

Академик Басов, мощные лазеры и проблема противоракетной обороны

П.В.Зарубин

Дан обзор проведенной в СССР под научным руководством Н.Г.Басова в 1964–1978 гг. обширной программы новаторских исследований и разработок по мощным лазерам и лазерной локации. В ходе выполнения программы были созданы многие образцы высокоэнергетических лазеров с уникальными характеристиками, сформированы новые научные и конструкторские коллективы, расширена и развита лазерная производственная и испытательная база. В программе участвовали научные и конструкторские коллективы многих ведущих научно-исследовательских институтов и конструкторских бюро АН СССР и оборонных отраслей промышленности.

Ключевые слова: мощные лазеры, лазерные локаторы, противоракетная оборона.

1. Противоракетная оборона и лазеры. Принципиальные основы интереса к проблеме

В начале 60-х годов прошлого века, когда идея лазера – генератора мощного когерентного остронаправленного светового луча – стала обрывать в физических лабораториях «железом» технических решений, появились реальные возможности создания оптических квантовых генераторов с большой мощностью и энергией излучения (в те годы в у нас еще не был принят заимствованный из английского языка термин «лазер»). Непосредственный предшественник лазера – радиочастотный квантовый генератор (мазер) – был создан в середине 50-х годов практически одновременно и независимо американскими и советскими учеными (Ч.Таунс, Дж.Гордон и Г.Цайгер в США, Н.Г.Басов и А.М.Прохоров в СССР). Основоплагающие труды по квантовой электронике и мазерам Чарльза Таунса, Александра Прохорова и Николая Басова были удостоены Нобелевской премии в 1964 г. Появившиеся на основе экспериментальных и теоретических работ по мазерам идеи осуществления генерации в оптическом диапазоне высказывались в 1958 г. Ч.Таунсом и А.Шавловым (США) и А.М.Прохоровым и Н.Г.Басовым (СССР). С начала 60-х годов на специалистов обрушилась лавина сообщений по лазерной тематике: в каждом номере ведущих физических и инженерных журналов публиковались новые идеи, схемы и конструкции лазеров, предложения, расчеты, результаты экспериментов. В связи с этим стоит вспомнить слова М.В.Ломоносова: «Наука тем паче всего удивительна, что в простоте своей многохитростна, и от малого числа причин произносит неисчислимые образы свойств, перемен и явлений» [1]. Эта глубокая мысль хорошо иллюстрирует «взрыв» лазерных исследований, произошедший в первой половине 60-х годов. К работам по созданию лазеров приступили тысячи ученых в крупнейших лабораториях США, СССР, европейских стран, Японии и Китая. Сила

основной идеи – усиления стимулированного излучения большого числа частиц, атомов и молекул, помещенных в оптический резонатор, оказалась очень велика. Главным научным центром нашей страны, где выполнялись пионерские работы по квантовым генераторам и, в частности, по лазерам стал Физический институт им. П.Н.Лебедева АН СССР (ФИАН). Ученые ФИАНа, в первую очередь группы, которыми руководили А.М. Прохоров и Н.Г.Басов, в начале 60-х годов сосредоточили свои усилия на увеличении энергии и мощности лазерного излучения, а также на поиске новых типов лазеров. В институте царила атмосфера оптимизма и уверенности в возможности достижения высоких энергетических характеристик лазеров.

Запуск 15 мая 1960 г. первого лазера Т.Меймана в лаборатории американской фирмы Hughes привел к тому, что у многих ученых и военных в США и вскоре в СССР возникла мысль о возможности создания оружия, позволяющего поразить цель «испепеляющим» лучом. Конечно, первые лабораторные лазеры не обладали мощностью и энергией излучения, необходимыми для решения такой задачи. Понимание многих научно-технических проблем создания такого оружия пришло позже. Тем не менее достаточно быстро (в течение всего нескольких лет) исследователями были получены выдающиеся результаты по совершенствованию лазеров и повышению мощности их излучения, открывшие перспективы создания оружия на их основе, названного вскоре «лазерным оружием». В ряде развитых стран мира, в первую очередь в США и СССР, началась гонка, финиш которой, как надеялись, принесет победителю обладание оружием большой силы и дальности действия, позволяющим почти мгновенно поражать удаленную цель.

Проблемой особой важности в США и в СССР была (впрочем, и сейчас остается) противоракетная оборона (ПРО). Атмосфера, в которой зарождался проект использования лазеров в системе ПРО, определялась тем, что в 60-е годы и в СССР и в США создание систем ПРО рассматривалось как национальная стратегическая задача. В 1963 г. заместитель министра обороны СССР (впоследствии министр обороны) А.А.Гречко обратился к президенту АН СССР М.В.Келдышу с просьбой оце-

нить возможность военных применений лазеров. Тот, в свою очередь, запросил мнения ведущих физиков-лазерщиков из ФИАНа, в том числе Н.Г.Басова. В ответе АН СССР подчеркивался большой потенциал лазеров как для научных, так и для оборонных применений и предлагались новые направления работ по увеличению энергетики существовавших в то время лазеров и созданию лазеров новых типов.

Специалисты в области ПРО из ОКБ «Вымпел», главным конструктором и идейным руководителем которого в те годы был Г.В.Кисунько, уже осознали и оценили необходимость решения ряда коренных научно-технических проблем, связанных с возможностью создания и характеристиками систем ПРО [2]. Среди этих проблем первостепенное значение имело точное определение координат головных частей баллистических ракет (ГЧБР) для наведения на них с минимальным промахом противоракет, в которых вместо ядерных зарядов используются осколочные средства поражения. Отказ от ядерных зарядов в противоракетах облегчал условия работы системы ПРО, т. к. устранялись трудности, связанные с последствиями ядерного взрыва боевой части противоракеты для собственных радиолокаторов, не говоря уже о возможном воздействии таких взрывов над собственной территорией на наземные объекты и население [2]. Использование лазерных локаторов позволяло надеяться на получение высокой точности наведения противоракет при относительно небольших диаметрах оптических антенн (единицы метров и менее). Применение лазерного излучения вместо радиоволн, используемых радиолокаторами, открывало возможности:

- повышения точности локационных систем ПРО;
- селекции (распознавания) ГЧБР среди тысяч ложных целей и фрагментов ракеты;
- преодоления проблемы недостатка времени для решения задач «ближнего» перехвата ГЧБР в течение короткого интервала времени после ее вхождения в плотные слои атмосферы, когда вследствие торможения, нагрева и сгорания легких ложных целей они прекращают существование и соответствующие им сигналы уже не поступают на локаторы ПРО.

Фактором, вызвавшим интерес специалистов по ПРО к высокоэнергетическим лазерам, была скорость доставки лазерной энергии к цели, примерно в сто тысяч раз превышавшая скорость полета противоракеты. Это позволяло сэкономить драгоценные секунды, которых так не хватало разработчикам систем на этапе «ближнего» перехвата, когда, с одной стороны, в атмосфере уже сгорают ложные цели и ГЧБР легче обнаружить, а с другой – остаются считанные секунды до ее «прибытия».

В те годы система ПРО рассматривалась в первую очередь как система оружия наземного базирования, как система поражения ГЧБР на завершающем (терминальном) участке их полета при входе в плотные слои атмосферы. Проекты систем ПРО космического базирования, предназначенные для поражения ракет на начальном (стартовом) этапе выведения или на среднем участке траектории, получили развитие (но пока еще не реализацию) значительно позже, в 80-х годах, когда недостатки и ограничения систем ПРО наземного базирования стали более очевидными.

Отмечу, что уже тогда многим специалистам приходила в голову мысль о том, что создание системы ПРО для защиты больших территорий или страны в целом от

массированного ракетно-ядерного нападения – задача практически (технически и экономически) неразрешимая (по крайней мере, на существовавшем уровне техники). Но признать данный факт было трудно, да и твердые доказательства его отсутствовали, а последствия ошибки в оценке этого вопроса были бы катастрофическими для страны. Всегда оставались опасения, что какое-то новое научное открытие позволит вероятному противнику совершить прорыв и решить проблему. В этом случае государство осталось бы практически не защищенным от ракетно-ядерного удара, в то время как противник имел бы такую защиту. Поэтому всякая новая идея, направленная на решение проблемы ПРО, внимательно рассматривалась как военными, так и руководством военно-промышленного комплекса СССР. Таким же образом спустя двадцать лет в США родилась поддержанная некоторыми (далеко не всеми, правда) крупными учеными (обычно в этой связи говорят об Э.Теллере) и тогдашними руководителями государства (президентом Р.Рейганом) широкомасштабная программа стратегической оборонной инициативы (СОИ), направленная в первые годы ее существования на решение задачи создания глобальной системы ПРО для защиты территории страны от массированного удара баллистических ракет. Инициатор программы СОИ Э.Теллер в статье [3] писал: «В течение ряда лет ... проявлялся интерес к созданию лазерных систем, способных уничтожить баллистические ракеты. Эта идея всегда была очень привлекательной вследствие почти мгновенного времени распространения светового импульса от источника к цели».

Еще в 1962 г. специалисты ОКБ «Вымпел», головной организации СССР по созданию системы ПРО, обратились к возможности создания лазерного локатора для выполнения отдельных функций в системе ПРО, в частности высокоточного определения координат цели. На пути реализации этой идеи стояло много препятствий, связанных как с необходимостью создания лазеров, систем формирования и наведения лазерного излучения, оптических приемных устройств, теории и методов обработки лазерных локационных сигналов, так и с ограничениями, вызываемыми особенностями распространения лазерных сигналов в атмосфере.

Несколько позже при непосредственном участии Н.Г. Басова и его ближайшего сотрудника О.Н.Крохина начала изучаться возможность поражения ГЧБР лазерным лучом. Оценки показывали, что для этого потребуется создать лазеры с предельно высокой энергией излучения (на много порядков больше, чем в лазерном локаторе), поскольку ГЧБР – прочное устройство, рассчитанное на большие механические и тепловые нагрузки. Для решения задач в интересах ПРО были нужны лазеры с энергией в импульсе, превышающей достигнутую в 1963–1964 гг. энергию для лазерной локации в сотни раз, а для поражения ГЧБР – в десятки миллионов (!) раз. Какая же именно энергия лазерного луча необходима для поражения ГЧБР, было неясно. С самого начала в коллективе Н.Г.Басова понимали, что шансов на поражение ГЧБР тепловыми эффектами, вызываемыми нагревом лазерным излучением, мало. О.Н.Крохин предложил использовать для этой цели механический импульс отдачи, возникающий при быстром испарении внешнего слоя теплозащитной оболочки ГЧБР под воздействием лазерного излучения высокой интенсивности. Этот механизм требовал тщательного теоретического и эксперименталь-

ного изучения, однако сама принципиальная возможность такого способа поражения в те годы не вызывала сомнений.

Любое дело двигают вперед, особенно на начальном этапе, энтузиасты. А энтузиасты, как иногда говорят, это люди, во-первых, способные верить во что-то вопреки «разумным» доводам скептиков и, во-вторых, это люди, «разумным» доводам которых окружающие их скептики все равно не верят. Такие энтузиасты нашлись как среди конструкторов системы ПРО, так и среди ученых. Энтузиастом и движущей силой проекта создания мощных лазеров был, конечно, Н.Г.Басов. В 1964–1965 гг. удалось убедить военно-промышленное руководство страны, в первую очередь Д.Ф.Устинова, а также ряд других государственных и военных руководителей в том, что эту проблему, в принципе, можно решить. Надо сказать, что Д.Ф.Устинов, будучи по образованию инженером, глубоко понимал решающую роль науки в развитии военной техники, был доступен для крупных ученых и конструкторов и с интересом поддерживал новые проекты, обещавшие прогресс в военной технике. Авторитет его в вопросах оборонной техники, науки и промышленности был колоссальным, а мнение – почти всегда решающим.

