

## Памяти профессора Михаила Ароновича Голуба

М.Р. Дюпарре<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной оптики Университета Фридриха Шиллера, Fürstengraben 1, Йена, Германия, 07743

**Аннотация.** Кратко рассказывается о жизни и научной деятельности профессора Университета Тель-Авива (Израиль), доктора физико-математических наук, профессора Михаила Ароновича Голуба – известного специалиста в области дифракционной и микро-оптики, цифровой голографии - одного из тех ученых, чьи пионерские работы стали основой формирования нового научного направления - компьютерной оптики.

### 1. Введение

В декабре прошлого года из Израиля пришло печальное известие - умер замечательный ученый, специалист в области дифракционной компьютерной оптики и цифровой голографии, профессор Университета Тель-Авива (Израиль), доктор физико-математических наук, профессор Михаил Аронович Голуб.

### 2. Краткая биографическая справка

После окончания с золотой медалью средней школы в г. Куйбышеве (ныне - Самара) в 1972 году М.А. Голуб поступил в Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне - Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева), который окончил с отличием в 1978 году по специальности "прикладная математика", получив диплом "инженера-математика". Еще во время учебы в школе Михаил потерял отца, но эта ранняя смерть близкого человека не остановила его тягу к знаниям. Тщательную учебу (за успехи в учебе он получал Ленинскую стипендию) М.А. Голуб с первых курсов стал сочетать с научной работой под руководством декана факультета информатики доцента (ныне - академика РАН) Виктора Александровича Сойфера [1].

Закончив учебу М.А. Голуб распределился на работу в КуАИ, сначала инженером в научно-исследовательскую часть, потом преподавателем на кафедре технической кибернетики. В 1981 году в диссертационном совете Физического института им. П.Н. Лебедева АН СССР М.А. Голуб защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 "Физическая электроника, в том числе квантовая". Тема диссертации "Исследование характеристик и реализация когерентно-оптических пространственных фильтров, синтезируемых с помощью ЭВМ". Научные руководители – И.Н. Сисакян и В.А. Сойфер. В качестве преподавателя М.А. Голуб подготовил и стал читать ряд новых курсов, получил звание доцента. В 1985-1986 годах на кафедре технической кибернетики была сформирована программа специализации в области компьютерной оптики в

рамках подготовки инженеров-математиков, большой вклад в подготовку этой программы внес доцент М.А. Голуб. В 1989 году он перешел на работу в Куйбышевский филиал Центрального конструкторского бюро (ЦКБ) уникального приборостроения АН СССР начальником лаборатории дифракционной оптики, оставшись по совместительству доцентом кафедры технической кибернетики КуАИ. Его увлеченность, высочайшая квалификация и научный энтузиазм оказали неизгладимое влияние на других учеников В.А. Сойфера, работавших вместе с М.А. Голубом в эти годы, в частности, будущих докторов наук – А.В. Волкова, Л.Л. Досколовича, Н.Л. Казанского, С.В. Карпеева, В.С. Павельева, С.Б. Попова, С.И. Харитоновна, С.Н. Хонину, А.Г. Храмова.

21 декабря 1990 года в диссертационном совете ЦКБ уникального приборостроения АН СССР М.А. Голуб защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук на стыке специальностей 01.04.21 "Лазерная физика" и 01.04.01 "Техника физического эксперимента, физика приборов, автоматизация физических исследований". Тема диссертации "Селекция мод лазерных пучков методами компьютерной оптики". Научные консультанты – д.ф.-м.н. И.Н. Сисакян и д.т.н. В.А. Сойфер.

В 1992 году под руководством М.А. Голуба кандидатскую диссертацию на тему «Формирование микрорельефа фокусаторов на слоях жидких фотополимеризующихся композиций» защищает В.С. Соловьев.

В 1993 году М.А. Голуб получает звание профессора и совместно с В.А. Сойфером выигрывает грант американского издательства "CRC Press" на подготовку монографии, которая вышла в 1994 году [2] и является одной из первых монографических вершин цифровой голографии и компьютерной оптики.

Благодаря переходу на работу в учреждение академии наук и демократизации жизни в России у М.А. Голуба появляется возможность участия в зарубежных конференциях и стажировках за границей. С 1989 года М.А. Голуб стажировался в ведущих научных центрах Чехии, Германии, Франции. Активно поддерживая и развивая международные контакты, М.А. Голуб подружился со многими известными учеными, благодаря его знакомству с доктором Пьеро Перло Институт систем обработки изображений РАН, в который был в 1993 году преобразован Самарский филиал ЦКБ уникального приборостроения РАН, получил заказы Исследовательского Центра ФИАТ (г. Орбассано, Италия).

В 1995 году М.А. Голуб переезжает с семьей в Израиль, работает в инновационной компании Holo/Or Ltd, в Вейцмановском институте науки (Weizmann Institute of Science), в Университете Тель-Авива. Всю жизнь в центре его научных интересов остаются фундаментальные и прикладные проблемы дифракционной компьютерной оптики.



**Рисунок 1.** Доктор физико-математических наук, профессор М.А. Голуб (28 июля 1955 – 24 декабря 2019).

### 3. Научные результаты

В студенческие годы М.А. Голуб увлекся новым для научной группы В.А. Сойфера направлением исследований – цифровой голографией. Михаил изучал мировую научную литературу в этой области, рассчитывал и рисовал на принтерах и плоттерах шаблоны голограмм, которые потом фотографически уменьшал и исследовал. В это время бурно развивались методы Фурье-оптики, и весьма перспективным считалось направление, связанное с аналоговой обработкой оптических сигналов, в частности корреляционные методы распознавания на основе голографических фильтров Ван дер Люгта. Первой практической задачей для М.А. Голуба и В. А. Сойфера стало оптимальное представление случайных полей в базисе Карунена-Лоэва. При реализации базиса Карунена-Лоэва в виде оптических фильтров возникла проблема записи отрицательных значений функции пропускания, что закономерно привело к необходимости реализации этих фильтров голографическими методами. Благодаря связям Виктора Александровича М.А. Голуб получил возможность стажировок и консультаций у ведущих отечественных ученых, работающих в этой области – Е.С. Нежевенко (Институт автоматики и электрометрии СО АН СССР - ИАиЭ), Н.С. Мерзлякова (Институт проблем передачи информации АН СССР), И.Н. Сисакяна (Отделение А Физического института им. П.Н. Лебедева АН СССР) [3]. Интеллигентность, деликатность и увлеченность новыми научными проблемами позволили Михаилу Ароновичу установить со своими академическими коллегами прекрасные отношения. На тот момент необходимая оптомеханическая база в КуАИ находилась в процессе формирования, и первые результаты, опубликованные в работе [4], были получены в оптической лаборатории ИАиЭ по результатам расчетов масок фильтров в вычислительном центре КуАИ. В дальнейшем работы в области оптического распознавания с использованием разложения Карунена-Лоэва были продолжены М.А. Голубом в начале 90-х годов с участием С.Н. Хониной [5-6].

