I. Ivanov<sup>#</sup>).

– Аннотацию (abstract). Содержание аннотации на английском языке должно быть идентичным русскоязычной аннотации.

– Ключевые слова (key words).

**Пример оформления шапки английского резюме:**

**Paper title**

I. I. Ivanov<sup>a, #</sup>, P. P. Petrov<sup>a</sup>, and S. S. Sidorov<sup>b</sup>

<sup>a</sup> First Institution, 127000 Moscow, One lane, 19, Russia

<sup>b</sup> Second Institution, 127000 Moscow, Another lane, 19, Russia

<sup>#</sup>E-mail: author1@mail.ru

Допускается отклонение от стандартной схемы рукописи, например, объединение разделов “Результаты исследования” и “Обсуждение”. Для обзорных статей более адекватна рубрикация (если необходима), соответствующая тематическим разделам.

**Литературные ссылки в тексте** даются в круглых скобках по фамилии (фамилиям) авторов и, через запятую, году публикации. Если авторов

двое, их фамилии упоминаются через запятую, без союза. Например: “Предшествующими исследованиями показано (Иванов, Петров, 2000), что...”. В случае трех и более авторов указывается только первая фамилия с добавлением “и др.” (для русскоязычных публикаций) или “et al.” (для англоязычных публикаций). При цитировании нескольких источников, они указываются через точку с запятой: (Рожкова, 2015; Николаев, 2001). Для ссылки на разные работы коллективов с одинаковым первым автором и одного года опубликования добавляются буквы а, б, в. (Рожкова, 2015а; 2015б). В списке литературы буквы а, б, в указываются сразу после года, без пробела. В списке “REFERENCES” указывать буквы не нужно.

**Список литературы и список “REFERENCES”** включают все те и только те публикации, на которые имеются ссылки в тексте. Ссылки на неопубликованные работы (с указанием “в печати”, “личное сообщение” и т.п.) не допускаются.

**Обратите внимание, что с 2018 г. список литературы в статьях приводится дважды: один раз – в формате, удобном для читателей, второй – в формате, удобном для поисковых систем.** Под заголовком “Список литературы” русскоязычные публикации указываются в кириллице, англоязычные (и любые другие в латинской транскрипции) – в латинице. Под заголовком “REFERENCES” русскоязычные источники указываются в латинице (правила оформления далее), англоязычные (и любые другие в латинской транскрипции) источники полностью дублируются. Порядок публикаций в этих списках одинаков: русскоязычные источники идут перед источниками в латинице и выстраиваются в порядке русского алфавита (даже при транслитерации).

Транслитерация русскоязычных названий для формирования списка “REFERENCES” должна выполняться в соответствии с форматом BSI (рекомендуется использовать бесплатный сервис <http://ru.translit.net/?account=bsi/>). Если в русскоязычной публикации имелось англоязычное резюме, или англоязычная версия названия и фамилий авторов, фамилии авторов следует давать в том же написании, как в оригинальной публикации. Если в русскоязычной публикации отсутствовало англоязычное резюме или англоязычная версия названия и фамилий авторов, то для написания фамилий авторов рекомендуется использовать транслитерацию, которую использует сам автор (например, в его англоязычных публикациях). Если авторское написание неизвестно, тогда используется формат транслитерации BSI.

Пожалуйста, аккуратно указывайте названия журналов. Названия журналов должны приводиться либо полностью, либо с сокращениями,

согласно “list of serial titles word abbreviations”. Предпочтительно использовать сокращения.

При наличии у публикации DOI, его указание обязательно.

Если статья написана на русском языке, и в списке цитируемой литературы отсутствуют русскоязычные источники, список дается однократно, при этом предваряется заголовками “Список литературы” и затем, с новой строки, “REFERENCES”. Слово “REFERENCES” является ключевым для поисковых систем международных баз данных. Заголовок “Список литературы” необходим для всех русскоязычных статей.

#### **Оформление раздела “Список литературы”**

Список начинается на отдельной странице, составляется в алфавитном порядке фамилий авторов (сначала публикации на русском языке, затем – на иностранных языках), без нумерации.

Обратите внимание, что теперь фамилии и инициалы пишутся прямым шрифтом, название книги/журнала – курсивом, знак “//” в списке литературы не используется.

Список составляется по следующему образцу.

##### *Книги*

Фамилия И.О. *Заголовок книги*. Город (Москва и Санкт-Петербург – сокращенно: М., СПб.). Изд-во, 1995. 351 с.

*Статьи и главы в книгах, неперидических изданиях, сборниках трудов*

Фамилия И.О. Заголовок статьи. *Название книги*. Под ред. Фамилия И.О. Город. Изд-во, 1995. Ч. I. С. 22–35.