2. Начало работ в области лазерных систем для ПРО (1964–1968 годы)

В 1962 г. в СССР была утверждена первая государственная программа исследований по известным в то время направлениям лазерной науки и техники. Она не была непосредственно привязана к возможным военным применениям лазеров и предусматривала создание лазеров различных типов (на кристаллах, стеклах, газах, полупроводниках). Предусматривались и работы по таким лазерам, которые при внимательном рассмотрении оказались впоследствии несостоятельными, например по лазерам на водороде (имелось в виду создание лазера на переходах орто- и параводорода). Наряду с ведущим институтом АН СССР ФИАНом, возглавлявшимся в те годы Д.В.Скобельцыным, где лазерной тематикой руководили А.М.Прохоров и Н.Г.Басов, к выполнению работ по лазерам подключились коллективы многих других научно-исследовательских институтов, конструкторских бюро и высших учебных заведений. В первую очередь надо назвать Государственный оптический институт (ГОИ) им. С.И.Вавилова в Ленинграде (отделы М.П.Ванюкова, А.М.Бонч-Бруевича), оборонный Научно-исследовательский институт прикладной физики (научный руководитель Л.Н.Курбатов) в Москве, Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова (МГУ, физический факультет, Р.В.Хохлов и С.А.Ахманов), научно-исследовательские институты атомной и электронной промышленности. Число научных и промышленных организаций, а также высших учебных заведений, занявшихся исследованиями и созданием лазеров, нарастало лавинообразно и уже к середине 60-х годов, вероятно, достигало в СССР сотни. Как и в других областях новой техники и технологии, военные проявляли значительный интерес к оборонным применениям лазеров, поддерживая и финансируя значительную часть работ ученых за счет оборонных статей бюджета.

Работы по лазерным системам для ПРО развивались с 1964 г. в двух направлениях: лазерная локация (включая проблему селекции целей) и лазерное поражение ГЧБР.

2.1. Создание лазерного локатора ЛЭ-1

Для лазерной локации особый интерес представлял новый в те годы режим гигантского импульса (позже названный режимом модуляции добротности) для генерации коротких и очень мощных импульсов лазерного излучения, впервые предложенный в США и во Франции. Создание лазеров с модулированной добротностью, излучавших импульсы наносекундной длительности, позволило приступить к оценке возможности их использования в импульсных высокоточных лазерных локаторах для ПРО. Молодые теоретики ОКБ «Вымпел» (В.Г.Репин, А.А.Курикса, П.А.Бакут и др.) из отдела Н.А.Лившица под руководством Г.П.Тартаковского активно занялись еще в 1962 г. анализом лазерных систем локации и оценкой их возможностей и особенностей, вытекающих из свойств лазерного излучения. Почти одновременно в отделе 56 ОКБ «Вымпел», возглавляемом энергичным инженером О.А.Ушаковым, начались экспериментальные работы по лазерам. В этом отделе работала группа молодых инженеров (В.Ф.Морсков, В.Н.Ломакин, Н.П.Куксенко, Ю.П.Шилохвост и др.), впоследствии ставших ядром разработчиков лазерных систем для ПРО. Лазерной лабораторией отдела руководил Н.Д.Устинов (сын фактического руководителя военно-промышленного комплекса СССР Д.Ф.Устинова). Он сам не был крупным специалистом, а являлся, скорее, влиятельной фигурой, участие которой объективно способствовало развитию лазерного направления в ОКБ «Вымпел». Основной движущей силой были научные достижения ФИАНа, в частности группы Н.Г.Басова. Работы по применению лазеров в ОКБ «Вымпел» велись в постоянном контакте с Н.Г.Басовым и его сотрудниками и в значительной мере по их инициативе. Это сотрудничество родилось еще раньше в ходе работ по применению лазеров как малошумящих усилителей слабых сигналов в приемных трактах радиолокаторов системы ПРО.

В результате проведенных в ОКБ «Вымпел» исследований, опиравшихся в отношении самих лазеров на работы и прогнозы группы Н.Г.Басова, в начале 1963 г. в Военно-промышленную комиссию (ВПК, орган государственного управления военно-промышленным комплексом СССР) был представлен проект создания экспериментального лазерного локатора для ПРО, получившего условное название ЛЭ-1 [4]. Проект основывался на работах ФИАНа по исследованиям и созданию лазеров на рубине. Первоначально предполагалось построить локатор на основе рубинового лазера со средней мощностью излучения порядка 1 кВт при импульсной мощности десятки мегаватт в режиме гигантского импульса. Надо подчеркнуть, что высокая степень оптимизма при определении ожидаемых параметров лазеров была свойственна не только Н.Г.Басову, но и многим другим советским ученым и конструкторам, в особенности на ранних этапах становления лазерной техники. Многие оптимистические прогнозы впоследствии не оправдались в полной мере, но такой подход, конечно, способствовал быстрому и энергичному развитию лазерных работ и, естественно, их финансированию государством.

Решение о создании на Балхашском противоракетном полигоне высокоточного экспериментального локатора ЛЭ-1 для определения координат ГЧБР на дальностях до 400 км было утверждено в сентябре 1963 г. Предполагалось достичь высокого пространственного и углового разрешения локатора (единицы метров и угловых

секунд) для того, чтобы «разглядеть» отдельные элементы сложной цели, например боеголовки, окруженной фрагментами ракеты и ложными целями, что должно было, по замыслу разработчиков, в известной мере решить проблему селекции настоящей боеголовки на фоне ложных целей. Научное руководство работами по созданию лазеров для ЛЭ-1 возлагалось на ФИАН (лабораторию Н.Г.Басова). Предусматривалась также программа исследований распространения лазерного излучения в атмосфере. Эти работы тогда возглавил Институт физики атмосферы (ИФА) АН СССР под руководством академика А.М.Обухова. Работы ряда ученых этого института носили фундаментальный характер и получили мировое признание. В конце 60-х годов, когда на Балхашском полигоне строился ЛЭ-1, рядом с этим локатором был создан также специальный измерительный комплекс для контроля и изучения состояния атмосферы и прохождения через нее лазерного излучения. В этой работе большую роль сыграли ученые из томского Института оптики атмосферы (ИОА) СО АН СССР под руководством академика В.Е.Зуева.

В 1964–1965 гг. проект ЛЭ-1 разрабатывался и конкретизировался специалистами ОКБ «Вымпел» (лаборатория Г.Е.Тихомирова в подразделении, возглавлявшемся О.А.Ушаковым). Работы по оптическим системам локатора велись в ГОИ в лаборатории П.П.Захарова, где совместно с инженерами ОКБ «Вымпел» создавалась оптическая схема локатора. Локатор должен был осуществлять за короткое время поиск целей в «поле ошибок» радиолокаторов, обеспечивавших целеуказание лазерному локатору, что требовало весьма высоких по тем временам средних мощностей лазерного излучателя. Выбор структуры локатора определило реальное состояние работ по лазерам на рубине, достижимые параметры которых на практике оказались значительно ниже первоначально предполагавшихся: средняя мощность одного лазера вместо ожидавшихся 1000 Вт составила в те годы примерно 10 Вт. Опыты, проведенные П.Г.Крюковым и другими исследователями в лаборатории Н.Г.Басова в ФИАНе, показали, что наращивание мощности путем последовательного усиления лазерного сигнала в цепочке (каскаде) лазерных усилителей, как это предусматривалось сначала, возможно лишь до определенного уровня. Слишком мощное излучение разрушало сами лазерные кристаллы. Возникли и трудности, связанные с термооптическими искажениями излучения. В связи с этим пришлось установить в локаторе не один, а 192 поочередно работающих с частотой 10 Гц лазеров с энергией в импульсе 1 Дж. Общая средняя мощность излучения многоканального лазерного передатчика локатора была около 2 кВт. Это привело к значительному усложнению его схемы, которая была многолучевой как при излучении, так и при регистрации сигнала. Потребовалось создать высокоточные быстродействующие оптические устройства для формирования, переключения и наведения 192 лазерных лучей, определявших поле поиска в пространстве цели. В приемном устройстве локатора использовалась матрица из 192 специально разработанных ФЭУ [4].

Задачу усложняли погрешности, связанные с крупногабаритными подвижными оптико-механическими системами телескопа и оптико-механическими переключателями локатора, а также с искажениями, вносимыми атмосферой. Достаточно сказать, что общая длина оптического тракта локатора достигала 70 м и в его состав

входили многие сотни оптических элементов – линз, зеркал и пластин, в том числе движущихся, взаимная юстировка которых должна была сохраняться с высочайшей точностью.

Поскольку специалисты ОКБ «Вымпел» не имели опыта и технологической базы в области оптического приборостроения, к проектированию и изготовлению лазеров и других узлов оптического тракта ЛЭ-1 они привлекли одно из мощных конструкторских бюро оптической промышленности – московское ЦКБ «Геофизика», где эти работы возглавил талантливый ученый и конструктор Д.М.Хорол. Специальный высокодинамичный телескоп диаметром 1.2 м для формирования и наведения лазерного луча создавался в конструкторском бюро Б.Я.Гутникова Ленинградского оптико-механического объединения (ЛОМО) в подразделении известного конструктора телескопов Б.К.Иоаннессиани, руководившего в те годы созданием крупнейшего в мире астрономического телескопа БТА с диаметром зеркала 6 м. К 1966 г., когда стало ясно, что создание ЛЭ-1 потребует усилий не только ученых, но и промышленности, в первую очередь оптической и электронной, возникла необходимость разработки и освоения в серийном производстве множества новых устройств, технологий и материалов: кристаллов рубина высокого качества, электрооптических кристаллов для затворов, управляющих формой импульса лазера, специальных ламп накачки для лазеров, высокочувствительных фотоприемников и многого другого. Все эти факторы привели к тому, что локатор был построен и начал функционировать только в середине 70-х годов.

С организацией ЦКБ «Луч» и переводом лазерной тематики в Министерство оборонной промышленности работы по локатору ЛЭ-1 ускорились и стали на реальную основу. К его созданию были привлечены дополнительные силы ряда предприятий оптической отрасли. В 1970–1971 гг. разработка локатора была завершена. Силами ЛОМО и ленинградского завода «Большевик» (где директором в предвоенные годы недолго был Д.Ф.Устинов) создавался уникальный по комплексу параметров телескоп ТГ1 для ЛЭ-1. Этот телескоп с диаметром главного зеркала 1.3 м обеспечивал высокое оптическое качество лазерного луча при работе со скоростями и ускорениями в сотни раз более высокими, чем у классических астрономических телескопов. Были созданы многие новые узлы локатора: быстродействующие точные сканирующие и переключающие системы для управления лазерным лучом, фотоприемники, электронные блоки обработки сигналов и синхронизации и другие устройства. Разработанный ЦКБ «Геофизика» лазерный передатчик, включал 192 весьма совершенных по тому времени лазеров, систему их охлаждения и электропитания. Для ЛЭ-1 было организовано производство высококачественных лазерных кристаллов рубина, нелинейных кристаллов KDP и многих других элементов.

Аппаратура локатора работала автоматически с управлением от компьютеров, правда, не очень совершенных. Локатор соединялся цифровыми линиями связи с радиолокационными средствами полигона. С 1973 г. на полигоне развернулись монтажные и наладочные работы. Десятки, а временами и сотни сотрудников ЦКБ «Луч», ЛОМО, ЦКБ «Геофизика», монтажных и наладочных организаций трудились на площадке локатора, стремясь «оживить» и заставить слаженно функционировать его системы.



Рис. 1. Научный руководитель лазерной программы Н.Г.Басов, министр обороны СССР А.А.Гречко, министр оборонной промышленности С.А.Зверев, военачальники, ученые, конструкторы и испытатели у лазерного локатора ЛЭ-1.