Но определяющим в дальнейшем развитии исследований и формировании нового научного направления стало сотрудничество с физиками, с Отделением А ФИАН, возглавляемым нобелевским лауреатом академиком А.М. Прохоровым, с научной группой Иосифа Нораировича Сисакяна [3]. По словам В.А. Сойфера "Физики оплодотворили наши эскизы по пространственным фильтрам, были поставлены совершенно новые задачи с глубоким физическим смыслом".

#### 3.1. Формирование волновых фронтов

Первый шаг, приведший к формированию нового научного направления "компьютерная оптика", был сделан М.А. Голубом, С.В. Карпеевым и В.А. Сойфером в сотрудничестве с учеными Отделения А ФИАНа А.М. Прохоровым, И.Н. Сисакяном и Е.С. Живописцевым в задаче контроля асферической оптики. Постановка задачи здесь была классическая с точки зрения цифровой голографии: создать оптический элемент, формирующий волновой фронт заданной формы. Предполагалось использование теневого метода контроля асферических зеркал вместо традиционного интерферометрического. При этом цифровая голограмма – компенсатор – была предназначена для корректировки динамического диапазона теневой картины. Результаты были опубликованы в 1980 году в авторитетном журнале "Доклады Академии Наук СССР" [7]. В дальнейшем изготовленный тогда компенсатор удалось использовать и в интерференционной системе [8]. Следует отметить, что разработанные при активном участии М.А. Голуба методы, в отличие от применявшихся в Государственном институте прикладной оптики (г. Казань) и несколько позже в ИАиЭ, позволяли делать и неосесимметричные элементы, пригодные для контроля внеосевых сегментов асферических зеркал [9-14]. Развивая это направление, М.А. Голуб, И.Н. Сисакян и В.А. Сойфер опубликовали статью [15], в которой рассчитали дуплет оптических элементов, позволяющих сформировать на волновом фронте заданной формы требуемое распределение интенсивности, т.е. объединить возможности дифракционных компенсаторов и фокусаторов лазерного излучения.

### *3.2. Фокусаторы лазерного излучения*

Настоящим научным прорывом можно считать создание фокусаторов лазерного излучения. Эти оптические элементы являются лицом, "атрибутом" делавшего тогда первые шаги научного направления.

Идея фокусатора возникла в связи с набиравшей тогда популярность темой управляемого термоядерного синтеза. Одной из фундаментальных проблем, которую предстояло решить, было управление формой области фокусировки лазерного излучения, воздействующего на плазму. Тогдашний раз подтвердился дар предвидения великого человека - академика А.М. Прохорова, который предложил осуществлять фокусировку лазерного излучения в заданные области пространства с помощью синтезированных на компьютере элементов, названных им фокусаторами. Следует отметить два принципиальных отличия задачи фокусировки от традиционных задач цифровой голографии. Во-первых, это трехмерность создаваемых распределений и, во-вторых, требовалось создать заданное распределение интенсивности чисто фазовым элементом, причем основным критерием качества фокусировки была энергетическая эффективность. М.А. Голуб принял активное участие в расчете и исследовании первых фокусаторов в продольный отрезок и в кольцо, он вместе с С.В. Карпеевым, В.А. Сойфером, В.В. Поповым, А.М. Прохоровым, И.Н. Сисакяном и др., автор пионерских работ [16-17], положивших начало формированию этого направления компьютерной оптики. В работах по созданию фокусаторов М.А. Голуб и его партнеры из КуАИ активно взаимодействовали и обменивались идеями с коллегами Иосифа Норайровича Сисакяна – В.А. Даниловым, В.В. Поповым, Е.В. Сисакян, Е.В. Курмышевым, Е.А. Отливанчиком и др. В последующих работах М.А. Голуб вместе со своими соавторами из Самары и Москвы развивал методы решения обратных задач теории дифракции для создания новых типов фокусаторов [18-26], осваивал новые методы формирования дифракционного микрорельефа [27-31], необходимые для повышения дифракционной эффективности фокусаторов и их практического использования [22, 25, 29-31]. На Рис. 2 представлены результаты фокусировки излучения CO<sub>2</sub>-лазера с помощью отражающих фокусаторов: Рис. 2а – фокусировка в отрезок, поперечный оптической оси; Рис. 2б – фокусировка в четыре точки; Рис. 2в – фокусировка в кольцо. На Рис. 3 представлена фотография отражающего фокусатора для CO<sub>2</sub>-лазера.

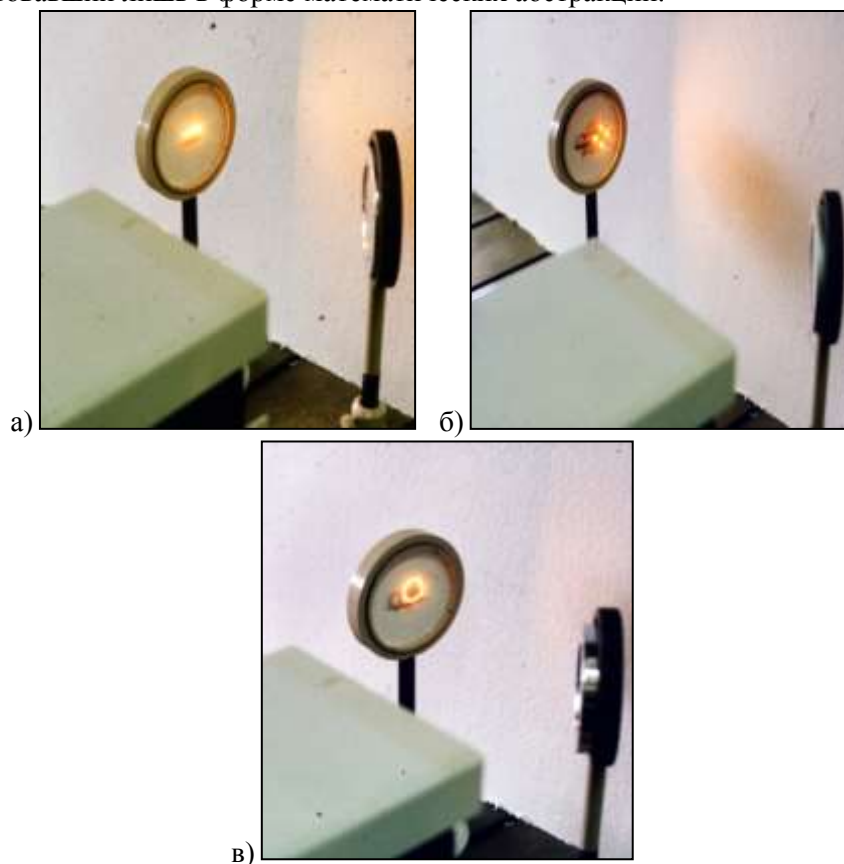
Большое внимание М.А. Голуб уделял патентованию новых оптических элементов [32-36]. Работая в Израиле М.А. Голуб в статье [37] вернулся к теме создания дифракционного оптического элемента (ДОЭ) с повышенной глубиной фокуса, как называют еще фокусатор в продольный отрезок, с которого начинались работы по фокусаторам.

