

УДК 535.317.2

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-801-808

## КЛАССИФИКАЦИЯ ГИДРООБЪЕКТИВОВ И МЕТОД ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Р.В. Анитропов, И.Л. Лившиц, М.В. Новоселов

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация  
 Адрес для переписки: Mishaha17@gmail.com

### Информация о статье

Поступила в редакцию 19.06.19, принята к печати 24.07.19  
 Язык статьи — русский

**Ссылка для цитирования:** Анитропов Р.В., Лившиц И.Л., Новоселов М.В. Классификация гидрообъективов и метод их проектирования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 5. С. 801–808. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-801-808

### Аннотация

**Предмет исследования.** Рассмотрены гидрообъективы для исследования Мирового океана, в том числе его Арктической зоны. Вопросы проведения работ на небольших глубинах и шельфе считаются решенными, активно ведутся работы на средних глубинах — 300–500 м, поэтому наиболее актуальными становятся проекты, связанные с изучением больших глубин. Эти задачи являются комплексными и мультидисциплинарными и, безусловно, требуют больших научных, технических и финансовых вложений для их решений и способны обеспечить замещение дорогостоящей импортной техники. По степени сложности они не уступают вопросам освоения космического пространства. **Метод.** Максимум внимания уделяется проектированию специализированных оптических систем, обеспечивающих формирование, ввод и передачу визуальной информации от удаленных объектов, которую невозможно получить какими-либо другими способами. При проектировании таких систем важно понимать роль и назначение каждого элемента. Эти знания помогают разработчику найти оптимальное решение для выбора начальной точки оптической системы. В основу методов проектирования был положен опыт Университета ИТМО в разработке оптических схем гидрообъективов и их внедрении в отечественные проекты по освоению Мирового океана. Основной подход, применяемый при проектировании гидрообъективов, заключается в сочетании анализа известных решений, их классификации, рекомендаций оптиков-экспертов, специализирующихся в этой области, а также структурном и параметрическом синтезе с последующей автоматизированной коррекцией схем объективов. В последние годы активно применяется виртуальное прототипирование моделей гидрообъективов и их взаимодействие с внешней средой. **Основные результаты.** Основные результаты и их практическая значимость заключаются в разработке методики расчета гидрообъективов для глубоководных исследований и создании ряда гидрообъективов для решения научно-прикладных задач. В работе приведены схемы некоторых объективов. **Практическая значимость.** Разработанные гидрообъективы могут использоваться для решения различных научных и хозяйственных задач на больших глубинах Мирового океана, вплоть до максимальных.

### Ключевые слова

проектирование оптических систем, гидрообъектив, глубоководные объективы, защитные иллюминаторы, объективы с вынесенными входными зрачками, виртуальное прототипирование, аберрации

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-801-808

## CLASSIFICATION AND DESIGN OF HYDRO-LENSES

R.V. Anitropov, I.L. Livshits, M.V. Novoselov

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation  
 Corresponding author: Mishaha17@gmail.com

### Article info

Received 19.06.19, accepted 24.07.19  
 Article in Russian

**For citation:** Anitropov R.V., Livshits I.L., Novoselov M.V. Classification and design of hydro-lenses. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 801–808 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-801-808

### Abstract

**Subject of Research.** The paper considers hydro-lenses for the study of the World Ocean, including its Arctic zone. The issues of work at shallow depths and the shelf are regarded as having been resolved; the work is actively carried out at medium depths, 300–500 meters, therefore, the projects involving the study of deep water become the most relevant. These tasks are complex and multidisciplinary and, surely, require large scientific, technical and financial investments for their solutions and are able to ensure the replacement of expensive imported equipment. In terms of complexity, they are not inferior to the issues of space