Работы на ЛЭ-1 велись при интенсивной поддержке и неослабном внимании руководства военно-промышленного комплекса страны. Строящийся локатор часто посещали «высокие» гости из руководства ВПК и Министерства обороны СССР. В мае 1973 г. локатор ЛЭ-1, наряду с рядом других объектов Балхашского полигона, посетило руководство Министерства обороны СССР во главе с тогдашним министром обороны А.А.Гречко. В состав группы входили почти все заместители министра обороны СССР, главнокомандующие родами войск, включая главнокомандующего войсками ПВО страны П.Ф.Батицкого, министр оборонной промышленности С.А.Зверев, один из руководителей ВПК Л.И.Горшков. Присутствовали также научный руководитель лазерных исследований и разработок в интересах ПРО Н.Г.Басов и другие ученые. О состоянии дел по локатору докладывал Н.Д.Устинов и конструкторы-разработчики отдельных устройств локатора. В целом маршал А.А.Гречко не проявил особого интереса к подробностям и деталям проекта. Его больше волновали проблемы возможного применения и эффективности лазерного локатора. Он настаивал на форсировании программы его испытаний.

В 1974 г. наладочные работы на локаторе были завершены и начались его поэтапные испытания при участии военных специалистов полигона и инженеров всех предприятий-разработчиков. Первые испытания проводились по установленным на вышках измерительным мишеням, позволявшим проконтролировать характеристики излучения локатора, затем по специально оборудованному оптическими датчиками и светоотражателями самолету-мишени. Его пилоты пользовались очками для защиты глаз от возможного воздействия лазерного излучения. Испытания сопровождалась измерениями характеристик атмосферы и связанных с ними погрешностей в работе локатора, которые выполнялись учеными из ИОА.

Разумеется, в ходе испытаний ЛЭ-1 неоднократно выявлялись технические и организационные проблемы, требовавшие доработок и даже переделок устройств локатора. Временами возникали весьма «специфические» трудности: например, несколько месяцев обсуждалась организация работ по обслуживанию системы охлаждения лазерного передатчика, которая требовала для своей

заправки около 10 т особо чистой спиртоводной смеси. Сохранить этот, как его называли, «портвейн» и уберечь систему от «утечек» было непросто.

В 1975 г. была достигнута более или менее уверенная работа локатора по самолету на дальностях около 100 км. Разработчики приступили к испытаниям локатора по ГЧБР, а также искусственным спутникам Земли. Спутники-мишени были оснащены световыми «маяками», измерительными приемниками лазерных сигналов, оптическими отражателями. Испытания позволили получить надежные экспериментальные данные по всем важнейшим параметрам ЛЭ-1 и в целом подтвердили его работоспособность и достижение большинства заданных характеристик. Однако локатор, естественно, не обеспечивал работу в условиях облачности, поэтому его непосредственное использование в системе ПРО было невозможным. Тем не менее ЛЭ-1 представлял собой точное и оперативное средство для внешнетраекторных измерений в интересах ряда систем оборонного значения, включая ПРО. В 1980 г. постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР локатор ЛЭ-1 по результатам испытаний был принят как средство для точных траекторных измерений на Балхашском полигоне. С помощью ЛЭ-1 впоследствии велись локационные траекторные измерения орбит ряда советских и зарубежных спутников и космических кораблей. При этом предпринимались меры предосторожности, чтобы сигналы (хотя и относительно небольшой мощности) лазерного локатора не нанесли какого-либо ущерба функционированию чувствительной аппаратуры, размещенной на космических аппаратах. Вопреки утверждениям, встречавшимся в иностранной печати, работы локатора по пилотируемым космическим аппаратам и станциям, как по советским, так и по американским, были весьма ограничены и практически запрещены.

Локатор ЛЭ-1 позволил собрать информацию об отражательных характеристиках («сигнатурах») космических объектов и провести эксперименты по получению так называемой некоординатной информации о них. Активные работы на ЛЭ-1 продолжались до середины 80-х годов [5]. В этот период неоднократно заменялись и модернизировались его элементы, в первую очередь компьютеры, электронные системы, фотоприемные устройства и,

частично, оптика. Локатор ЛЭ-1 послужил полезным средством для освоения лазерной техники и дал чрезвычайно ценную информацию научно-технического характера по целому ряду проблем. Разработанные для ЛЭ-1 технологии, элементы и материалы нашли широкое применение при создании многих других лазерных приборов и систем. Сейчас ЛЭ-1, к сожалению, «ржавеет» в казахстанской каменистой степи, многие его части разломаны и разбиты, устарели физически и морально. Предпринимались попытки совместно с казахстанскими учеными «оживить» локатор, но эта весьма дорогостоящая работа не получила развития, ведь ЛЭ-1 теперь находится в другом государстве – суверенном Казахстане. Не исключено, что локатор мог бы быть использован (после модернизации и восстановления) в международных программах.

2.2. Фотодиссоционные иодные лазеры для ПРО

Поскольку основной задачей ОКБ «Вымпел» было создание комплексов и систем оружия ПРО, то особый интерес вызвало высказанное в конце 1964 г. весьма оптимистичное предложение Н.Г.Басова и О.Н.Крохина, поддержанное затем и рядом других ученых, о принципиальной возможности прямого поражения (разрушения или повреждения оболочки) ГЧБР мощным лазерным излучением. Это предложение родилось в результате поисковых работ 1962–1964 гг., направленных на увеличение энергии излучения лазеров, и обсуждалось с рядом крупных ученых на совещаниях у тогдашнего президента АН СССР М.В.Келдыша. Ученые с самого начала понимали, что для лазера с высокой энергией излучения в импульсе (вначале имелся в виду лазер на кристалле рубина с оптической накачкой, КПД которого невелик) необходим исключительно мощный источник накачки с соответствующим спектром излучения. В первые годы развития лазерной техники внимание было приковано к мощным твердотельным лазерам на кристаллах, а потом и на активированных стеклах, использующим источники оптической накачки. Разработка других типов мощных лазеров в первой половине 60-х годов находилась еще в зачаточном состоянии. Лампы-вспышки принципиально не могли обеспечить требуемой для сверхмощных твердотельных лазеров энергии накачки, и пришлось обратиться к поиску иных мощных источников накачки.

У О.Н.Крохина родилась идея использования для накачки лазеров самого мощного источника света: излучения, возникающего при взрыве атомного заряда в воздухе. Такой экзотический источник по мощности и энергии излучения превосходил другие источники на много порядков [6]. В те годы общая атмосфера «лазерного энтузиазма», в которую усилиями ученых было вовлечено и высшее военно-промышленное руководство страны, при недостаточном еще понимании механизмов и оценок возможностей реального поражающего действия лазерного излучения способствовала выдвигению не только смелых, но и весьма рискованных проектов.

Одним из них и стал проект создания научно-экспериментального комплекса для экспериментальных работ по лазерному оружию наземного базирования для ПРО. Впрочем, как показало будущее, склонность к рискованным и недостаточно обоснованным проектам (не только лазерным) еще долго оставалась слабостью ученых и военных не только в СССР (вспомним, например, о про-

водившейся в 80-х годах программе создания рентгеновских лазеров с накачкой излучением атомного взрыва для СОИ в США).

Анализ первых схем и идей показал, что создание сверхмощного лазерного оружия на основе лазера на кристалле рубина с накачкой от лампы-вспышки оказалось невозможным, поскольку использовавшиеся импульсные лампы не могли обеспечить сверхбольших общих и удельных потоков излучения. Требуемое число рубиновых кристаллов тоже далеко выходило за пределы возможности промышленности. Необходимо было найти другой лазер с более технологичной и дешевой активной средой, чем рубин, и реальный мощный источник накачки, а не (воображаемый) атомный взрыв. В связи с этим особую роль в развитии работ в интересах ПРО в СССР сыграло создание так называемых иодных фотодиссоционных лазеров (ФДЛ). Физическая идея, лежащая в основе ФДЛ, была предложена и опубликована учеными ФИАНа С.Г.Раутианом и И.И.Собельманом еще в 1961 г. [7]. Они показали теоретически, что возможно получение возбужденных атомов или молекул путем фотодиссоциации более сложных молекул при их облучении мощным (нелазерным) световым потоком. Как было установлено позже, наиболее эффективными рабочими средами для таких лазеров оказались возбужденные атомы иода, образующиеся в ходе фотодиссоциации различных соединений, в первую очередь перфторалкилиодидов (например, CF_3I и $\text{C}_3\text{F}_7\text{I}$).

В 1964 г. американские ученые опубликовали сообщение о получении на лабораторном ФДЛ излучения с небольшими мощностью и энергией [8]. Несколько позже, в 1966 г., в США импульсная энергия излучения такого лазера была доведена до 100 Дж. Н.Г.Басов и О.Н.Крохин предложили применить именно этот тип лазера для достижения предельно высоких энергетических характеристик при его оптической накачке излучением высокотемпературных взрывных источников (американцы не использовали такие источники). Создание очень мощных неламповых источников света с требуемым спектром для накачки (фотодиссоциации) молекул рабочего вещества лазера было одной из основных проблем разработки ФДЛ.

Особенность перфторалкилиодидов состоит в наличии интенсивной полосы поглощения оптического излучения накачки в УФ области. Такое излучение эффективно генерируется газовой плазмой при температурах порядка 25000 К. Хотя рассматривалась также и идея использовать для этой цели световое излучение ядерного взрыва в воздухе, наиболее существенной для практической реализации мощных ФДЛ оказалась оригинальная идея ученых из ФИАНа и Всесоюзного научно-исследовательского института экспериментальной физики (ВНИИЭФ, известный также как Арзамас-16, ныне – Российский федеральный ядерный центр (РФЯЦ) в Сарове). Эта идея была открыто опубликована лишь в начале 90-х годов (см., напр., [9, 10]). Н.Г.Басовым и О.Н.Крохиным было предложено использовать для накачки ФДЛ мощное световое излучение ударной волны в тяжелом газе, создаваемой взрывом заряда взрывчатого вещества (ВВ). Рассматривались и другие мощные источники света, например электрические разряды или ксеноновые лампы-вспышки. Однако интенсивность их излучения ограничивалась коэффициентом пропускания стенок кварцевых трубок в УФ области спектра.

Интенсивность излучения возрастает, как известно, пропорционально кубу температуры источника. Таким образом, увеличение температуры источника, например, в 5 раз по сравнению с лампами-вспышками ведет к увеличению интенсивности излучения в 125 раз. Это обстоятельство, осознанное учеными ФИАНа, привело к значительному возрастанию эффективности накачки. В 1965 г. эти ученые предложили отказаться от кварцевой стенки, отделяющей тяжелый газ (например, ксенон) взрывного или электрического источника накачки («открытый разряд») от активной среды ФДЛ. Именно использование для накачки ФДЛ энергии взрыва химических ВВ в виде излучения фронта ударной волны позволило в течение 4–5 лет увеличить энергию и мощность излучения ФДЛ в миллионы раз и получить к 1970 г. такую энергию излучения, которая и сейчас еще недоступна большинству других лазеров. Процессы, протекающие в ФДЛ, были детально изучены в работах В.С.Зуева [11].

Начало экспериментальных работ по взрывным ФДЛ во ВНИИЭФе связано с инициативой Н.Г.Басова, обсуждавшего в 1965 г. с научным руководителем ВНИИЭФа Ю.Б.Харитоновым проблему создания мощных импульсных источников света для накачки ФДЛ. Вскоре начались эксперименты с ФДЛ, проводившиеся в Сарове коллективом под руководством С.Б.Кормера совместно с физиками из ФИАНа (в первую очередь с В.С.Зуевым и членами его группы).

В 1965–1966 гг. в ходе работ, проведенных сотрудниками ФИАНа, ВНИИЭФа и ОКБ «Вымпел» (В.П. Аржанов, Б.Л.Борович, В.С.Зуев, В.М.Казанский, В.А.Катулин, Г.А.Кириллов, С.Б.Кормер, Ю.В.Куратов, А.И.Куряпин, О.Ю.Носач, М.В.Синицын, Ю.Ю.Стойлов и др.) была продемонстрирована возможность получения с помощью взрывных иодных ФДЛ мощных импульсов лазерного излучения на длине волны 1.315 мкм. Уже в первых сериях экспериментов были достигнуты значительные по тем временам импульсная мощность и энергия излучения. В качестве главных компонентов рабочей среды лазера были выбраны соединения углерода, фтора и иода (трифториодметан CF_3I или гексафториодпропан C_3F_7I). Создание ФДЛ с накачкой УФ излучением фронта ударной волны потребовало и преодоления определенной стереотипа мышления: многим казалась дикой сама идея «взрывающегося» лазера. Специалисты из ВНИИЭФа находились в преимущественном положении: основная тематика их работ (атомное и термоядерное оружие) всегда была связана как с применением, так и с глубоким изучением взрывов и сложных процессов, протекающих в веществе в условиях гигантских давлений, температур и энергетических мощностей, для них взрывные устройства были привычной техникой.