К работам по фокусировке примыкают работы М.А. Голуба, связанные с созданием многофункциональных фазовых элементов [38-41] и оптической антенны [42]. В последующие годы эти работы были развиты М.А. Голубом для создания дифракционных делителей пучка [43] и дифракционных решеток с резонансными свойствами [44-46].

### *3.3. Управление поперечно-модовым составом лазерного излучения*

Окончательно о формировании нового научного направления можно говорить после появления пионерских статей М.А. Голуба, В.А. Сойфера, С.В. Карпеева и их коллег из Отделения А ФИАНа, посвященных анализу и формированию поперечно-модового состава лазерного излучения с помощью элементов компьютерной оптики [47-51]. Со стороны Отделения А ФИАНа в работах участвовали молодые сотрудники из группы И.Н. Сисакяна: С.Г. Кривошлыков, В.И. Аджалов, В.Н. Гаричев и др. В этих работах с помощью компьютера и фотопостроительной машины синтезировались цифровые голограммы-фильтры, согласованные с пространственными модами (Эрмита-Гаусса или Лагерра-Гаусса), которые использовались для формирования лазерных пучков с заданным модовым составом и для селекции мод, то есть для пространственного разделения мод. Были изготовлены пространственные фильтры, названные моданами, и проведены натурные эксперименты по измерению мощностей отдельных поперечных мод в волоконных световодах [47-51]. Следует отметить интересную аналогию с традиционной спектроскопией, сформулированную В.А. Сойфером. До изобретения призмы, разлагающей белый свет в спектр, понятие спектральных компонент, или

продольных мод, носило абстрактный характер и обрело конкретику лишь с появлением этого оптического элемента. С появлением моданов реальностью стал спектр поперечных мод, до этого существовавший лишь в форме математических абстракций.



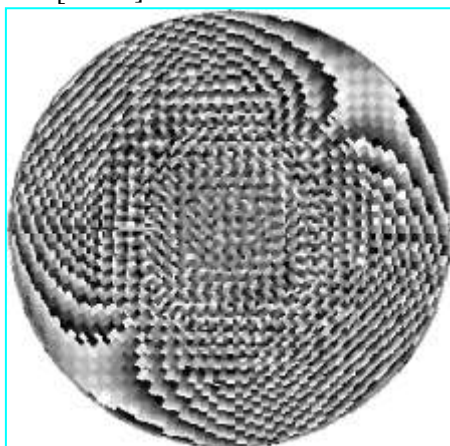
**Рисунок 2.** Распределение интенсивности излучения  $\text{CO}_2$ - лазера, сформированные фокусаторами: в поперечный отрезок (а), в четыре точки (б) и в кольцо (в).



**Рисунок 3.** Внешний вид отражающего фокусатора.

Методы цифровой голографии позволяют формировать различные моды в разных дифракционных порядках [52]. Рассчитанный М.А. Голубом и Н.Л. Казанским фотошаблон многопорядкового модана приведен на Рис. 4. М.А. Голубом совместно с И.Н. Сисакином и В.А. Сойфером были подготовлены подробные обзоры по теме моданов [53-54] и вместе с В.А. Сойфером опубликована монография [2]. В дальнейшем М.А. Голубом были предложены

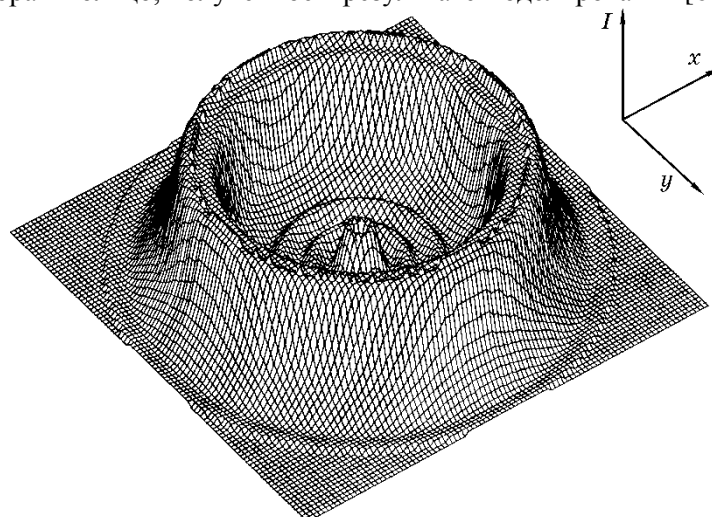
различные методы расчета моданов и разнообразные методы их использования [55-60], эта работа продолжалась и в Израиле [57-60].



**Рисунок 4.** Фотошаблон для многоканального модана.

#### 3.4. Моделирование в компьютерной оптике

Будучи по образованию прикладным математиком, М.А. Голуб остро ощущал проблемы и активно развивал решение задач, связанных с математическим моделированием в компьютерной оптике. Во-первых, это численные расчеты в рамках скалярной теории дифракции (в приближении Френеля-Кирхгофа) полей, создаваемых фокусаторами. На основе многофакторности и многовариантности таких вычислений, учитывающих различные аспекты технологий расчета и изготовления фокусаторов, М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян и В.А. Сойфер охарактеризовали такое моделирование как «вычислительный эксперимент» [61]. Перед изготовлением этим методом было исследовано множество фокусаторов [62-66]. На Рис. 5 представлено нарисованное на графопостроителе распределение интенсивности в фокальной плоскости фокусатора в кольцо, полученное в результате моделирования [61].