exploration. **Method.** Maximum attention is paid to the design of specialized optical systems that provide the formation, input and transmission of visual information from distant objects, which cannot be obtained by any other means. It is important to understand the role and purpose of each element in the design of such systems. This knowledge helps the developer to find the optimal solution for selecting the starting point of the optical system. The design methods were based on the experience of ITMO University in the development of optical schemes for hydro-lenses and their implementation in national projects for the World Ocean exploration. The main approach used in the design of hydro-lenses involves combining the analysis of the known solutions, their classification, recommendations of opticians-experts skilled in the art, as well as structural and parametric synthesis with subsequent automated correction of lens circuits. In recent years, virtual prototyping of models of hydro-lenses and their interaction with the external environment has been actively used. **Main Results.** The main results and their practical significance consist in calculation procedure development for hydro-lenses intended for deep-sea exploration and the creation of a number of hydro-lenses for solving applied scientific problems. The paper presents diagrams of certain lenses. **Practical Relevance.** The developed hydro-lenses can be used to solve various scientific and economic problems at deep waters of the World Ocean, up to the maximum ones.

**Keywords**

optical system design, hydro-lens, deep-water lenses, protective domes, remote pupil lenses, virtual prototyping, aberrations

**Введение**

История разработки, производства и применения подводных объективов, которая начиналась и развивалась «на глазах» одного поколения, показывает переход от стандартных «воздушных» объективов к специализированным подводным оптическим системам. В середине прошлого века оптические системы начали активно применяться для подводных исследований, с тех пор в этой области было разработано множество различных схем. Разумное объяснение этого факта заключается в реальной ценности и актуальности подводных исследований для всего человечества, поскольку воды Мирового океана занимают 71 % площади поверхности Земного шара, а суша — лишь оставшиеся 29 %, поэтому необходимо обеспечить такие исследования современным оборудованием. Сначала для этих целей использовались уже существующие «воздушные» объективы. В водной среде они работали с уменьшенным угловым полем, появлялись дополнительные aberrации. Антология проектов по разработке подводных систем представлена в табл. 1, где глубоководные объективы выделены жирным шрифтом.

Одной из важнейших задач при проектировании гидрообъективов следует считать рассмотрение собственно объектива как одной из частей системы «осветитель-иллюминатор-объектив-приемник изображения», при этом, однако, именно объектив является определяющим элементом основных свойств этой общей системы.

Так, например, светопропускание системы «объектив-иллюминатор» определяет необходимую мощность осветителя и т. д. Диаметр и расположение апертурной диафрагмы объектива определяют необходимую толщину иллюминатора, что опять влияет на пропускание системы и соответственно на мощность осветителя, которая, в свою очередь, вызывает ряд технических проблем по реализации систем на больших глубинах, что несет за собой существенное удорожание технических решений. Список подобных взаимосвязей может быть продолжен, но уже очевидно, что расчет оптимального объектива является актуальной задачей.

Таблица 1. Антология проектов разработки подводных систем

Временной период, год	Содержание проекта		
до 1950	Применение «воздушных» объективов для подводных исследований	Защитные иллюминаторы	Системы освещения
1950–1970	«Воздушные» и подводные объективы для исследования шельфа	Проектирование иллюминаторов и систем освещения для необитаемых транспортных средств	
1970–1990	Разработка подводных объективов для применения на шельфе, на средних глубинах и больших глубинах Мирового океана	Проектирование иллюминаторов и систем освещения для необитаемых и обитаемых транспортных средств	
1990 – по настоящее время	Разработка подводных объективов для исследования больших глубин Мирового океана	Проектирование иллюминаторов и систем освещения для транспортных средств любого типа	

Анализ (табл. 1) показывает, что проектирование подводных объективов в составе специализированных подводных комплексов началось сразу же после Второй мировой войны практически одновременно с исследованием космоса, когда появилась потребность в создании более широкоугольных систем. Это не случайно, ведь технические требования к оптическим системам для подводной оптики так же высоки, как и требования для космической оптики. Советские исследователи заняли лидирующее положение в обоих направлениях [1]. В России подобные объективы разрабатывались группой исследователей под руководством профессора М.М. Русинова [2] и получили название «Гидроруссар» (табл. 2). Эти объективы широко использовались и продолжают работать в научных исследованиях и в настоящее время.