В 1965 г. Н.Г.Басов и О.Н.Крохин предложили применить такие лазеры для поражения ГЧБР реактивным механическим импульсом, возникающим при быстром испарении поверхности ГЧБР под действием мощного лазерного излучения. Н.Г.Басов сообщил об этой идее директору ФИАНа Д.В.Скобельщину и тогдашнему президенту АН СССР М.В.Келдышу, который привлек к рассмотрению данного предложения академиков Ю.Б.Харитона, Я.Б.Зельдовича, А.Н.Щукина, А.Д.Сахарова, А.Н.Тихонова, А.М.Прохорова, А.А.Самарского и генерального конструктора систем ПРО Г.В.Кисунько. В 1963 и 1965 гг. состоялись совещания у М.В.Келдыша, на которых О.Н.Крохин докладывал о предложениях по

применению мощных лазеров для решения стратегических оборонных задач [12]. При этом в 1963 г. было доложено об использовании для накачки лазеров излучения фронта ударной волны при ядерном взрыве, а в 1965 г. сделано предложение о создании сверхмощных ФДЛ, накачиваемых излучением ударной волны при взрыве химического ВВ и другими мощными источниками УФ излучения, в частности электрическими разрядами.

Осенью 1965 г. Н.Г.Басовым, научным руководителем ВНИИЭФа Ю.Б.Харитоновым, заместителем директора ГОИ по научной работе Е.Н.Царевским и главным конструктором ОКБ «Вымпел» Г.В.Кисунько была направлена записка в ЦК КПСС, в которой говорилось о принципиальной возможности поражения ГЧБР лазерным излучением и предлагалось развернуть соответствующую экспериментальную программу. Предложение было одобрено и программа работ по созданию лазерной стрельбовой установки для задач ПРО, подготовленная совместно ОКБ «Вымпел», ФИАНОм и ВНИИЭФом, была утверждена решением правительства в 1966 г. Предусматривалась разработка высокоэнергетических ФДЛ с энергией более 1 МДж и создание на их основе на Балхашском полигоне научно-экспериментального стрельбового лазерного комплекса (НЭК), на котором идеи лазерной системы для ПРО должны были быть проверены в натуральных условиях. Программа получила шифр «Терра-3».

В результате активной работы экспериментаторов и теоретиков уже в 1966–1967 гг. стало ясно, что на выбранном пути могут быть достигнуты такие значения импульсной энергии лазера (называлась цифра до 10 МДж в импульсе, что энергетически соответствует 2 кг мощного ВВ), которые в те годы представлялись почти фантастическими. Ученые полагали, что при этих высоких энергиях и мощностях лазерного излучения удастся разрушить теплозащитное покрытие ГЧБР. Эти предложения формулировались в условиях, когда в лабораториях имелись лазеры с энергией в импульсе около 1 Дж, т. е. в десять миллионов раз меньше, чем было необходимо. Напряженная работа энтузиастов из ФИАНа, ВНИИЭФа, ГОИ, ОКБ «Вымпел», а также групп из Государственного института прикладной химии (ГИПХ) в Ленинграде, где была создана и освоена технология производства необходимых соединений иода и фтора (руководителем ГИПХа в то время был В.С.Шпак), Института физики Земли (сектор П.В.Кевлишвили) и из ряда других научных и промышленных организаций позволила в течение двух лет не только предложить, но и реализовать целый ряд оригинальных идей и технических решений в области оптики, источников высокоинтенсивного света, физики и техники взрыва, химии иодных и иных соединений и способов их производства и очистки [11].

Первые эксперименты с ФДЛ, проведенные в 1965–1967 гг., дали весьма обнадеживающие результаты и к концу 1969 г. во ВНИИЭФе с участием ученых ФИАНа и ГОИ были разработаны, собраны и испытаны ФДЛ с энергией импульса излучения сотни тысяч джоулей, что было примерно в 100 раз выше, чем у любого известного в те годы лазера. Конечно, к созданию иодных ФДЛ с предельно высокими энергиями удалось прийти не сразу. Опробовались различные варианты конструктивных схем лазеров. Решительный шаг в осуществлении работоспособной конструкции, пригодной для получения высоких энергий излучения, был совершен в 1966 г., когда в

результате изучения экспериментальных данных было показано, что предложение ученых ФИАНа (1965 г.) убрать кварцевую стенку, разделяющую источник излучения накачки и активную среду, можно реализовать. Общая конструкция лазера существенно упростилась и свелась к оболочке в виде трубы, внутри или на внешней стенке которой располагался удлинённый заряд ВВ, а на торцах – зеркала оптического резонатора.

Такой подход позволил спроектировать и испытать лазеры с диаметром рабочей полости более метра и длиной десятки метров. Эти лазеры собирались из стандартных секций длиной около 3 м. Несколько позже (с 1967 г.) исследованием и конструированием ФДЛ со взрывной накачкой успешно занялся сформировавшийся в ОКБ «Вымпел», а затем перешедший в ЦКБ «Луч» коллектив газодинамиков-лазерщиков (В.К.Орлов, К.И. Козорезов, В.М.Казанский, А.В.Городулин и др.). В ходе работ были рассмотрены десятки вопросов: от физики процессов распространения ударных и световых волн в среде лазера до технологии и совместимости материалов и создания специальных средств и методов измерения параметров мощного лазерного излучения. Отдельно стояли вопросы техники взрыва: работа лазера требовала получения предельно гладкого и прямолинейного фронта ударной волны. Эта задача была решена, были сконструированы заряды и разработаны методы их подрыва, позволившие получить требуемый фронт ударной волны. Создание этих ФДЛ позволило начать эксперименты по изучению воздействия лазерного излучения высокой интенсивности на материалы и конструкции целей.

С развитием работ по взрывным ФДЛ возникла и другая проблема: многим представлялась несурзадной идея лазера, способного генерировать только один импульс и непременно самоуничтожаемого (по крайней мере, частично) в ходе работы. Заметим, что широкое применение ракетной техники почти полностью основано на использовании ракет, практически уничтожаемых в ходе запуска. Тем не менее схема взрывающегося лазера была весьма непривычна и подвергалась критике, в частности из-за высокой стоимости первых образцов ФДЛ и оптики к ним, которые разрушались при каждом эксперименте.

В связи с этим по инициативе лаборатории Н.Г. Басова в ФИАНе и группы И.М.Белоусовой и И.В.Подмошенского в ГОИ были начаты работы по физике ФДЛ многократного использования, в которых применялись другие источники накачки, в первую очередь мощные электрические разряды. Работы по экспериментальным стендовым образцам таких ФДЛ проводились во ВНИИЭФе коллективом ученых под руководством А.И. Павловского (с участием сотрудников ГОИ) и конкурировали с работами по взрывным ФДЛ, которыми во ВНИИЭФе руководил С.Б.Кормер. Лазеры требовали очень мощного и компактного импульсного источника электрического тока. Именно такие источники – взрывомангнитные генераторы (ВМГ) – уже в течение многих лет для других целей разрабатывались во ВНИИЭФе. ВМГ (их называли также магнитокумулятивными генераторами) разрушались в процессе работы при взрыве заряда ВВ, но стоимость ВМГ была во много раз ниже, чем стоимость лазера. Коллективом А.И.Павловского в начале 70-х годов были созданы образцы ВМГ, специально предназначенные для накачки электроразрядных ФДЛ, и было организовано их производство на Ленинградском заводе «Электросила».

3. Лазерная программа и развитие оптической промышленности

В начале 60-х годов в СССР (да, пожалуй, и в других странах) изготовление любой оптической детали или устройства с диаметром больше 30–50 см рассматривалось как уникальная задача. В год изготовлялось около десятка крупногабаритных зеркал и линз. И хотя существовали необходимые для штучного выпуска такой оптики оборудование и технология, однако производственный процесс в сильной степени зависел от умельцев – мастеров и рабочих-оптиков. На изготовление и доводку крупной высокоточной оптики уходили годы.

С развитием инициированных Н.Г.Басовым работ по ФДЛ потребность экспериментаторов в крупногабаритной (диаметром 0.4–1.5 м) оптике возросла в десятки раз. В каждом опыте уничтожались не только зеркала лазерного резонатора ФДЛ, но и многие другие оптические элементы, необходимые для обеспечения измерений, фокусировки излучения, защиты датчиков от осколков и т. п. Промышленность в 1965–1967 гг. еще была не готова к изготовлению нескольких сотен крупногабаритных оптических деталей в год. Значительную роль в решении проблемы сыграли усилия Ю.Б.Харитона и Н.Г. Басова, настойчивость и волевой напор руководителя работ по ФДЛ во ВНИИЭФе С.Б.Кормера, а также энтузиазм и поддержка руководителей оптической отрасли, в первую очередь министра оборонной промышленности С.А.Зверева, оптика по образованию и опыту работы в промышленности, всячески поддерживавшего развитие лазерной техники.

С.А.Зверев был личностью незаурядной. Конечно, роль руководителя крупнейшего оборонного министерства, в программе которого оптика занимала лишь некоторую часть, требовала от него универсальных познаний и разносторонних качеств. Вся его деятельность отличалась масштабностью и смелостью решений, государственным подходом к делу и искренним энтузиазмом, интересом к новым достижениям науки и техники. Он уважал и ценил выдающихся ученых, регулярно бывал в лабораториях Н.Г.Басова, А.М.Прохорова, Р.В. Хохлова, ученых ГОИ, которые искали поддержки и помощи в развитии лазерной науки, ее материальной и производственной базы и часто находили ее у С.А.Зверева. До конца своей жизни С.А.Зверев был председателем специального координационного совета по мощным лазерам и лазерным системам на их основе, обеспечивая энергичную поддержку развития лазерной техники и вовлечение в круг разработок и производства лазеров заводов и заводских конструкторов. Неизменными и активными членами Совета были Н.Г.Басов и А.М.Прохоров.

В результате усилий Н.Г.Басова, Ю.Б.Харитона и решающей поддержки С.А.Зверева в течение 1967–1970 гг. на ряде оптических заводов были созданы новые специальные цехи и участки по изготовлению лазерной оптики, спроектированы и изготовлены десятки точных крупногабаритных станков для ее обработки, закуплено за рубежом (наша вакуумная техника традиционно отставала) вакуумное оборудование для нанесения специальных оптических покрытий. В результате предпринятых усилий были во много раз увеличены производственные и технологические возможности страны по изготовлению всех видов крупногабаритной оптики не только

для лазеров, но и для многих других применений. Было освоено впервые в мировой практике серийное производство оптических элементов (пластин, зеркал, линз) диаметром до 1.2 м. Нарастивалось также производство оптического стекла и оптических кристаллов для лазерной техники.

4. Работы по проекту «Терра-3» и создание ЦКБ «Луч»

Пока физики и инженеры работали над совершенствованием лазеров, в ОКБ «Вымпел» под руководством О.А.Ушакова в 1967–1969 гг. разрабатывался (конечно, с участием ученых) эскизный проект НЭК «Терра-3». Непосредственным руководителем разработки проекта был военный инженер Н.Н.Шахонский (впоследствии генерал-майор), прикомандированный Министерством обороны к ОКБ «Вымпел», а затем многие годы работавший в ЦКБ «Луч» (в настоящее время ФНЦ «НПО "Астрофизика"»). Проект создавался в условиях, когда далеко не полностью были ясны возможности создания лазеров, отсутствовали данные по уязвимости ГЧБР, стойкости оптики к лазерному излучению, не ясны были и возможности прохождения лазерных пучков с высокими мощностью и энергией через атмосферу.