##### *Статьи в журналах*

Фамилия И.О. Заголовок статьи. *Название журнала*. 1995. Т. I. № 1. С. 22–27. DOI: xxxxxx.

##### *Диссертации и авторефераты диссертаций*

Мы рекомендуем вместо ссылок на диссертации и авторефераты давать ссылки на статьи или монографии по теме диссертации: такие публикации легче найти, если читатель хочет ознакомиться с материалом, и такие цитирования лучше учитываются поисковыми системами.

Фамилия И.О. *Название диссертации*. Дисс. канд. (докт.) биол. наук. Город. 2000. 351 с.

##### *Интернет-ресурсы*

Фамилия И.О. *Название статьи*. URL: [http://example\\_url.html](http://example_url.html) (дата обращения: 23.06.2013).

##### *ГОСТы*

ГОСТ 8.586.5-2005. *Название ГОСТа*. М. Центр стандартизации, 2007. 10 с.

##### *Патенты*

Фамилия И.О. *Название патента*. Патент РФ. № 2486597. 2013.

**Оформление раздела “REFERENCES”**

Если в цитируемой русскоязычной публикации имелись англоязычные версии заголовка и фамилий авторов, то в разделе “References” они должны быть даны в точном соответствии с тем, как представлены в публикации. Если в русскоязычной публикации эти данные отсутствовали, название, фамилии авторов и библиографические данные должны быть транслитерированы в соответствии с форматом BSI. После транслитерации в квадратных скобках должен быть указан перевод (без выделения курсивом). В самом конце библиографического описания в круглых скобках помещают указание на исходный язык публикации, например, “(in Russian)”. Издательство приводится транслитерацией, если не имеет собственного названия на английском языке.

**Книги**

Polyak S.L. *The Retina*. Chicago, The University of Chicago Press. 1941. 607 p.

Byzov A.L. *Elektrofiziologicheskie issledovaniya setchatki* [Electrophysiological studies of the retina]. Moscow. Nauka Publ, 1966. 196 p. (in Russian).

*Статьи и главы в книгах, неперiodических изданиях, сборниках трудов*

Rozhkova G.I. Binokulyarnoe zrenie [Binocular vision]. *Rukovodstvo po fiziologii. Fiziologiya zreniya* [Handbook on physiology. Vision physiology] Moscow. Nauka, 1992. P. 586–664 (in Russian).

**Статьи в журналах**

Gladkov A.P., Kuznetsova E.G., Gladilin S.A., Gracheva M.A. Adaptivnaya stabilizatsiya yarkosti izobrazheniya v tekhnicheskoi sisteme raspoznavaniya krupnykh dvizhushchikhsya ob"ektov [Adaptive image brightness stabilization for the industrial system of large moving object recognition]. *Sensornye sistemy*

[Sensory systems]. 2017. V. 31 (3). P. 247–260. DOI: xxxxxxx (in Russian).

**Диссертации и авторефераты диссертаций**

Grigor'ev Iu.A. *Razrabotka nauchnykh osnov proektirovaniia arkhitektury raspredelennykh sistem obrabotki dannykh*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Development of scientific bases of architectural design of distributed data processing systems. Dr. eng. sci. diss.]. Moscow. 1996. 243 p. (in Russian).

**Интернет-ресурсы**

Kondrat'ev V.B. *Global'naya farmatsevticheskaya promyshlennost'* [The global pharmaceutical industry]. URL: [http://perspektivy.info/rus/ekob/globalnaja\\_farmatsevticheskaja\\_promyshlennost\\_2011-07-18.html](http://perspektivy.info/rus/ekob/globalnaja_farmatsevticheskaja_promyshlennost_2011-07-18.html) (accessed 23.06.2013) (in Russian).

**ГОСТы**

GOST 8.586.5–2005. *Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkosti i gazov s pomoshch'iu standartnykh suzhaiushchikh ustroystv* [State Standard 8.586.5 – 2005. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p.

**Патенты**

Nikolaev D.P., Postnikov V.V., Khanipov T.M., Usilin S.A., Grigoryev A.S. *Sposob avtomaticheskoi klassifikatsii transportnykh sredstv* [Method of automatic classification of vehicles]. Patent RF. No. 2280590. 2006.

Рукописи следует направлять по электронной почте на адрес [editor@sensorysystems.ru](mailto:editor@sensorysystems.ru) и дублировать на адрес [sensys-li@mail.ru](mailto:sensys-li@mail.ru).

С правилами для авторов можно также ознакомиться по адресу: [http://sensorysystems.ru/ru/article\\_submission.html](http://sensorysystems.ru/ru/article_submission.html)