Таблица 2. Гидрообъективы Университета ИТМО, испытанные на исследовательских транспортных средствах Российской Академии наук

Название исследовательского судна	Используемые установки	Цели исследования	Год
«Академик М. Келдыш»	Гидроруссар 8, 19, 21, 23	Видеонаблюдение, мониторинг, подводные исследования	1975–1991
«Зодиак»	Гидроруссар 7, 8, 28, 31		
«Витязь»	Гидроруссар 8, 19, 21, 23, 28		
«Гидробиолог»	Гидроруссар 19, 21, 23, 25, 31		

В период «перестройки» работы в области проектирования подводных объектов были приостановлены, и необходимое оборудование закупалось у зарубежных производителей.

### Классификация подводных объектов

Классификация по глубинам погружения. В зависимости от глубин, на которых предполагается использование гидрообъективов, мы будем различать шельф-объективы, работающие на глубине до 300 м, объективы для средних глубин (300–500 м) и глубоководные объективы, для работы на глубине более 500 м. В табл. 3 представлена классификация объективов по глубине погружений и давлению, которое испытывают различные субъекты.

Таблица 3. Классификация объективов по глубине погружения

Класс объектива	Глубина, м	Давление, атм.	Субъект погружения
Для малых глубин	0–300	0–30	Дайверы, дроны, легкие водолазы, подводная лодка, подводные дома
Для средних глубин	300–500	30–50	Тяжелый водолаз, самоходный аппарат, буксируемый аппарат
Глубоководные	500–11000	50–1100	Батискаф, самоходные и буксируемые аппараты

Из табл. 3 видно, что давление изменяется по линейному закону и зависит от глубины погружения. Зная глубину, несложно рассчитать давление, оказываемое на гидрообъектив.

Классификация по назначению. Важным объектом классификации объективов является их назначение, поскольку оно влияет на параметры и сложность системы (табл. 4). Стоит отметить, что при поиске полезных ископаемых в подводной среде наибольший интерес представляют железо-марганцевые конкреции (ЖМК) — это конкреции с преобладанием в химическом составе железа и марганца, формирующиеся на дне озер и океанов.

Таблица 4. Классификация гидрообъективов по назначению

№	Класс объектива	Рекомендации к оптической схеме
1.	Мониторинговые	Необходимо большое угловое поле, рекомендуется $90^\circ$
2.	Поисковые	Рекомендуются объективы с переменным фокусным расстоянием
3.	Картирование	Необходимо исправление дисторсии, рекомендуемые угловые поля — $60^\circ$
4.	Охранные системы	Рекомендуются объективы с переменным фокусным расстоянием
5.	Универсального назначения	Наборы объективов или объективы с переменным фокусным расстоянием

Некоторые исследования показывают, что конкреции марганца залегают по всему Тихому океану на глубине, колеблющейся от 100 м на островных шельфах, к югу от Хонму, до 7000 м в Марианской впадине. Предполагают, что большая часть месторождений залегают на глубине от 3600 до 4500 м. Конкреции обнаруживаются также в северо-западной части Тихого океана на глубине от 4500 до 5400 м, на берегу США недалеко от зоны сбросов «Мендесино» между  $20$  и  $25^\circ$  северной широты на глубине больше, чем 3200 м [3].

Классификация по конструкции. Классификация гидрообъективов по конструкции основана на работах профессора М.М. Русинова и его учеников [2]. Самым важным и принципиальным различием с точки зрения конструкции подводного объектива является положение апертурной диафрагмы (АД), поскольку гидрообъективы являются в основном широкоугольными и их аберрации сильно зависят от положения диафрагмы в схеме. Теоретически существует три варианта положения апертурной диафрагмы в оптической схеме: перед оптической системой (ОС) (АД совпадает с входным зрачком объектива), внутри ОС, позади ОС (АД совпадает с выходным зрачком ОС). В работе [4] подробно рассмотрены два первых варианта и показано, что системы с вынесенным входным зрачком являются наиболее подходящими для глубоководных исследований, поскольку за счет уменьшения диаметра защитного иллюминатора толщина иллюминатора может быть уменьшена, а это в свою очередь увеличит пропускание оптической системы и снизит требо-