**Рисунок 5.** Расчетное распределение интенсивности в фокальной плоскости фокусатора в кольцо.

Много внимание М.А. Голуб уделял аналитическому исследованию влияния дискретизации и квантования фазовой функции, обусловленных технологией расчета и изготовления дифракционных оптических элементов, на их работу. Это касается и компенсаторов [11-12], и моданов [67-68], и фокусаторов [69]. Важным направлением работ являлось аналитическое исследование асимптотического поведения полей, формируемых фокусаторами с различными фазовыми функциями [69-73]. М.А. Голуб считал, что комплексы программ, предназначенные

для расчета ДОО [74-75], должны обязательно включать моделирующие подпрограммы. Важным аспектом моделирования является также анализ влияния различных методов кодирования ДОО [76-78].

Результаты, описанные выше, привели к признанию того факта, что в Советском Союзе сложилось новое научное направление, получившее название «компьютерная оптика». С 1986 года стали ежегодно проводиться рабочие совещания (локальные конференции) по компьютерной оптике. С 1987 года по инициативе академика Е.П. Велихова, академика А.М. Прохорова и профессора И.Н. Сисакяна стал издаваться международный научный сборник «Компьютерная оптика», с 2007 года ставший научным журналом. Сборник издавался под эгидой Совета экономической взаимопомощи (СЭВ) и переводился на английский язык издательством «Pergamon Press». Большой вклад в становление, развитие и завоевание этим сборником международного авторитета внесли статьи М.А. Голуба, в частности [6, 11, 20, 24, 29, 53, 55, 62, 63, 67, 71, 74, 76].

### *3.5. Биомедицинские и проекционные приложения*

М.А. Голуба и его российских коллег всегда интересовали возможные медицинские приложения компьютерной оптики [79]. Активному развитию этого направления в России мешала ведомственная разобщенность медицинских и академических ученых. С новой энергией М.А. Голуб занялся этим направлением исследований в Израиле [80-83]. Были получены патенты США на многофокальные хрусталики глаза [81] и контактные линзы [82], судя по высокому цитированию вызвавшие значительный интерес других изобретателей. К биомедицинским приложениям идеологически близки работы, связанные с изображающими и проекционными системами. Первая работа по дифракционному корректору аберраций [84] была выполнена М.А. Голубом вместе с И.Н. Сисакяном и В.А. Сойфером еще в 1988 году (переведена на английский язык в 1990 году). В Израиле М.А. Голуб опубликовал ряд статей и запатентовал новые конструкции [85-91] цифровых камер для спектральной визуализации объектов, компактных виртуальных проекционных дисплеев на голографических решетках, проекторов на основе ДОО для формирования структурированного освещения и др. Инновационный талант, блестящие инженерная и математическая подготовка позволили М.А. Голубу предложить, обосновать и запатентовать множество оригинальных технических решений [9, 14, 32-36, 79, 82, 83, 90, 91]. До самого последнего момента М.А. Голуб оставался активно работающим, творческим ученым, статья [92] вышла в журнале *Applied Optics* уже после его смерти, в 2020 году...

## **4. Наша дружба**

Мое первое знакомство с Михаилом Голубом датируется 1993 годом. Работая в Институте прикладной оптики Физического факультета Йенского Университета Фридриха Шиллера, Германия, я сосредоточил свои усилия на разработке и исследовании дифракционных элементов для формирования пучков CO<sub>2</sub>-лазеров. Коллега из оптической компании организовал мне визит в Институт систем обработки изображений РАН (директор проф. Виктор Сойфер, Самара, Россия), в связи с работой ученых этого Института над такими элементами. Так что я прибыл в Самару в январе 1993 года, на улице - минус 25 градусов. Я был представлен профессору Михаилу Ароновичу Голубу, чья основная деятельность была сосредоточена на теории и исследовании дифракционных оптических элементов, и который был хорошо известен по его публикациям. С самого начала мы оба чувствовали, что не только разделяем общие научные интересы, но и очень хорошо понимаем друг друга в социальном плане. Поэтому неудивительно, что мы встретились уже через несколько недель в Йене, затем летом 1993 года снова в Самаре. Наконец, в 1994 году Михаил организовал шестимесячный исследовательский визит в мою группу в Йене. Я с благодарностью вспоминаю часы, которые мы провели вместе в институте, размышляя над теоретическими и экспериментальными проблемами. После работы или в выходные дни я и моя жена часто наслаждались его компанией, путешествовали по Германии, бродили или катались на велосипедах по окрестностям Йены или просто сидели вместе за бокалом вина. Мы обменивались мнениями о

науке, политике и общих аспектах жизни в это очень волнующее время быстрых изменений, возможностей и вызовов. Наши отношения превратились в прочную и стабильную дружбу, которая будет длиться долгие годы. Мы также подружились с матерью Михаила, Фирой Моисеевной, сердечной пожилой женщиной, которая приехала вместе с ним в Йену. Вдохновленный достигнутыми (и опубликованными) научными результатами и радостью нашего сотрудничества, в 1995 году Михаил организовал дополнительный исследовательский срок в Йене, в котором принимающей стороной выступил Институт прикладной физики Йенского университета. Во время этого второго пребывания, помимо своей научной деятельности, он также читал лекции для аспирантов физического факультета по конкретным оптическим темам. Все коллеги, с которыми он работал, студенты, которых он учил, просто все, кого он встречал, высоко ценили его глубокие знания, преданность, смирение и здравый смысл. Никто не уходил после общения с ним с пустыми руками.

Позже в том же году Михаил вернулся в Самару, но Фира Моисеевна хотела жить рядом с дочерью, эмигрировавшей с семьей после Чернобыля из Киева в Израиль. Михаил, как заботливый и любящий сын и брат, решил уехать в Израиль вместе с мамой. В Реховоте, недалеко от Тель-Авива, он продолжал работать в области дифракционной оптики в компании Holo/Org, где вскоре стал главным научным сотрудником. В 1996 году я и моя жена посетили его, его жену Ариану и всю семью на пару недель и были рады видеть его довольным и счастливым. Даже если он скучал по русской зиме и, в частности, по катанию на коньках на Волге. (Спустя годы Реховот построил свой первый ледовый зал для катания на коньках, и сын Михаила Даниэль стал там активным посетителем.)