Возникало множество вопросов, в первую очередь о том, как сформировать остроуправленный луч лазерного излучения, как его быстро и точно (ведь требовалось прямое попадание) навести на летящую со скоростью 3–4 км/с ГЧБР. На первом этапе работа, в основном, сводилась к расширению перечня неясных и требующих проработки проблем. Быстро выявилось, что основными проблемами НЭК (помимо создания мощного лазера) были выполнение требований по точности наведения луча (несколько угловых секунд), а также создание оптики, способной без разрушения выдержать мощный лазерный импульс. При реализации первого варианта проекта НЭК «Терра-3» в ОКБ «Вымпел» планировались, как выяснилось, нереально высокие значения стойкости оптики к лазерному излучению. С появлением более мощных лазеров в экспериментах, проводимых во ВНИИЭФе, обнаружилось, что оптика (оптическое стекло и оптические покрытия) не выдерживает высоких интенсивностей лазерного излучения. Пришлось принимать срочные меры. Широкая программа работ по созданию более устойчивой к мощному излучению оптики выполнялась в ГОИ, где были детально изучены (под руководством А.М.Бонч-Бруевича и Г.Т.Петровского) процессы ее разрушения и факторы, определяющие ее стойкость. Родилось новое направление в оптике – так называемая силовая оптика. Была начата программа создания оптики, выдерживающей интенсивные потоки лазерного излучения.

В разработке эскизного проекта НЭК участвовали многие научно-исследовательские институты и конструкторские бюро, в первую очередь предприятия оборонных отраслей промышленности. Требовали решения и разнообразные нелазерные проблемы, такие, например, как создание сверхточных приводов для крупногабаритных зеркал, высокочувствительных фотоприемников для системы точного наведения луча, защита точной оптики от воздействия ударной волны при взрыве многотонных зарядов ВВ в лазерах. Разумеется, создание НЭК на Балхашском полигоне было бы невозможно без прямого

участия в этой работе военных. Проект активно поддерживал ведавший вопросами ПРО начальник Главного управления Министерства обороны СССР генерал-полковник Г.Ф.Байдуков – национальный герой, участник знаменитого, первого в истории авиации перелета из Москвы в США через Северный полюс.

В 1967 г. достигнутые в экспериментах энергии ФДЛ приблизились уже к 1000 Дж в импульсе. Выяснилось, однако, что, генерируя значительную энергию, эти лазеры не позволяли получить ожидавшийся и требуемый от них узкий луч. В лазерах возникали оптические неоднородности, приводившие к расширению луча. А ведь только остроуправленным лучом можно доставить лазерную энергию на сколько-нибудь значительные расстояния. В экспериментах угол расходимости оказывался примерно в 100 раз большим, чем ожидалось, что делало невозможным создание системы. Идея лазерного ПРО рушилась!

В ФИАНе под непосредственным руководством Н.Г.Басова и с участием ученых ВНИИЭФа и ГОИ начались исследования причин столь неблагоприятной расходимости излучения взрывных ФДЛ и поиски средств для ее уменьшения. Н.Г.Басов и О.А.Ушаков были крайне озабочены сложившимся положением. Надо было в короткие сроки найти выход из тупика. Был организован «мозговой штурм», в результате которого родилось предложение Н.Г.Басова и И.И.Собельмана об использовании двухкаскадной схемы лазерной установки, в которой излучение многих ФДЛ 1-го каскада с «плохой» расходимостью с помощью специальной оптической системы направлялось в лазер-преобразователь (ВКР-лазер) 2-го каскада [13]. Ожидалось, что вследствие высокого коэффициента полезного действия оптические искажения в активной среде такого лазера будут незначительными и, следовательно, выходное излучение – остроуправленным. Накачка ВКР-лазера могла проводиться одновременно несколькими взрывными лазерами, поэтому его также называли «сумматором» [13]. Длина волны ВКР-лазера определялась не только длиной волны накачки ФДЛ, но зависела и от вещества, в котором происходит комбинационное рассеяние. В дальнейшем усилиями ученых ФИАНа и ВНИИЭФа выяснилось, что меньшими потерями в атмосфере при накачке иодными ФДЛ обладает излучение ВКР-лазера на жидком кислороде, что и обусловило его применение, несмотря на значительные неудобства работы с большими объемами пожароопасного жидкого кислорода.

ВКР-лазер 2-го каскада представлял собой криостат с оптическими окнами для ввода и вывода излучения либо, в случае применения сжатых газов, толстостенную прочную камеру, которая способна выдержать давление газа порядка 50–100 атм, также снабженную оптическими окнами для ввода и вывода излучения и оптическим резонатором. Требовалось создать ВКР-лазеры с энергией примерно в миллион раз более высокой, чем достигнутая в первых установках на лабораторных стендах ФИАНа. Идея сумматора была принята к реализации и использована ОКБ «Вымпел» при доработке эскизного проекта НЭК «Терра-3». Были начаты программа детальных исследований и, несколько позже (в начале 70-х годов), разработка конструкций мощных экспериментальных ВКР-лазеров АЖ4-Т (энергия импульса 10^4 Дж) и АЖ5-Т (10^5 Дж), методов и оптимальных оптических систем для ввода и вывода излучения. Эти работы были

выполнены в ЦКБ «Луч» в подразделении В.К.Орлова под руководством Е.М.Земскова [14]. Для передачи излучения первичных лазеров в сумматор использовались составные (до сотен зеркал) зеркальные панели площадью около 10 м².

В 1968 г. эскизный проект НЭК «Терра-3» рассматривался рядом экспертных и научно-технических советов. Теперь очевидно, что в проекте были приняты слишком оптимистические оценки по многим вопросам, требовавшие дальнейшего уточнения и подтверждения крупномасштабными экспериментами, однако в те годы эти вопросы еще не были достаточно глубоко изучены. Самым слабым местом проекта были, как оказалось впоследствии, заниженные оптимистические оценки лазерной энергии, необходимой для поражения ГЧБР. Были, конечно, и другие слабые места. В целом направление работ и проект НЭК были одобрены, хотя некоторые крупные ученые достаточно скептически оценивали перспективы лазерного направления в ПРО. Но никто из критиковавших не мог (или не решался) конкретно указать на принципиальные недостатки проекта и критика носила характер частных замечаний.

При этом хорошо финансировавшаяся, успешная работа по достижению предельно высоких характеристик лазеров, конечно, увлекала многих ученых и администраторов. Сыграл свою роль и высокий авторитет руководителей программы, в первую очередь Н.Г.Басова и Ю.Б.Харитона. Руководство военно-промышленного комплекса (Д.Ф.Устинов, Л.В.Смирнов, С.А.Зверев) и военные, очевидно, верили в реальность задуманного и наращивали финансирование работ. По крайней мере, они, даже если и видели рискованный характер проекта, не шли на его ограничение. Ведь программа ПРО оставалась сверхактуальной, и руководство боялось «упустить» какое-нибудь направление в ней, которое могло бы привести к созданию реальных боевых систем. С другой стороны, постепенно становилось ясным, что программа требует достаточно длительного этапа исследований и крупномасштабных экспериментов, создания многих новых технологий, развития специальной экспериментально-стендовой базы и новых производств, а следовательно, значительного времени.

В 1967–1968 гг. Г.В.Кисунько и системным разработчикам ПРО из ОКБ «Вымпел» стало ясно, что лазерное оружие для ПРО – дело не слишком близкого будущего, от них же правительство требовало создания систем ПРО уже в ближайшее время [2], поэтому их интерес к лазерному проекту стал падать. Однако коллективы разработчиков лазерного направления уже сформировались, масштабы и объемы финансирования этих работ возрастали, в программу были вовлечены ведущие институты, а относительно быстрый и значительный прогресс в создании мощных взрывных ионных ФДЛ в те годы давал определенные основания для оптимизма.

Росло и понимание комплексности и сложности проблемы, требовавшей специальной организации работ. В конце 1968 г. возникли предложения о реорганизации работ и выводе их из ОКБ «Вымпел», занятого созданием в первую очередь ракетных систем ПРО. Активным инициатором такой реорганизации был руководитель лазерного направления в ОКБ «Вымпел» О.А.Ушаков. Он был заинтересован не только в развитии этого направления: предусматривалось и создание специализированной лазерной фирмы, нацеленной на тематику ПРО, и О.А.

Ушаков не без оснований рассчитывал стать ее главой. Где-то «за кадром» маячила фигура Н.Д.Устинова, который, впрочем, явно нигде в планах реорганизации не фигурировал.

Для выполнения конструкторских работ по лазерному локатору ЛЭ-1 и было решено создать в Москве на основе коллектива разработчиков лазерных систем из ОКБ «Вымпел» (СКБ-56) новое специализированное конструкторское бюро, получившее название ЦКБ «Луч». Министр оборонной промышленности СССР С.А.Зверев подчеркивал конструкторский характер предстоящих работ этого предприятия, полагая, очевидно, что научные проблемы, стоящие перед ним, в основном уже решены или решаются учеными АН СССР, ВНИИЭФа и ГОИ. (Будущее показало ошибочность этого предположения, и ЦКБ «Луч», впоследствии переименованное в ЦКБ «Астрофизика», во многом стало и научной организацией прикладного характера.)

В течение нескольких месяцев с привлечением научных руководителей программ из ОКБ «Вымпел», ФИАНа, ВНИИЭФа, ГОИ, а также представителей Министерства обороны СССР, был подготовлен проект Постановления ЦК КПСС и Совета Министров СССР, предусматривавшего развертывание на Балхашском полигоне научно-экспериментального стрельбового лазерного комплекса, а также ряд организационных мер, включая создание в составе Министерства оборонной промышленности специализированной лазерной конструкторской фирмы – ЦКБ «Луч». Для этого из ОКБ «Вымпел», входившего в состав Министерства радиопромышленности, выделялись подразделение О.А.Ушакова (СКБ-56) и опытный завод. Предусматривались также продолжение в ЦКБ «Луч» работ по созданию лазерного локатора ЛЭ-1 и выполнение разработанных под руководством Н.Г.Басова программ исследований в институтах АН СССР и в промышленности. После «шлифовки» проекта в ВПК он был утвержден осенью 1969 г.

Директором вновь созданного для конструкторской реализации лазерной программы ЦКБ «Луч» был назначен опытный работник оптической отрасли И.В.Птицын, который на предыдущих должностях показал способность обеспечивать быстрое развитие и строительство материально-технической базы своего предприятия. Главным конструктором ЦКБ «Луч» и руководителем проекта НЭК «Терра-3» совершенно неожиданно был назначен работавший в одном из оборонных конструкторских бюро опытный конструктор-ракетчик М.Г.Васин, который никогда ранее не занимался лазерами и лазерными системами. Его назначение свидетельствовало о том, что руководство военно-промышленного комплекса считало принципиальные научно-технические проблемы лазерного ПРО решенными и возлагало на вновь созданную организацию в основном грамотное конструкторско-техническое оформление этих решений. Будущее показало глубокую ошибочность этого мнения, сформировавшегося под влиянием оптимистических прогнозов и докладов многих ученых и конструкторов.

Совершенно неожиданно для себя О.А.Ушаков оказался в тяжелом положении. Человек, отдавший несколько лет своей жизни развитию и организации работ по лазерным системам для ПРО в ОКБ «Вымпел», был устранен от руководства ими. Известно, что О.А.Ушаков был требователен к своим сотрудникам и не стеснялся «разносить» их за упущения. А ведь у него в под-

чинении находились Н.Д.Устинов и ряд его сподвижников...

Директор ЦКБ «Луч» И.В.Птицын был энергичным и, как принято говорить, «пробивным» администратором и хозяйственником. Он смог (конечно, при большой поддержке «сверху») быстро развернуть на окраине Москвы строительство комплекса зданий для вновь создаваемого предприятия и решить многие другие вопросы его организационного и хозяйственного становления. К сожалению, И.В.Птицын, часто не проявляя чувства такта, с трудом находил общий язык с учеными и конструкторами, что через несколько лет и стало причиной его вынужденного ухода с поста директора, когда задачи первоначального материального становления фирмы были им успешно решены.