вания к мощности подводных осветителей. Системы с расположением АД внутри объектива, особенно при симметричной конструкции относительно АД, требуют увеличенного диаметра защитного иллюминатора. Такая оптическая система свободна от некоторых аберраций автоматически (кома, дисторсия, хроматизм увеличения) и может быть успешно использована при работе на малых и средних глубинах. Третий тип системы при совпадении АД с выходным зрачком гарантирует наиболее короткий продольный размер системы, при этом диаметр иллюминатора будет максимальным среди всех трех рассмотренных классов. Системы этого класса рекомендуют применять на малых глубинах.

### Метод проектирования специализированных объективов для глубоководных применений

Методы проектирования оптических систем различного назначения основаны на общих физических законах распространения света. Выделяют следующие этапы проектирования: анализ, выбор исходной оптической схемы, оптимизация параметров, принятие решения о пригодности оптической схемы, изготовление опытного образца, испытания. Особенностью проектирования объективов для подводных исследований является наличие некоторых дополнительных факторов, оказывающих существенное влияние на систему: давление воды, перепады температур, прозрачность водной среды, рассеяние света в среде, соленость и др. Поэтому при разработке подводных объективов разработчикам предстоит крайне нелегкая междисциплинарная задача по поиску оптимального решения. Разработчик должен знать физико-механические свойства водной среды, в которой будет использоваться оптическая система, чтобы правильно рассчитать защитный иллюминатор и водонепроницаемый корпус. Наши исследования посвящены прежде всего разработке подводных объективов, но мы также приведем необходимую информацию о защитных иллюминаторах.

Согласно основному физическому закону преломления света (закон Снеллиуса), луч преломляется на границе воздух-вода. Формула (1) описывает изменение угла поля зрения при переходе луча из одной среды в другую, а нашем случае из воздуха в воду:

$$n \sin \alpha = n' \sin \beta, \quad (1)$$

где  $n = 1$  — первая среда—воздух;  $n' = 1,33304$  — последний носитель (вода);  $\alpha$  — угол падения в воздухе;  $\beta$  — угол преломления в воде.

Так, например, несложно рассчитать угол поля зрения для «воздушного» объектива при использовании его в подводных условиях. Согласно формуле (1), угол уменьшится и составит  $22^\circ$ , в то время как на воздухе такой объектив будет обладать  $30^\circ$  полем зрения.

Как уже было сказано выше, оптимальной отправной точкой для создания глубоководного объектива является схема объектива с вынесенным входным зрачком, в которой диафрагма расположена перед оптической системой и совпадает с входным зрачком системы. Согласно теории профессора М.М. Русинова [2], впоследствии дополненной с.н.с. И.Л. Лившиц [1, 5], конструкция объектива начинается с выбора базового элемента. Первая поверхность базового элемента апланатическая, а вторая поверхность концентрическая относительно центра входного зрачка объектива (табл. 5). Далее в схему объектива последовательно добавляются остальные элементы.

Опираясь на теорию оптического проектирования [2, 6–8], при составлении технических требований (табл. 5), мы должны учитывать, что оптическая система должна иметь следующие функциональные элементы: базовый оптический элемент (первая поверхность — апланатическая, вторая — концентрическая относительно главного луча), оптический элемент для разработки поля (оба радиуса одинаковы и впоследствии станут параметром для оптимизации), коррекционные элементы (оба радиуса являются свободным параметром для оптимизации).

Все процедуры оптического проектирования и расчеты были выполнены с использованием программного обеспечения [9].

В табл. 6 представлен пример технической спецификации для проектирования глубоководных объективов [10].

При увеличении полевого угла аберрации главного луча быстро растут. Одной из самых больших проблем является коррекция астигматизма и кривизны поля. Некоторые идеи по решению данной проблемы представлены в [11].