В последующие годы мы с Михаилом поддерживали постоянные контакты через взаимные визиты, встречи на конференциях, электронную почту и скайп. Проработав несколько лет в промышленности и получив должность приглашенного профессора в знаменитом институте Вейцмана, Михаил поступил в Тель-Авивский университет, чтобы продолжить и расширить свои исследования, а также снова вернуться к преподавательской работе посредством чтения лекций студентам, подготовке учебных пособий и руководства диссертационными работами. Его приглашенные доклады на различных международных конференциях получили широкое признание в оптическом сообществе, а также в его многочисленных публикациях, в том числе в известной книге Soifer / Golub "Laser Beam Mode Selection by Computer Generated Holograms" [2]. В сентябре 2019 года Михаил выступил с приглашенным докладом "Непараксиальный дизайн дифракционных оптических элементов и мета-поверхностей" на тематической конференции Европейского оптического сообщества в Йене. Мы встречались на конференции, а также дома, говорили о работе и нашей личной жизни, недавних поездках в отпуск и запланированных мероприятиях. Не было и мысли о том, что это была последняя возможность увидеться. В декабре стало шоком услышать, как его жена говорит по телефону, что он умер. По сей день это кажется каким-то нереальным. Я потерял очень дорогого друга, по которому буду скучать. С глубокой скорбью его оплакивают в Йене все знакомые коллеги.

## 5. Благодарность

Выражаю благодарность профессору Владимиру Сергеевичу Павельеву за помощь с материалами для данной статьи.

## 6. Литература

- [1] Sokolov, V.O. On the 70th birthday of corresponding member of the Russian Academy of Sciences Victor A. Soifer / V.O. Sokolov // CEUR Workshop Proceedings. – 2015. – Vol. 1490. – P. 1-8. DOI: 10.18287/1613-0073-2015-1490-1-8.
- [2] Soifer, V.A. Laser beam mode selection by computer generated holograms / V.A. Soifer, M.A. Golub – Boca Raton, USA: CRC Press, 1994.
- [3] Danilov, V.A. 20 years without Iosif Norairovich Sissakian / V.A. Danilov, N.I. Petrov // CEUR Workshop Proceedings. – 2016. – Vol. 1638. – P. 223-235.



- [4] Голуб, М.А. Исследование пространственных фильтров, синтезированных на ЭВМ / М.А. Голуб, С.В. Карпеев, Е.С. Нежевенко, В.А. Сойфер, В.И. Хоцкий // Вопросы кибернетики. – 1979. – № 62. – С. 56-63.
- [5] Soifer, V.A. Decorrelated features of images extracted with the aid of optical Karhunen-Loeve expansion / V.A. Soifer, M.A. Golub, S.N. Khonina // Pattern Recognition and Image Analysis. – 1993. – Vol. 3(3). – P. 289-295.
- [6] Голуб, М.А. Разложение Карунена-Лозва при экспоненциально-косинусной корреляционной функции / М.А. Голуб, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 1993. – № 13. – С. 49-53.
- [7] Голуб, М.А. Получение асферических волновых фронтов при помощи машинных голограмм / М.А. Голуб, Е.С. Живописцев, С.В. Карпеев, А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // Доклады Академии наук СССР. – 1980. – Т. 253, № 5. – С. 1104-1108.
- [8] Голуб, М.А. Экспериментальное исследование волновых фронтов, сформированных элементами компьютерной оптики / М.А. Голуб, С.В. Карпеев, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // Квантовая электроника – 1989. – Т. 16, № 12. – С. 2592-2593.
- [9] Голуб, М.А. Устройство для контроля оптических асферических поверхностей / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // Авторское свидетельство SU 1516767 A1, 23.10.1989. Заявка № 4145026 от 05.11.1986. Бюлл. изобретений. – 1989. – № 39.
- [10] Голуб, М.А. Синтез эталонов для контроля внеосевых сегментов асферических поверхностей / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // Оптика и спектроскопия. – 1990. – Т. 68, № 2. – С. 461-466.
- [11] Голуб, М.А. Формирование эталонных волновых фронтов элементами компьютерной оптики / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // Компьютерная оптика. – 1990. – № 7. – С. 3-26.
- [12] Golub, M.A. Wave Fronts Forming By Computer Generated Optical Elements / M.A. Golub, N.L. Kazanskiy, I.N. Sisakjan, V.A. Soifer // Proc. SPIE. – 1990. – Vol. 1183. – P. 727-750. DOI: 10.1117/12.963891.
- [13] Golub, M.A. Computer generated optical elements for optical testing / M.A. Golub, N.L. Kazanskiy, I.N. Sisakjan, V.A. Soifer // Proc. SPIE. – 1990. – Vol. 1319. – P. 635-636.
- [14] Голуб, М.А. Способ изготовления асферических зеркал / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // Авторское свидетельство SU 1675812 A1, 07.09.1991. Заявка № 4757534 от 24.07.1989. Бюлл. изобретений. – 1991. – № 33.
- [15] Golub, M.A. Computer generated optical elements in wavefront formation with intensity spatial modulation / M.A. Golub, I.N. Sisakjan, V.A. Soifer // Journal of Modern Optics. – 1991. – Vol. 38(6). – P. 1067-1072.
- [16] Голуб, М.А. Фокусировка когерентного излучения в заданную область пространства с помощью синтезированных на ЭВМ голограмм / М.А. Голуб, С.В. Карпеев, А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // Письма в ЖТФ. – 1981. – Т. 7, № 10. – С. 618-623.
- [17] Голуб, М.А. Машинный синтез фокусирующих элементов для CO<sub>2</sub>-лазера / М.А. Голуб, В.П. Дегтярева, А.Н. Климов, В.В. Попов, А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // Письма в ЖТФ. – 1982. – Т. 8, № 13. – С. 449-451.
- [18] Golub, M.A. Infra-red radiation focusators / M.A. Golub, I.N. Sisakian, V.A. Soifer // Optics and Lasers in Engineering. – 1991. – Vol. 15. – P. 297-309.
- [19] Голуб, М.А. Фокусаторы лазерного излучения ближнего ИК-диапазона / М.А. Голуб, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, И.В. Климов, В.А. Сойфер, Г.В. Успенцев, В.Б. Цветков, И.А. Щербаков // Письма в ЖТФ. – 1992. – Т. 18, № 15. – С. 39-41.
- [20] Голуб, М.А. Фокусировка лазерного излучения в прямолинейно-скругленные контура / М.А. Голуб, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 1992. – № 12. – С. 3-8.