Заместителями М.Г.Васина стали возглавившие основные подразделения (и направления работ) В.Ф.Морсков (система наведения лазерного луча комплекса «Терра-3»), Н.Д.Устинов (лазерная локация, включая локация ЛЭ-1), В.К.Орлов (мощные лазеры). Теоретический отдел ЦКБ возглавил крупный специалист по теории обработки сигналов (в том числе, лазерных) П.А.Бакут.

Известный ученый и конструктор, лауреат Ленинской премии В.К.Орлов, ранее работавший в исследовательском центре атомной промышленности, был по инициативе Н.Г.Басова и О.Н. Крохина приглашен в ОКБ «Вымпел» в 1969 г. Ему удалось быстро создать команду инженеров-физиков, успешно справившуюся в последующие годы с разработкой целого ряда мощных лазеров, включая и ФДЛ. В этот коллектив вошли ведущие специалисты ОКБ «Вымпел» (Е.М.Земсков, В.М.Казанский, И.С.Маршак и др.), а также других предприятий. В 1970–1971 гг. на работу в ЦКБ «Луч» были приглашены крупные специалисты, доктора наук Г.Г.Долгов-Савельев из Института ядерной физики СО АН СССР, Л.А.Васильев из научно-исследовательского института космического профиля, А.К.Пискунов из Физико-химического научно-исследовательского института им. Л.Я.Карпова, а также более молодые кандидаты наук Ю.И.Кружилин, Н.В.Чебуркин (ученик академика Р.В.Хохлова) и другие, ставшие впоследствии руководителями не только направлений, но и предприятий.

Специалисты ЦКБ «Луч» продолжили начатые ОКБ «Вымпел» совместные работы с учеными ФИАНа, ВНИИЭФа, ГОИ и других научных центров как по направлениям, существовавшим до создания ЦКБ «Луч», так и в ряде новых лазерных направлений, разработка которых, как правило, инициировалась Н.Г.Басовым. С конца 1969 г. мозговым центром всей программы стал научно-технический совет (НТС) под руководством Н.Г. Басова. В течение 10 лет НТС работал очень энергично и продуктивно, регулярно обсуждая как состояние и результаты проводимых исследований, так и новые предложения. Душой НТС был его председатель Н.Г.Басов. В состав совета наряду с руководителями отдельных программ и направлений работ, о которых сказано выше (Ю.Б.Харитон, С.Б.Кормер, А.И.Павловский, М.Г.Васин), вошли и представители других научно-исследовательских и конструкторских организаций: директор ГИПХа В.С.Шпак, руководители лазерных отделов ГОИ А.М.Бонч-Бруевич и А.А.Мак, директор ИФА А.М.Обухов, руководитель лазерного направления в Институте химической физики (ИХФ) АН СССР В.Л.Тальрозе, руководитель спецсектора Института физики Земли АН

СССР П.В.Кевлишвили, представители Министерства обороны и Министерства оборонной промышленности. В работе совета иногда участвовали и другие крупные ученые. Помимо заседаний НТС практиковались еженедельные научно-технические совещания у Н.Г.Басова, на которых предварительно рассматривались новые идеи и проекты, искались пути разрешения постоянно возникавших научных и инженерных проблем. По мере развития лазерной науки и техники как в СССР, так и за рубежом НТС была сформирована обширная программа научных исследований по лазерам (электроионизационным, химическим импульсным и непрерывным, лазерам на комбинационном рассеянии), по изучению процессов воздействия лазерного излучения на материалы и военную технику, по распространению лазерного излучения в атмосфере, по линейной и нелинейной оптике лазеров и оптическим материалам, стойким к лазерному излучению. При этом, по крайней мере до середины 70-х годов, Н.Г.Басов направлял усилия ученых прежде всего на увеличение энергетики лазеров, и лишь позже задача повышения осевой яркости излучения (т.е. достижение не только высокой энергии излучения, но и предельно малой расходимости луча) была поставлена на повестку дня. Идея использования обращения волнового фронта для этой цели рассматривалась НТС сразу же после появления первых пионерских работ ФИАНа в этом направлении (правда, пользовались термином «динамические голограммы», а не «обращение волнового фронта»).

После создания ЦКБ «Луч», наряду с решением многих практических проблем становления и строительства новой фирмы, активно начались работы по созданию НЭК. Техническим проектом комплекса, работы по которому возглавил, по крайней мере номинально, М.Г.Васин (в разработке комплекса принимало участие множество организаций и специалистов), было определено, что НЭК «Терра-3», создаваемый на Балхашском полигоне, будет состоять из иодных взрывных ФДЛ, ВКР-лазера (сумматора) на жидком кислороде, системы наведения излучения и аппаратуры управления комплексом.

Основные сооружения НЭК выполнялись из монолитного железобетона и особо прочных конструкций, чтобы выдерживать воздействие ударной волны и, возможно, осколков, возникающих при одновременном взрыве многих ФДЛ. Предусматривалось, что общая масса ВВ в лазерах может достигать 30 т. Здание системы наведения было удалено от площадки для взрывных лазеров и бункера ВКР-лазера на расстояние около 1 км для того, чтобы взрывная волна достигала здания, в котором находилась точная оптика системы наведения, уже после того, как импульс излучения уйдет к цели, а также чтобы защитить систему наведения от фрагментов лазера. Излучение от ВКР-лазера к системе наведения предполагалось передавать по подземному каналу, соединявшему здание. В начале 70-х годов военные строители начали возведение всех зданий и сооружений НЭК. Строительство шло, к счастью для разработчиков, достаточно медленно, что позволяло неоднократно вносить изменения в схему НЭК по мере более глубокого понимания характера проблем, выявлявшихся в ходе экспериментов.

Проектирование и изготовление системы наведения шло с участием специалистов ГОИ под руководством П.П.Захарова и специалистов ЛОМО, возглавляемых Р.М.Кашерининовым и Б.Я.Гутниковым. Высокоточ-

ное опорно-поворотное устройство оригинальной конструкции создавалось на заводе «Большевик». Для точного (с погрешностью порядка единиц угловых секунд) наведения мощного луча на цель применялась секунда «оптического нониуса» на основе вращающихся зеркальных клиньев. Высокоточные приводы и безлюфтовые редукторы для опорно-поворотных устройств разрабатывались в ЦНИИ автоматики и гидравлики с участием ученых Московского высшего технического училища им. Н.Э.Баумана. Оптический тракт мощного излучения был выполнен на зеркалах и не содержал «прозрачных» оптических элементов, которые могли бы быть разрушены этим излучением.

Проблема лучевой прочности оптики была одной из наиболее острых и заставляла неоднократно вносить изменения в схему НЭК. Первоначальный проект НЭК 1968 года опирался на данные о стойкости оптических материалов к лазерному излучению, полученные в лабораторных экспериментах с маломощными лазерами, когда лазерное пятно на оптике имело небольшие (порядка нескольких миллиметров) размеры. С помощью взрывных ФДЛ были проведены опыты на гораздо более крупных оптических элементах. Результаты испытаний оказались весьма неприятными для конструкторов: оптика большого диаметра и оптические покрытия в реальных условиях разрушались чаще и при значительно меньших потоках излучения, чем предсказывали первые лабораторные эксперименты. Потребовалось понять причины этого и создать новые материалы и технологии с увеличенной лучевой прочностью, а также специальное оборудование для обработки оптики и нанесения стойких покрытий.

Наибольшие потоки лазерного излучения должна была выдерживать выходная оптика ВКР-лазера. Уже в первых экспериментах с мощными ВКР-лазерами АЖ5-Т группой Е.М.Земскова в ЦКБ «Луч» было обнаружено, что эта оптика разрушается лазерным излучением большой интенсивности. Пришлось заменить оптическое стекло более дорогим и сложным в изготовлении, специально разработанным, особо стойким оптическим плавленным кварцем, который контактировал с жидким кислородом внутри кюветы лазера. В ГОИ под руководством Г.Т.Петровского была разработана технология изготовления дисков высшей частоты из плавленного кварца диаметром около 1 м для ВКР-лазера.

5. Развитие работ по мощным ФДЛ (1970–1976 годы)

В ЦКБ «Луч» под руководством В.К.Орлова, Е.М.Земскова и В.М.Казанского при участии физиков из ФИАНа (В.С.Зуева и других) и во ВНИИЭФе под руководством С.Б.Кормера, Г.А.Кириллова (лазеры со взрывной накачкой) и А.И.Павловского (лазеры с электроразрядной накачкой) при научном руководстве ФИАНа продолжались экспериментально-конструкторские работы по мощным ФДЛ [10]. После того как во ВНИИЭФе командой С.Б.Кормера и Г.А.Кириллова были успешно испытаны экспериментальные взрывные лазеры с энергией до 1 МДж, предстояло создать промышленные образцы лазеров, конструкции которых соответствовали бы условиям серийного заводского производства. Проекты таких лазеров разрабатывались как в ЦКБ «Луч» (лазер ФО-21 и др.) [15], так и во ВНИИЭФе (лазер

Ф-1200). В дальнейшем лазер ФО-21 был модернизирован, его конструкцию удалось изменить, предельно упростить и удешевить почти в 10 раз. Острословы дали ему название «бедняк». Крупногабаритная оптика диаметром 1.2 метра для ФДЛ изготовлялась на ЛОМО. Этот диаметр был выбран в соответствии со стандартным размером труб, выпускавшихся металлургической промышленностью для газопроводов. Были разработаны и выпускались серийно модульные ФДЛ типа ФО-32 с меньшей энергией (несколько десятков килоджоулей в импульсе), широко применявшиеся в экспериментах.

Продолжавшиеся во ВНИИЭФ под руководством А.И.Павловского работы по исследованиям электроразрядных ФДЛ привели к созданию в 1974 г. экспериментального стендового лазера с энергией излучения в импульсе около 90 кДж. Лазер размещался в прочном железобетонном каземате, рядом с которым устанавливались ВМГ. Для передачи энергии от ВМГ в каземат использовалось большое число специальных высоковольтных кабелей, позволявших подводить к лазеру ток в сотни тысяч ампер. Исследований и разработок потребовала проблема сильных магнитных полей, возникающих при мощном электрическом разряде в объеме лазера. Эти поля могли нарушить его работу из-за эффекта магнитного расщепления и сдвига линий активных частиц иода. Совместными исследованиями ВНИИЭФа и ГОИ были найдены методы борьбы с этими нежелательными эффектами. Только через много лет, в начале 80-х годов, в Лос-Аламосской лаборатории (США) были созданы образцы иодных ФДЛ с накачкой от ВМГ. Энергия этих лазеров, как сообщалось, не превышала несколько килоджоулей в импульсе.

В связи с наметившимся прогрессом в создании коллективом под руководством А.И.Павловского стендовых образцов электроразрядных ФДЛ многократного применения, в 1975 г. конструкторы ЦКБ «Луч» во главе с В.К.Орловым предложили отказаться от использования в НЭК «Терра-3» взрывных ФДЛ и заменить их на электроразрядные. Это достаточно неожиданное предложение было принято, и последовала очередная доработка проекта НЭК. Здание, ранее предназначавшееся для ВКР-лазера АЖ-7Т, было перепроектировано для размещения в нем нескольких электроразрядных ФДЛ. Рядом с этим зданием предусматривались площадки для ВМГ. По итогам исследований ВНИИЭФа и ГОИ конструкторами Пермского машиностроительного завода и ЦКБ «Луч» был разработан проект электроразрядного ФДЛ (ФО-13) с энергией в импульсе 1 МДж. Однако этот проект не был реализован по причинам, о которых будет сказано ниже, а здание для лазеров осталось недостроенным и попало в разряд так называемых памятников. Это пустое здание демонстрировалось группе американских специалистов, посетивших комплекс в конце 80-х годов. Только лишь система наведения НЭК «Терра-3» позднее дошла до этапа первых испытаний, которые тоже не были завершены.