Итак, в представленной выше схеме (табл. 5) мы используем в качестве начальной точки мениск Хоэса с одинаковыми радиусами, который имеет нулевую кривизну поля и небольшую положительную преломляющую силу, его устанавливаем перед основным элементом. Фокусное расстояние рассчитывается по формуле (2):

$$F' = \frac{(n-1)^2}{nr^2} d, \quad (2)$$

где  $F'$  — фокусное расстояние, мм;  $n$  — коэффициент преломления;  $d$  — толщина, мм;  $r$  — радиус, мм.

Таблица 5. Последовательность конструирования глубокоководных объективов с вынесенным входным зрачком

№	Название шага этапа	Промежуточная схема этапа
1	Выбор базового элемента. Основной элемент конструкции: первая поверхность апланатическая, вторая поверхность концентрическая относительно центра входного зрачка	
2	Добавление элемента для расширения углового поля	
3	Добавление элемента для коррекции монохроматических aberrаций	
4	Добавление элемента для коррекции хроматических aberrаций	

Таблица 6. Пример технической спецификации для глубокоководного объектива

Техническая характеристика	Значение
$J$ — диафрагменное число	F4,5
$W$ — угловое поле	90°
$F$ — фокусное расстояние	4,5 мм
$L$ — спектральный диапазон	0,486–0,652 нм
$Q$ — качество изображения	Геометрически ограничено
$S$ — задний фокальный отрезок	2 мм
$D$ — положение апертурной диафрагмы	Вынесена вперед

«Толстый» концентрический мениск с небольшой отрицательной преломляющей способностью и положительной кривизной поля: ( $r_2 = r_1 - d$ ). Кривизна поля рассчитывается формулой (3), а оптическая сила находится через формулу (4).

$$\frac{1}{R_{plz}} = \frac{(n-1)d}{nr_1(r_1-d)}, \tag{3}$$

где  $R_{plz}$  — кривизна поля.

$$D = \frac{1}{F'}, \tag{4}$$

где  $D$  — оптическая сила,  $F'$  — фокусное расстояние.

На последнем этапе мы исправляем хроматические aberrации, добавляя подходящее кремниевое стекло в качестве последнего компонента (рис. 1), технические характеристики приведены в табл. 6.

На рис. 1 мы представили одну из самых простых, но эффективных оптических систем для глубокоководных применений. С нашей точки зрения курс на дальнейшее развитие оптических систем для глубокоководного использования должен быть направлен в сторону проектирования зум-объективов с вынесенным входным зрачком и заменой некоторых сферических компонентов асферическими линзами [12, 13], чтобы минимизировать количество линз в объективе и максимально увеличить общее светопропускание системы.



Асферические элементы могут сильно исправить искажение системы, поскольку это единственный способ решения данной проблемы в схемах с вынесенным входным зрачком. По этой причине мы можем разработать линзы для глубокого подводного картографирования. Исследования подводных оптических систем находились на подъеме в России в 1970–1990-х годах.

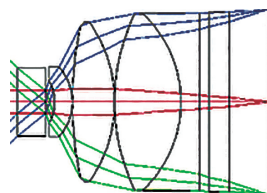


Рис 1. Окончательная схема проектируемого объектива для глубоководного применения

Другие глубоководные объективы с вынесенным входным зрачком представлены на рис. 2. Их конструкции незначительно отличаются по количеству компонентов в схеме, связанных со степенью аберрационной коррекции. Так, в конструкции на рис. 2, а достигается качество изображения, близкое к дифракционному пределу, в то время как объектив на рис. 2, б реализует геометрически ограниченное качество изображения. Соответственно эти объективы применяются с разными приемниками изображения.