- [21] Голуб, М.А. Дифракционные поправки при фокусировке лазерного излучения в отрезок / М.А. Голуб, Л.Л. Досколович, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер, С.И. Харитонов // Оптика и Спектроскопия. – 1992. – Т. 73, № 6. – С. 1069-1073.
- [22] Golub, M.A. Focusators at letters diffraction design / M.A. Golub, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, I.N. Sisakian, V.A. Soifer // Proceedings of SPIE. – 1991. – Vol. 1500. – P. 211-221.
- [23] Soifer, V.A. Diffractive micro-optical elements with non-point response / V.A. Soifer, M.A. Golub // Proceedings SPIE. – 1992. – Vol. 1751. – P. 140-154.
- [24] Голуб, М.А. Метод согласованных прямоугольников для расчета фокусаторов в плоскую область / М.А. Голуб, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 1992. – Вып. 10-11. – С. 100-110.
- [25] Doskolovich, L.L. Diffractive optical elements for laser processing / L.L. Doskolovich, M.A. Golub, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, G.V. Usplenjev // Proc. SPIE. – 1993. – Vol. 1983(2). – P. 647-648.
- [26] Golub, M.A. Iterative-phase method for diffractively levelling the gauss beam intensity / M.A. Golub, L.L. Doskolovich, V.V. Kotlyar, I.V. Nikolsky, V.A. Soifer // Компьютерная оптика. – 1993. – Вып. 13. – С. 30-33.
- [27] Голуб, М.А. Многоградационная линза Френеля / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер, Г.В. Успенъев, Д.М. Якуненкова // Журнал технической физики. – 1991. – Т. 61, № 4. – С. 195-197.
- [28] Golub, M.A. The technology of fabrication of focusators of IR laser's radiation / M.A. Golub, O.E. Rybakov, G.V. Usplenjev, A.V. Volkov, S.G. Volotovskiy // Optics & Laser Technology. – 1995. – Vol. 27(4). – P. 215-218.
- [29] Арефьев, Е.Ю. Экспериментальное исследование плоского оптического элемента, фокусирующего в кольцо / Е.Ю. Арефьев, В.А. Гилев, М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, С.В. Карпеев, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер, В.С. Соловьев, Д.Н. Тихонов, Г.В. Уваров // Компьютерная оптика. – 1989. – Вып. 5. – С. 49-54.
- [30] Duparre, M. Investigation of computer-generated diffractive beam shapers for flattening of single-modal CO<sub>2</sub> laser beams / M. Duparre, M.A. Golub, B. Ludge, V.S. Pavelyev, V.A. Soifer, G.V. Usplenjev, S.G. Volotovskii // Applied Optics. – 1995. – Vol. 34(14). – P. 2489-2497.
- [31] Golub, M.A. New diffractive beam shaper generated with the aid of e-beam lithography / M.A. Golub, M. Duparre // Optical Engineering. – 1996. – Vol. 35(5). – P. 1400-1406.
- [32] Прохоров, А.М. Способ фокусировки монохроматического излучения и устройство для его осуществления / А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян, М.А. Голуб, В.А. Сойфер, С.В. Карпеев // Авторское свидетельство SU 1302233 A1, 07.04.1987. Заявка № 3408156 от 09.03.1982.
- [33] Голуб, М.А. Оптическая система для расширения, коллимации и выравнивания интенсивности лазерного Гауссова пучка / М.А. Голуб, С.В. Карпеев, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // Авторское свидетельство SU 1561062 A1, 30.04.1990. Заявка № 4483214 от 06.06.1988.
- [34] Голуб, М.А. Устройство для фокусировки Гауссова пучка в прямоугольник с равномерным распределением интенсивности / М.А. Голуб, Л.Л. Досколович, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер, С.И. Харитонов, В.А. Данилов // Авторское свидетельство SU 1697042 A1, 07.12.1991. Заявка № 4795268 от 23.02.1990.
- [35] Голуб, М.А. Устройство для фокусировки оптического излучения в контур прямоугольника / М.А. Голуб, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер, С.И. Харитонов // Авторское свидетельство SU 1756848 A1, 23.08.1992. Заявка № 4739443 от 21.09.1989.
- [36] Голуб, М.А. Устройство для фокусировки монохроматического излучения / М.А. Голуб, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер, С.И. Харитонов // Патент на изобретение RU 2024897 C1, 15.12.1994. Заявка № 4927509/10 от 17.04.1991.
- [37] Golub, M.A. Extended focus diffractive optical element for Gaussian laser beams / M.A. Golub, V. Shurman, I. Grossinger // Applied Optics. – 2006. – Vol. 45(1). – P. 144-150.