6. Создание лазерного испытательного центра

В середине 60-х годов, когда лазеры уже вовсю «стреляли» в лабораториях физиков, казалось, что их дальнейший путь в военную технику прост и очевиден: конструкторам надо лишь инженерно «оформить» исследовательские образцы лазеров, и можно отдавать их воен-

ным. Но жизнь быстро опровергла эти «голубые» мечты. Превращение настольных академических лазеров в мощные полевые конструкции потребовало сложного и длительного этапа работ по их масштабированию до требуемых значений выходной энергии, улучшению практически всех их характеристик, отработке надежных, по возможности простых в эксплуатации технических решений, изысканию способов их сборки и технического обслуживания в условиях полигона. Более того, переход от малых моделей лазеров к крупным в некоторых случаях требовал радикального изменения схемы лазера, поскольку простое изменение геометрических размеров устройств иногда оказывалось невозможным из-за причин, связанных с физическими процессами в лазерах. Эти работы требовали значительного количества полигонных экспериментов для отработки деталей конструкции и изучения распространения мощного луча на реальной трассе. Существовавшие испытательные площадки не справлялись с объемом работ, и стало ясно, что надо создавать специализированную стендово-отрабочную и испытательную базу для мощных лазеров, какими располагают все другие отрасли оборонной техники: авиация и космонавтика, артиллерия, ракетная техника и т. п.

Недостаточная испытательно-полигонная база ЦКБ «Луч» тормозила развитие работ не только по ФДЛ, но и по другим высокоэнергетическим лазерам, появившимся в начале 70-х годов: CO₂- и СО-лазерам, химическим и твердотельным лазерам. Создать и испытать мощные лазеры в московских лабораториях было практически невозможно. Это вскоре осознал и Н.Г.Басов. Поэтому при его поддержке были начаты поиски места, где можно было бы расположить лазерный полигон. Требовалось найти участок в несколько десятков квадратных километров где-нибудь в центральной части страны, достаточно изолированный, но находящийся вблизи хороших дорожных коммуникаций и энергетических сетей. После многомесячных поисков и осмотров ряда мест обратили внимание на заброшенное военными танковое стрельбище в 20 км юго-западнее Владимира. Лесисто-болотистая местность, окаймленная торфяниками, была практически не освоена, не имела ни населенных пунктов, ни дорог (кроме лесных), ни энергетических сетей. Однако территория находилась вблизи трассы Москва–Горький, неподалеку проходили мощные электрические линии и железнодорожная ветка (к старым торфоразработкам), до Москвы было всего 180 км. Министерство обороны СССР охотно согласилось предоставить неиспользуемое учебное поле для развития лазерных работ, и уже в начале 1971 г. вышло распоряжение правительства СССР о создании Межведомственного научно-исследовательского испытательного центра и начались изыскания на месте будущего строительства.

Центр получил также открытое название ОКБ «Радуга». Его начальником был назначен генерал-майор И.С.Косьминов [16, 17], ранее принимавший участие в создании ракетной техники и крупнейших ракетных полигонов страны. История развития ОКБ «Радуга» заслуживает отдельного рассказа [16]. Скажем лишь, что усилиями советских военных строителей удалось в сравнительно короткий срок создать в глубине владимирских лесов, в условиях болот и бездорожья, крупный испытательно-производственный (а начиная с 80-х годов – и исследовательско-конструкторский) комплекс с изолированными испытательными площадками, оснащенными

необходимыми сооружениями, трассами, измерительной техникой, значительной энергетикой и всеми видами инженерных сооружений. Более того, был построен опытный завод по производству мощной лазерной техники. Около испытательного центра вырос современный городок Радужный (сейчас в нем около 20000 жителей) со школами, детскими садами, медицинскими учреждениями. Пожалуй, это единственный в мире город, появление которого было обусловлено проблемами создания мощных лазеров, необходимостью их испытаний и исследований. К середине 80-х годов в ОКБ «Радуга» работало несколько тысяч человек, из них около тысячи испытателей и исследователей. На испытательной базе велись работы по лазерам разных типов: твердотельным, CO₂- и СО-лазерам, лазерам на парах металлов и др.

Несколько позже, в середине 70-х годов, в ОКБ «Радуга» были созданы экспериментальные лазерные локационные стенды, в том числе с синтезированной апертурой, однако использовать эти локаторы в программе «Терра-3» не успели. Н.Г.Басов неоднократно бывал на лазерных стендах ОКБ «Радуга», где шло рассмотрение и обсуждение результатов работ по мощным лазерам, а также проводились заседания НТС с участием всех ведущих лазерщиков страны, а иногда и президентов АН СССР А.П.Александрова и Г.И.Марчука. Периодически результаты работ демонстрировались в ОКБ «Радуга» руководителям правительства СССР, министрам, военачальникам.

7. Исследования и разработки мощных лазеров

По инициативе Н.Г.Басова, наряду с созданием НЭК, фотодиссоционных лазеров и лазеров-сумматоров для этого комплекса, в 70-х годах был осуществлен целый ряд программ исследований и разработок по другим видам мощной лазерной техники. Кратко остановимся на основных направлениях этих исследований, во многом носивших пионерский характер, хотя в ряде случаев и воспроизводивших в расширенном по энергетике масштабе работы зарубежных и советских лазерных лабораторий. Программы работ, особенно в начале 70-х годов, часто дополнялись и уточнялись при появлении новых научных идей в СССР или за рубежом. Мы не сможем здесь остановиться на всех подробностях этих работ, результатам которых посвящены сотни статей и научных докладов.

Работы по импульсным химическим лазерам (ИХЛ) были начаты как альтернатива ФДЛ. Использование энергии химических реакций в активной среде лазера могло, как надеялись ученые, привести к значительному повышению эффективности его работы (росту КПД) и соответствующему снижению требований к источнику накачки (уменьшению количества ВВ или полному отказу от применения ВВ в системах инициирования химической реакции), а также к созданию лазера многократного действия. В работе, наряду с исследователями из ФИАНа (группа А.Н.Ораевского), основное участие принимали коллективы ученых ВНИИЭФа (С.Б.Кормер, подразделение М.В.Синицына), ИХФ (коллектив, руководимый В.Л.Тальрозе), ГИПХа (под руководством В.С.Шпака) и некоторых других институтов.

Изучался, в первую очередь, химический лазер на основе реакции фтора и водорода (или дейтерия), энерге-

тические характеристики которого оказались наиболее высокими. Интерес к этому лазеру вызывался и надеждой на осуществление в нем цепной химической реакции, сулившей резкое снижение требований к устройству, инициирующему поджиг химической реакции. Группа из ВНИИЭФа совместно с учеными ГИПХа работала над ИХЛ с инициированием химической реакции от так называемой взрывной лампы, т. е. источника излучения на основе ударной волны относительно маломощного взрыва, в надежде на создание в дальнейшем конструкции лазера, не разрушающейся при таком взрыве. Исследования и опыты привели к созданию нескольких моделей взрывных ИХЛ (одноразовых) с энергией в импульсе до десятков килоджоулей. Однако количество ВВ, требовавшегося для инициирования химической реакции, все же оставалось значительным, хотя и меньшим, чем для ФДЛ такого же масштаба, и лазеры разрушались в ходе экспериментов. В ИХФ проводились как фундаментальные исследования химико-физических процессов в ИХЛ, так и эксперименты с моделями химических лазеров различного масштаба, в которых, в основном, применялись невзрывные источники инициирования химической реакции. В филиале ИХФ в Черноголовке (под Москвой) были созданы первая модель лазера с объемом камеры 300 л и несколько позже, после строительства специального стенда, модель с камерой объемом несколько кубических метров. Однако в этих лазерах использовался недостаточно мощный источник инициирования химической реакции (импульсные лампы-вспышки) и их характеристики оказались невысокими.

Работы по ИХЛ дали много результатов физического характера, но не привели к созданию лазеров, конкурировавших с ФДЛ по энергетике излучения. В середине 70-х годов во ВНИИЭФе и ГИПХе получили развитие также работы по созданию импульсных и импульсно-периодических химических лазеров с инициированием химической реакции электронными пучками. Однако и эти лазеры не удалось масштабировать до энергий, сравнимых с энергией ФДЛ. Велись также работы по исследованию непрерывных химических лазеров (НХЛ), на которые в течение длительного времени делали ставку американцы.

Исследования по НХЛ были предусмотрены и программой «Терра-3», хотя и не имели непосредственной связи с созданием НЭК. Они были инициированы Н.Г. Басовым и осуществлялись кооперацией коллективов ФИАНа (А.Н.Ораевский), ЦКБ «Луч» (В.К.Орлов, А.К. Пискунов), Конструкторского бюро энергетического машиностроения (КБЭМ, главный конструктор В.П.Радковский, руководитель направления – нынешний глава конструкторского бюро Б.И.Каторгин), ГИПХа (В.С. Шпак, М.А.Ротинян), ИХФ (В.Л.Тальрозе) и ряда других организаций. В течение 70-х годов были проведены исследовательские работы, создан и испытан ряд моделей НХЛ мощностью до сотни киловатт. Привлечение к работам коллектива КБЭМ, специализировавшегося на строительстве ракетных двигателей, с которыми НХЛ имеет (в конструктивном отношении) много общих черт, позволило ускорить создание стендовых образцов НХЛ и освоение сложной технологии работы с ними. Использование в этих лазерах такого высокотоксичного вещества, как фтор, требовало строительства специальных стендов, вакуумных систем откачки и средств утилизации отработанных веществ. Надо отметить, что по срав-

нению с программами работ, проводившихся в США, работы по НХЛ в составе проекта «Терра-3» имели более скромные масштабы. Несколько позже Н.Г.Басовым была развернута программа исследований непрерывных иод-кислородных лазеров, продолженная в Филиале ФИАНа, созданном в Куйбышеве (ныне Самаре).

В начале 70-х годов, после появления первых сообщений в СССР и за рубежом о работах по CO_2 -лазерам с использованием электронных пучков для организации устойчивого электрического разряда лазера при высоком (атмосферном) давлении активной среды, в СССР были начаты работы по высокоэнергетическим лазерам этого типа, получившим в программе «Терра-3» название электроионизационных, хотя этот термин использовался не всеми.

Практически одновременно эти же, по существу, лазеры в интересах других программ создавались в научной и конструкторской кооперации ученых, возглавлявшейся академиками А.М.Прохоровым, Е.П.Велиховым и Б.В.Бункиным.

Первоначальные исследования по электроионизационным лазерам, проведенные в лаборатории Н.Г.Басова в группе В.А.Данилычева, позволили оптимистично предсказать возможность достижения высоких энергетических характеристик (КПД, удельный съем энергии с единицы объема) и хорошего оптического качества излучения. Как всегда, прогнозы в этом отношении подтверждались лишь частично. Уже на ранней стадии работ по инициативе Н.Г.Басова с участием одной из авиационных фирм в Куйбышеве, возглавлявшейся И.А.Бережным, и ЦКБ «Луч» были подготовлены проектные предложения по созданию электроионизационного лазера со средней мощностью излучения до 1 МВт. В 1973 г. было принято решение о строительстве в ЦКБ «Луч» экспериментального стендового CO_2 -лазера мощностью 1 МВт, получившего впоследствии условное название ЗД-01. Непосредственным руководителем работ в ЦКБ был Г.Г. Долгов-Савельев, от ФИАНа работы вел В.А.Данилычев.

Вновь на вооружение была взята идея увеличения энергии в тысячи раз по сравнению с достигнутой в то время. Выбор схемы лазера на ранней стадии был непростым. Применялась идеология лазера с замкнутым контуром, в котором рабочее вещество (смесь газов) с помощью мощного вентилятора прокачивалось через оптический резонатор с электрическим разрядом, где шла генерация излучения. Далее нагретый газ поступал в охлаждающее устройство, после чего вновь использовался для работы. Газодинамическая схема такого лазера была сходна с аэродинамическими трубами, давно и широко применявшимися как инструмент для газодинамических авиационно-космических разработок и исследований. Был создан ряд модельных систем с меньшей, чем у лазера ЗД-01 энергетикой, что позволило провести инженерно-физические исследования и проверить как некоторые технические решения, так и достижимые параметры электроионизационных лазеров.