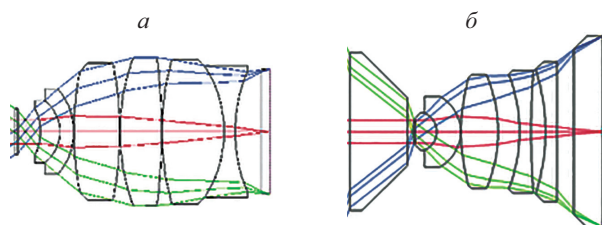


Рис. 2. Гидроруссар-31: FN3,  $2w = 70^\circ$ ,  $f' = 9,2$  мм (а), гидроруссар-28: FN4,  $2w = 90^\circ$ ,  $f' = 8$  мм (б)

### Защитные иллюминаторы

С самого начала эпохи разработок подводных объективов значение иллюминаторов было очевидным. Но сначала исследователи, такие как<sup>1</sup> [14, 15] не имели специально разработанных подводных объективов, поэтому в своих исследованиях им приходилось адаптировать «воздушные» объективы для применения их под водой. Объективы должны быть защищены от воды, по этой причине появилась вторая важная оптико-механическая задача — разработка защитных иллюминаторов. Последующей задачей являлось обеспечение подходящего освещения подводной сцены.

На рис. 3 показана подводная камера с тремя различными защитными иллюминаторами, их сравнение приведено в табл. 7.

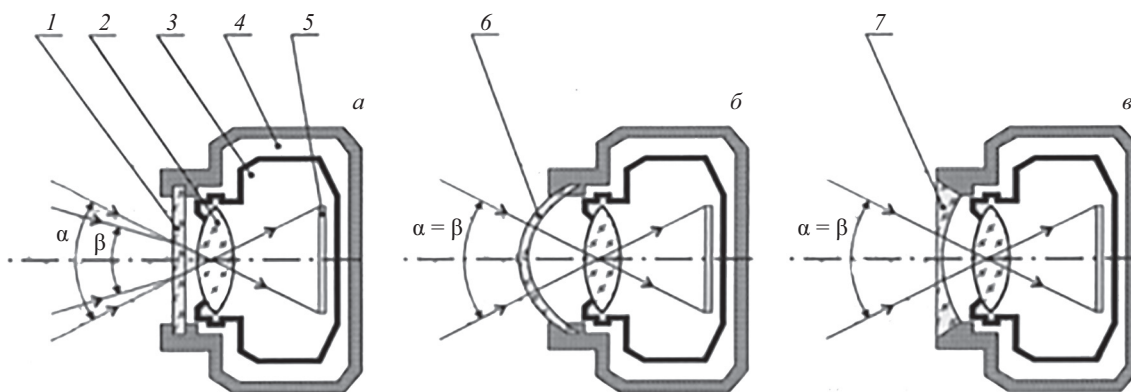


Рис. 3. Подводная камера с тремя разными защитными иллюминаторами: плоскопараллельный (а), концентрический (б), плосковогнутый (в).

1 — плоскопараллельный иллюминатор, 2 — объектив, 3 — оправа объектива, 4 — водонепроницаемый корпус, 5 — приемник изображения, 6 — концентрический иллюминатор, 7 — плоско-вогнутый иллюминатор.

$\alpha$  — угловое поле в воздухе;  $\beta$  — угловое поле в воде

<sup>1</sup> Mediana Aquarius Program [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://aquarius.fiu.edu/about/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 19.05.2019).

Таблица 7. Сравнение защитных иллюминаторов

Тип иллюминатора	Изменение углового поля	Изменение фокусного расстояния	Наличие аберраций	
			Дисторсия	Кривизна поля
Плоскопараллельный	Да	Нет	Да	Нет
Концентричный мениск	Нет	Да	Нет	Да, положительно
Плосковогнутый	Нет	Да	Да	Да, положительно

Выбор типа иллюминатора зависит от класса объектива, типа подводного устройства, глубины погружения. Минимальная толщина плоскопараллельного иллюминатора рассчитывается по формуле (5), подробно описано в [2]:

$$d_{\min} = 0,0215\sqrt[3]{PD^4}, \quad (5)$$

где  $P$  — наружное давление, кг/мм<sup>2</sup>;  $D$  — диаметр, мм.