- [38] Голуб, М.А. Дифракционный подход к синтезу многофункциональных фазовых элементов / М.А. Голуб, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.А. Сойфер, С.И. Харитонов // Оптика и спектроскопия. – 1992. – Т. 73, № 1. – С. 191-195.
- [39] Golub, M.A. Computer generated diffractive multi-focal lens / M.A. Golub, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // Journal of Modern Optics. – 1992. – Vol. 39(6). – P. 1245-1251. DOI: 10.1080/713823549.
- [40] Doskolovich, L.L. Special diffractive lenses / L.L. Doskolovich, M.A. Golub, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, G.V. Usplenjev // Proceedings of SPIE. – 1993. – Vol. 1780. – P. 393-402.
- [41] Soifer, V.A. Multifocal and combined diffractive elements / V.A. Soifer, L.L. Doskolovich, M.A. Golub, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, P. Perlo // Proceedings of SPIE. – 1993. – Vol. 1992. – P. 226-234.
- [42] Golub, M.A. Synthesis of optical antennae / M.A. Golub, N.L. Kazanskiy, A.M. Prokhorov, I.N. Sisakyan, V.A. Soifer // Computer Optics. – 1989. – Vol. 1(1). – P. 25-28.
- [43] Golub, M.A. Laser beam splitting by diffractive optics / M.A. Golub // Optics and Photonics News. – 2004. – Vol. 15(2). – P. 36-41.
- [44] Golub, M.A. Bragg properties of efficient surface relief gratings in the resonance domain / M.A. Golub, A.A. Friesem, L. Eisen // Optics Communications. – 2004. – Vol. 235(4-6). – P. 261-267.
- [45] Golub, M.A. Effective grating theory for resonance domain surface-relief diffraction gratings / M.A. Golub, A.A. Friesem // JOSA A. – 2005. – Vol. 22(6). – P. 1115-1126.
- [46] Axelrod, R. Shift-bonded resonance-domain diffraction gratings / R. Axelrod, Y. Shacham-Diamand, M. Golub // Applied Optics. – 2016. – Vol. 55(30). – P. 8606-8611.
- [47] Голуб, М.А. Синтез пространственных фильтров для исследования поперечно-модового состава когерентного излучения / М.А. Голуб, А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // Квантовая электроника. – 1982. – Т. 9, № 9. – С. 1866-1868
- [48] Голуб, М.А. Экспериментальное исследование пространственных фильтров, разделяющих поперечные моды оптических полей / М.А. Голуб, С.В. Карпеев, С.Г. Кривошлыков, А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // Квантовая электроника – 1983. – Т. 10, № 8. – С. 1700-1701.
- [49] Голуб, М.А. Экспериментальное исследование распределения мощности по поперечным модам в волоконном световоде с помощью пространственных фильтров / М.А. Голуб, С.В. Карпеев, С.Г. Кривошлыков, А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // Квантовая электроника. – 1984. – Т. 11, № 9. – С. 1869-1871.
- [50] Голуб, М.А. Фазовые пространственные фильтры, согласованные с поперечными модами / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер, С.В. Карпеев, А.В. Мирзов, Г.В. Уваров // Квантовая электроника. – 1988. – Т. 15, № 3. – С. 617-618.
- [51] Garitchev, V.P. Experimental investigation of mode coupling in a multimode graded-index fiber, caused by periodic microbends using computer-generated spatial filters / V.P. Garitchev, M.A. Golub, S.V. Karpeev, S.G. Krivoshlykov, N.I. Petrov, I.N. Sissakian, V.A. Soifer, W. Haubenreisser, J.-U. Jahn, R. Willsch // Optics Communication. – 1985. – Vol. 55(6). – P. 403-405. DOI: 10.1016/0030-4018(85)90140-3.
- [52] Аджалов, В.И. Многоканальные элементы компьютерной оптики, согласованные с группами мод / В.И. Аджалов, М.А. Голуб, С.В. Карпеев, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // Квантовая электроника. – 1990. – Т. 17, № 2. – С. 177-181.
- [53] Голуб, М.А. Моданы - новые элементы компьютерной оптики / М.А. Голуб, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // Компьютерная оптика. – 1990. – № 8. – С. 3-64.
- [54] Golub, M.A. Mode selection of laser radiation by computer-generated optical elements / M.A. Golub, I.N. Sisakyan, V.A. Soifer // Optics and Lasers in Engineering. – 1991. – Vol. 15(5). – P. 341-356.
- [55] Голуб, М.А. Построение итерационного алгоритма расчета фазовых дифракционных элементов, формирующих заданное одномодовое распределение, на основе применения метода обобщенных проекций / М.А. Голуб, В.С. Павельев, В.А. Сойфер // Компьютерная оптика. – 1995. – № 14-15(2). – С. 85-93.

- [56] Golub, M.A. Experimental investigation of a multibeam holographic optical element matched to Gauss-Laguerre modes / M.A. Golub, E.L. Kaganov, A.A. Kondorov, V.A. Soifer, G.V. Usplen'ev // *Quantum Electronics*. – 1996. – Vol. 26(2). – P. 184-186.
- [57] Golub, M.A. Mode-matched phase diffractive optical element for detecting laser modes with spiral phases / M.A. Golub, L. Shimshi, N. Davidson, A.A. Friesem // *Applied Optics*. – 2007. – Vol. 46(32). – P. 7823-7828.
- [58] Golub, M.A. Diffractive optical elements for mode-division multiplexing of temporal signals with the aid of Laguerre–Gaussian modes / M. Golub, S. Shwartz, S. Ruschin // *Applied Optics*. – 2013. – Vol. 52(12). – P. 2659-2669.
- [59] Shwartz, S. Excitation of mode groups in multimode fibers with the aid of diffractive optics / S. Shwartz, M.A. Golub, S. Ruschin // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2016. – Vol. 28(16). – P. 1763-1766.
- [60] Shwartz, S. Computer-generated holograms for fiber optical communication with spatial-division multiplexing / S. Shwartz, M.A. Golub, S. Ruschin // *Applied Optics*. – 2017. – Vol. 56(1). – P. A31-A40.
- [61] Голуб, М.А. Вычислительный эксперимент с элементами плоской оптики / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // *Автометрия*. – 1988. – № 1. – С. 70-82.
- [62] Голуб, М.А. Исследование фокусаторов в прямоугольнике методом вычислительного эксперимента / М.А. Голуб, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.А. Сойфер, С.И. Харитонов // *Компьютерная оптика*. – 1992. – № 10-11. – С. 110-122.
- [63] Голуб, М.А. Вычислительный эксперимент с фокусатором Гауссова пучка в прямоугольнике с постоянной интенсивностью / М.А. Голуб, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер, С.И. Харитонов // *Компьютерная оптика*. – 1990. – № 7. – С. 42-49.
- [64] Golub, M.A. Computational experiment for computer generated optical elements / M.A. Golub, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, N.G. Orlova, I.N. Sisakian, V.A. Soifer // *Proceedings of SPIE*. – 1991. – Vol. 1500. – P. 194-206.
- [65] Soifer, V.A. Diffraction investigation of focusators into straight-line segment / V.A. Soifer, L.L. Doskolovich, M.A. Golub, N.L. Kazanskiy // *Proc. SPIE*. – 1992. – Vol. 1718. – P. 33-44.
- [66] Doskolovich, L.L. Diffraction investigation of focusators into plane area / L.L. Doskolovich, M.A. Golub, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // *Proc. SPIE*. – 1993. – Vol. 1983(2). – P. 656-657.
- [67] Голуб, М.А. Дискретизация в эталонных модовых элементах компьютерной оптики / М.А. Голуб // *Компьютерная оптика*. – 1988. – Вып. 3. – С. 35-45.
- [68] Golub, M.A. Phase quantization and discretization in diffractive optics / M.A. Golub, I.N. Sisakian, V.A. Soifer // *Proc. SPIE*. – 1990. – Vol. 1334. – P. 188-199.
- [69] Голуб, М.А. Математическая модель фокусировки излучения элементами компьютерной оптики / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, В.А. Сойфер // *Научное приборостроение*. – 1993. – Т. 3, № 1. – С. 9-23.
- [70] Голуб, М.А. Дифракционный расчет оптического элемента, фокусирующего в кольцо / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер, С.И. Харитонов // *Автометрия*. – 1987. – № 6. – С. 8-15.
- [71] Голуб, М.А. Оценка дифракционного размытия фокальной линии геометрических фокусаторов / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер, С.И. Харитонов // *Компьютерная оптика*. – 1989. – № 5. – С. 34-38.
- [72] Голуб, М.А. Дифракционный расчет интенсивности поля вблизи фокальной линии фокусатора / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер, С.И. Харитонов // *Оптика и спектроскопия*. – 1989. – Т. 67, № 6. – С. 1387-1389.
- [73] Голуб, М.А. Применение методов псевдогеометрической оптики для расчета полей от дифракционных оптических элементов / М.А. Голуб, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.А. Сойфер, С.И. Харитонов // *Научное приборостроение*. – 1993. – Т. 3, № 1. – С. 38-46.

- [74] Голуб, М.А. Структура комплекса программ синтеза элементов компьютерной оптики / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, М.В. Шинкарев // Компьютерная оптика. – 1989. – Вып.5. – С. 43-48.
- [75] Doskolovich, L.L. Software on diffractive optics and computer generated holograms / L.L. Doskolovich, M.A. Golub, N.L. Kazanskiy, A.G. Khramov, V.S. Pavelyev, P.G. Seraphimovich, V.A. Soifer, S.G. Volotovskiy // Proc. SPIE. – 1995. – Vol. 2363. – P. 278-284. DOI: 10.1117/12.199645.
- [76] Голуб, М.А. Фазовое кодирование при итерационном расчете синтезированных голограмм на компьютере / М.А. Голуб, В.С. Павельев // Компьютерная оптика. – 1993. – № 13. – С. 34-38.
- [77] Golub, M.A. Phase coding in iterative synthesis of computer-generated holograms / M.A. Golub, V.S. Pavelyev // Optics and Laser Technology. – 1995. – Vol. 27(4). – P. 223-228.
- [78] Golub, M.A. Generalized conversion from the phase function to the blazed surface-relief profile of diffractive optical elements / M.A. Golub // JOSA A. – 1999. – Vol. 16(5). – P. 1194-1201.
- [79] Голуб, М.А. Устройство для изготовления оптических коррегирующих элементов / М.А. Голуб, В.А. Соيفер, И.Н. Сисакян, Ю.Д. Терехин // Патент на изобретение RU 2047205 C1, 27.10.1995. Заявка № 5068301/10 от 26.08.1992.
- [80] Golub, M.A. Diffractive optical elements for biomedical applications / M.A. Golub, I. Grossinger // Proceedings of SPIE. – 1999. – Vol. 3199. – P. 220-231.
- [81] Golub, M. Progressive multifocal lens construction for eyeglasses / M. Golub, I. Grossinger // US Patent. – 2001. – No. 6,325,510.
- [82] Grossinger, I. Simultaneous multifocal contact lens and method of utilizing same for treating visual disorders / I. Grossinger, M. Golub // US Patent. – 2002. – No. 6,364,483.
- [83] Allon, N. Integrated retinal imager and method / N. Allon, I. Grossinger, M. Golub, M. Brill // US Patent. – 2012. – No. 8,109,635.
- [84] Голуб, М.А. Элементы компьютерной оптики для коррекции aberrаций изображающих систем / М.А. Голуб, И.Н. Сисакян, В.А. Соифер // Компьютерная оптика. – 1988. – Вып. 3. – С. 3-7.
- [85] Eisen, L. Planar configuration for image projection / L. Eisen, M. Meyklyar, M. Golub, A.A. Friesem, I. Gurwich, V. Weiss // Applied Optics. – 2006. – Vol. 45(17). – P. 4005-4011.
- [86] Golub, M.A. Spectral multiplexing method for digital snapshot spectral imaging / M.A. Golub, M. Nathan, A. Averbuch, E. Lavi, V.A. Zheludev, A. Schclar // Applied Optics. – 2009. – Vol. 48(8). – P. 1520-1526.
- [87] Golub, M.A. Compressed sensing snapshot spectral imaging by a regular digital camera with an added optical diffuser / M.A. Golub, A. Averbuch, M. Nathan, V.A. Zheludev, J. Hauser, S. Gurevitch, R. Malinsky, A. Kagan // Applied Optics. – 2016. – Vol. 55(3). – P. 432-443.
- [88] Barlev, O. Multifunctional binary diffractive optical elements for structured light projectors / O. Barlev, M.A. Golub // Optics Express. – 2018. – Vol. 26(16). – P. 1092-21107.
- [89] Hauser, J. High-photon-throughput snapshot colour imaging using a monochromatic digital camera and a pupil-domain diffuser / J. Hauser, M.A. Golub, A. Averbuch, M. Nathan, V.A. Zheludev, O. Inbar, S. Gurevitch // Journal of Modern Optics. – 2019. – Vol. 66(7). – P. 710-725.
- [90] Golub, M. Snapshot spectral imaging systems and methods / M. Golub, M. Nathan, A. Averbuch // US Patent. – 2011. – No. 8,081,244.
- [91] Barlev, O. Structured light projector / O. Barlev, M. Golub // US Patent App. – 2019. – No. 16/275,479.
- [92] Hauser, J. Dual-camera snapshot spectral imaging with a pupil-domain optical diffuser and compressed sensing algorithm / J. Hauser, M.A. Golub, A. Averbuch, M. Nathan, V.A. Zheludev, M.S. Kagan // Applied Optics. – 2020. – Vol. 59(4). – P. 1058-1070.

## In memory of Professor Mikhail Aronovich Golub

**M.R. Duparree**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Applied Optics, Friedrich Schiller University, Fürstengraben 1, Jena, Germany,  
07743

**Abstract.** It briefly describes the life and scientific activity of a professor at the University of Tel Aviv (Israel), a doctor of physical and mathematical sciences, professor Mikhail Aronovich Golub, a well-known specialist in the field of diffraction and micro-optics, digital holography, one of those scientists whose pioneering work became the basis the formation of a new scientific direction - computer optics.