На рис. 3, б видно, что для объектива с концентрическим иллюминатором характерно сохранение угла поля зрения, поскольку обе поверхности иллюминатора концентричны центру входного зрачка объектива, главные лучи в таком объективе идут по нормальям к поверхностям иллюминатора и не преломляются, независимо от среды, в которой они распространяются. Иллюминатор не вносит в систему некоторых аберраций (комы, астигматизма, дисторсии, хроматизма увеличения), имеет небольшую отрицательную оптическую силу, которая должна корректироваться за счет фокусировки основного объектива. Однако, согласно [2], мы рекомендуем использовать плоскопараллельную пластину в качестве защитного порта глубоководного аппарата, особенно когда объектив имеет конструкцию с вынесенным входным зрачком.

## Заключение

Основными результатами настоящего исследования являются предложенная классификация гидрообъективов и разработанный метод их проектирования. По предложенному методу, глубоководные гидрообъективы целесообразно рассчитывать по схеме с вынесенным входным зрачком. Указанный метод позволил рассчитать несколько конструкций гидрообъективов, которые были успешно использованы для проведения научных исследований. Перспективным направлением по развитию схем гидрообъективов является дальнейшее увеличение пропускания оптической системы за счет уменьшения количества элементов в схеме, которое достигается применением асферических поверхностей. Новым направлением в проектировании гидрообъективов является создание объективов с переменным фокусным расстоянием. Последней тенденцией развития в данной области является использование современных информационных технологий, в том числе экспертных систем проектирования объективов и виртуального прототипирования, что существенно упрощает и ускоряет достаточно длительный и затратный процесс проектирования.

## Литература

1. Бронштейн И.Г., Васильев В.Н., Лившиц И.Л., Сергеев М.Б. Опτικο-информационные системы для подводных исследований. СПб.: Редакционно-издательский отдел СПбГУ ИТМО, 2009. 147 с.
2. Русинов М.М. Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1989. 382 с.
3. Батурич Г.Н. Рудный потенциал океана // Природа. 2002. № 5 [Электронный ресурс]. URL: [http://vivovoco.astronet.ru/VV/JOURNAL/NATURE/05\\_02/OCEAN.HTM](http://vivovoco.astronet.ru/VV/JOURNAL/NATURE/05_02/OCEAN.HTM) (дата обращения: 27.08.19).
4. Livshits I., Dilworth D.C. Practical tutorial: A simple strategy to start a pinhole lens design // *Advanced Optical Technologies*. 2015. V. 4. N 5-6. P. 413–427. doi: 10.1515/aot-2015-0024
5. Livshits I.L., Vasilyev V.N. Q and A tutorial on optical design // *Advanced Optical Technologies*. 2013. V. 2. N 1. P. 31–39. doi: 10.1515/aot-2012-0077
6. Anitropova I.L. Formalizing the heuristic synthesis procedure in lens design // *OSA Proc. of the International Optical Design Conference*, Rochester, USA, June 1994.
7. Livshits I., Salnikov A. CAD based on developed algorithm and expert rules in proposed in automate lens // *Proc. 4th International Conference on Optics-Photonics Design & Fabrication, ODF'04*, Makuhari, Chiba, Japan, 12-15 July 2004.
8. Livshits I.L., Bronchtein I.G. Database of optical elements suitable for lens CAD // *Proc. 5th International Conference on Optics-Photonics Design & Fabrication, ODF'06*, Nara, Japan, December 2006.

## References

1. Bronshtein I.G., Vasil'ev V.N., Livshits I.L. *Optical-information systems for undersea research*. St. Petersburg, SPbGU ITMO, 2009, 147 p. (in Russian)
2. Rusinov M.M. *Composition of Optical Systems*. St. Petersburg, Mashinostroenie Publ., 1989, 382 p. (in Russian)
3. Baturin G.N. *The ore potential of the ocean*. Available at: [http://vivovoco.astronet.ru/VV/JOURNAL/NATURE/05\\_02/OCEAN.HTM](http://vivovoco.astronet.ru/VV/JOURNAL/NATURE/05_02/OCEAN.HTM) (accessed: 27.08.19). (in Russian)
4. Livshits I., Dilworth D.C. Practical tutorial: A simple strategy to start a pinhole lens design. *Advanced Optical Technologies*, 2015, vol. 4, no. 5-6, pp. 413–427. doi: 10.1515/aot-2015-0024
5. Livshits I.L., Vasilyev V.N. Q and A tutorial on optical design. *Advanced Optical Technologies*, 2013, vol. 2, no. 1, pp. 31–39. doi: 10.1515/aot-2012-0077
6. Anitropova I.L. Formalizing the heuristic synthesis procedure in lens design. *OSA Proc. of the International Optical Design Conference*, Rochester, USA, June 1994.
7. Livshits I., Salnikov A. CAD based on developed algorithm and expert rules in proposed in automate lens. *Proc. 4th International Conference on Optics-Photonics Design & Fabrication, ODF'04*, Makuhari, Chiba, Japan, 12-15 July 2004.
8. Livshits I.L., Bronchtein I.G. Database of optical elements suitable for lens CAD. *Proc. 5th International Conference on Optics-Photonics Design & Fabrication, ODF'06*, Nara, Japan, December 2006.
9. Anitropova I.L., Ivanov P.D., Russinov M.M. Underwater Pinhole Lens. *Patent USSR № 830275*, 1981. (in Russian)

9. Русинов М.М., Анитропова И.Л., Иванов П.Д. Гидрообъектив с вынесенным входным зрачком. Патент СССР № 830275. Бюл. 1981. № 18.
10. Zhang Y., Gross H. Systematic design of microscopic lenses // *Proceedings of SPIE*. 2017. V. 10590. P. 105901G. doi: 10.1117/12.2287633
11. Wilson R.H., Brost R.C., Strip D.R., Sudol R.J., Youngworth R.N., McLaughlin P.O. Considerations for tolerancing aspheric optical components // *Applied Optics*. 2004. V. 43. N 1. P. 57–66. doi: 10.1364/AO.43.000057
12. Lerner S.A., Sasian J.M. Optical design with parametrically defined aspheric surfaces // *Applied Optics*. 2000. V. 39. N 28. P. 5205–5213. doi: 10.1364/AO.39.005205
13. Prager E. *Chasing science at sea: racing hurricanes, stalking sharks, and living undersea with ocean experts*. Chicago, London: The University of Chicago Press, 2008. 162 p.
10. Zhang Y., Gross H. Systematic design of microscopic lenses. *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10590, pp. 105901G. doi: 10.1117/12.2287633
11. Wilson R.H., Brost R.C., Strip D.R., Sudol R.J., Youngworth R.N., McLaughlin P.O. Considerations for tolerancing aspheric optical components. *Applied Optics*, 2004, vol. 43, no. 1, pp. 57–66. doi: 10.1364/AO.43.000057
12. Lerner S.A., Sasian J.M. Optical design with parametrically defined aspheric surfaces. *Applied Optics*, 2000, vol. 39, no. 28, pp. 5205–5213. doi: 10.1364/AO.39.005205
13. Prager E. *Chasing Science at Sea: Racing Hurricanes, Stalking Sharks, and Living Undersea With Ocean Experts*. Chicago, London, The University of Chicago Press, 2008, 162 p.

**Авторы**

**Анитропов Роман Викторович** — ведущий программист, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-8031-3650, Romananitropov@gmail.com

**Лившиц Ирина Леонидовна** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 35077660000, ORCID ID: 0000-0002-3256-1481, ecenter-optical10@yandex.ru

**Новоселов Михаил Владимирович** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0003-4826-0955, Mishaha17@gmail.com

**Authors**

**Roman V. Anitropov** — Leading software engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-8031-3650, Romananitropov@gmail.com

**Irina L. Livshits** — PhD, Senior scientific researcher, Laboratory head, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 35077660000, ORCID ID: 0000-0002-3256-1481, ecenter-optical10@yandex.ru

**Mikhail V. Novoselov** — engineer, University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-4826-0955, Mishaha17@gmail.com