Лазер ЗД-01 отработывался и совершенствовался до конца 70-х годов, и на нем была получена средняя мощность излучения несколько сотен киловатт. Практически параллельно работы по CO_2 -лазерам с электронной пре-дьюнизацией проводились и в других институтах под эгидой А.М.Прохорова и Е.П.Велихова. Значительный вклад в развитие этих лазеров внес В.Д.Письменный, перешедший из МГУ на работу в Филиал Института

атомной энергии в Троицке (под Москвой), который в те годы возглавлял Е.П.Велихов. Там эти лазеры назывались быстропроточными электроразрядными, в отличие от электроионизационных лазеров Н.Г.Басова. Лазеры, разрабатывавшиеся под руководством А.М.Про-хорова и Е.П. Велихова совместно с коллективом НПО «Алмаз» (под руководством Б.В.Бункина), строились по схеме открытого цикла, когда использованный газ выбрасывался в атмосферу. Они лучше подходили для применений, требовавших коротких (несколько секунд) циклов работы.

В 1976 г. лазер ЗД-01 начал действовать. Потребовалось время, чтобы его сложные системы, включая специально разработанные мощные электронные пушки для организации разряда в мощной струе смеси CO_2 и других газов, вышли на характеристики, близкие к расчетным. Однако угловая расходимость излучения этого лазера, как и в случае с ФДЛ, оказалась вначале неудовлетворительной. В дальнейшем лазер ЗД-01 (уже вне рамок проекта «Терра-3») был заменен другим, более совершенным электроионизационным лазером, разработанным под руководством Н.В.Чебуркина. Потребовалось несколько лет работы, прежде чем были найдены способы получения требуемой расходимости и внесены необходимые изменения в схему и конструкцию лазера.

8. Завершение программы «Терра-3» и дальнейшие работы по мощным лазерам

В 1975 г. на Балхашском полигоне продолжалось строительство здания для системы наведения НЭК «Терра-3» и начался монтаж оборудования. В целом темпы строительства на полигоне были невысокими, и, как правило, его реальный ход на несколько лет отставал от директивных графиков. Это, пожалуй, не нанесло существенного вреда программе, т. к. позволяло конструкторам, по крайней мере в отдельных случаях, вносить доработки, а временами и коренные изменения в устройстве и системы НЭК, необходимость в которых постоянно возникала.

К тому времени в руководстве ЦКБ «Луч» произошли изменения. Главным конструктором ЦКБ и НЭК «Терра-3» был назначен Н.Д.Устинов, директором предприятия стал спокойный, рассудительный прагматик и опытный инженер Б.Е.Львов. Изменилось не только руководство, но и название фирмы: она была переименована в ЦКБ «Астрофизика».

Строительство НЭК на полигоне не могло не привлечь внимания США, которые с помощью своей национальной системы спутникового контроля, очевидно, следили за состоянием дел на Балхашском полигоне. В конце 70-х годов в американской печати появилась информация о том, что русские строят на полигоне Сары-Шаган на берегу озера Балхаш лазерную установку для ПРО. Надо сказать, что впоследствии американскими военными и гражданскими энтузиастами СООИ эта правдивая в своей основе информация преувеличивалась и обыгрывалась весьма энергично. Ярким примером этого может служить, например, изданная в 1983 г. в США книга «Лучевая оборона – альтернатива ядерному разрушению», где утверждалось, что русскими «...недавно был испытан усовершенствованный иодный лазер, с помощью которого сбита баллистическая ракета, что продемонстрировало использование лазера в качестве стра-



Рис.2. Николай Геннадиевич.Басов (начало 80-х гг.).

тегического оружия. Разведывательные источники США сообщают, что вблизи советских испытательных площадок разбросаны сбитые головные части, свидетельствующие о том, что русские успешно сбивают баллистические ракеты-мишени» [18]. Рисунок зданий НЭК «Терра-3», выполненный на основе данных космической фоторазведки, приводился в изданиях Министерства обороны и госдепартамента США (см., напр., [19]) и в ряде других аналогичных публикаций. Сведения о советских «успехах» в области лазерного ПРО были, мягко говоря, несколько преувеличенными. А разбросанные вокруг зданий НЭК «Терра-3» обломки вышедшей из строя строительной техники на самом деле свидетельствовали больше о стиле работы строителей, а не об успехах лазерщиков.

Много позже, в 1989 г., когда наступил период разрядки, на Балхашском полигоне с личного разрешения М.С.Горбачева побывала большая группа американских политиков, специалистов и журналистов, которым были показаны некоторые «остатки» НЭК «Терра-3», включая систему наведения лазерного луча и недостроенное здание, в котором по проекту должны были размещаться электроразрядные ФДЛ.

Но вернемся в 1976–1977 гг., когда вокруг проекта «Терра-3» начали сгущаться тучи. После десяти лет работы становилось ясно (в том числе и руководству), что лазерное оружие для поражения ГЧБР на конечном участке их траектории пока создать не удастся. Предполагаю, что ведущие ученые, включая Н.Г.Басова, возглавлявшего научную часть проекта, пришли к этому выводу еще раньше. Было понятно, что энергетика лазеров и технические решения, использованные в НЭК «Терра-3», заведомо не могут обеспечить доставки к цели лазерной энергии, необходимой для поражения ГЧБР. Стали очевидными и трудности, возникающие при прохождении столь мощного излучения через атмосферу. Немалые проблемы выявились в ходе разработки и

изготовления системы наведения луча, к которой, как и ко многим другим частям комплекса «Терра-3», предъявлялись крайне высокие требования по динамике и точности наведения луча, по лучевой прочности оптики и по ряду других характеристик.

Ко второй половине 70-х годов в руках создателей комплекса не было лазерного луча такой мощности, какая требовалась для поражения ГЧБР. Более того, не были ясны и пути достижения требуемой энергетики. Разработчики из ЦКБ «Астрофизика» оказались в техническом тупике: параметры спроектированного и сооружаемого комплекса не позволяли надеяться на поражение ГЧБР. Параллельно выполняемые по инициативе Н.Г.Басова исследования в области лазеров других типов хотя и привели к значительному улучшению энергетических характеристик этих лазеров, однако, как и в случае взрывных ФДЛ, не дали результатов, которые позволяли бы ожидать, что ГЧБР можно поразить лазерным излучением в близкой перспективе и при разумных затратах. Заметим, что американцы в начале 80-х годов, получив разведывательную информацию о работах в СССР по взрывным ФДЛ, также создали такие лазеры с энергией в диапазоне килоджоулей в Лос-Аламосской лаборатории [20] и стали изучать воздействие их излучения на материалы и объекты.

Начатые на полигоне во второй половине 70-х годов испытания системы наведения луча были еще далеки от завершения и сталкивались с большими трудностями, как техническими, так и организационными. При этих испытаниях вместо мощного лазера использовался имитатор – относительно маломощный лазер на стекле с неодимом. В целом работы шли крайне медленно и не дошли до этапа стрельб по реальным ГЧБР (вопреки сообщениям американской печати). К 1977 г. программа «Терра-3», формально существуя, лишилась внутренней динамики и напора, которые были характерны для нее вначале. Появлявшиеся у ученых ФИАНа, ВНИИЭФа, ГОИ и других институтов новые идеи в области лазерной физики и техники часто были оригинальными и двигали вперед науку, но не решали все же проблем «Терры-3».

В целом в ходе научно-исследовательских программ по лазерам, выполнявшихся под руководством Н.Г.Басова не только в рамках проекта «Терра-3», были достигнуты значительные успехи. Были созданы лазеры различных типов с выдающимися энергетическими характеристиками. В ФИАНе было исследовано новое явление в области нелинейной оптики лазеров – обращение волнового фронта излучения. Это крупное открытие позволило в дальнейшем совершенно по-новому и весьма успешно подойти к решению ряда проблем физики и техники мощных лазеров, прежде всего проблем формирования предельно узкого пучка и его сверхточного наведения на цель. Впервые именно в программе «Терра-3» специалистами ВНИИЭФа и ФИАНа было предложено использовать обращение волнового фронта для доставки энергии на мишень.

Все эти достижения не были и не могли быть предусмотрены в НЭК «Терра-3» в том его виде, в каком он был задуман и сложился ко второй половине 70-х годов, хотя и они не обеспечивали решения основной задачи работ – поражения ГЧБР лазерным лучом. Их использование, кроме того, в ряде случаев потребовало бы коренной переработки схемы комплекса и соответственно переделки его оборудования. Уже в 1976–1977 гг., когда начались

испытания системы наведения луча, стало ясно, что использованные в ее конструкции технические решения устарели. Наука двигалась вперед быстрее, чем работали строители и конструкторы НЭК «Терра-3». Поэтому в ходе работ все время появлялись новые, более совершенные, «обнадеживающие» предложения, но все они, как показывал анализ, требовали многолетних исследований и отработок и не укладывались в рамки программы испытаний комплекса НЭК «Терра-3». Предложение, родившееся в коллективах ФИАНа и ВНИИЭФа [21], основывалось на использовании упоминавшейся идеи обращения волнового фронта применительно к взрывным ФДЛ. Предлагалось вначале «подсветить» мишень излучением вспомогательного ФДЛ, а затем усилить отраженное от нее излучение в миллионы раз с помощью более мощного ФДЛ и вернуть луч точно к цели, применив устройства обращения волнового фронта. Это очень интересное в научно-техническом отношении предложение было поддержано научным руководителем ВНИИЭФа Ю.Б.Харитоновым, но оно требовало, с одной стороны, серьезной программы уже начатых экспериментальных и теоретических исследований, а с другой – глубокой переработки схемы НЭК «Терра-3».

Итак, программа «Терра-3» находилась в кризисе, хотя продолжала существовать и финансироваться, под нее было создано специальное предприятие, развивалась производственная база, на нее работали десятки предприятий. Весь этот «маховик» продолжал крутиться и не мог быть разом остановлен. Признать прямо нерешаемость на существовавшем уровне техники поставленной задачи ни ученые, ни конструкторы, ни военные заказчики долго не хотели. Но работы велись уже более 10 лет, а создание лазерной системы ПРО, казалось, отодвигалось все дальше и дальше. Ощущение тупиковости работы (в смысле создания оружия для ПРО) постепенно проникало не только в умы разработчиков, но и становилось понятным «начальству». Кроме того, за эти годы в стране был достигнут значительный прогресс в создании ракетных систем ПРО, начинала действовать первая система ПРО Москвы, и актуальность лазерной системы существенно уменьшилась.

Было ли прекращение программы поражением ученых и конструкторов? Новые знания и понимание проблем лазерной техники и физики, достигнутые в ходе работ, не давали оснований для оптимизма в отношении основной задачи ПРО – поражения ГЧБР. Однако руководство военно-промышленного комплекса страны убедилось в том, что вероятный противник также не сможет решить задачу ПРО путем поражения ГЧБР на конечном участке траектории с помощью лазеров. Научный руководитель лазерной части программы Н.Г.Басов в беседе, проходившей позже, в 1994 г., сказал по этому поводу, что «отрицательный результат – это тоже результат. А лазеры мы продвинули здорово».

Программа «Терра-3» привела к значительному прогрессу в области физики и техники высокоэнергетических лазеров в СССР, дала толчок к созданию принципиально новых технологий, в частности в нелинейной оптике. Эта программа позволила вывести физику и технику мощных лазеров (в первую очередь импульсных и частотно-импульсных) на уровень, превосходящий в то время достижения других стран. В результате теоретических и экспериментальных работ, проведенных в рамках лазерной программы, возглавлявшейся Н.Г.Басовым, удалось

прийти к глубокому пониманию физики процессов в высокоэнергетических лазерах и решить серьезные технические и конструкторские проблемы. До настоящего времени эти достижения в значительной степени остаются фундаментом для развития техники мощных лазеров в России. Были получены результаты мирового уровня также в ряде смежных направлений (распространение лазерных пучков в атмосфере, импульсные источники света, взаимодействие излучения с веществом, химия и технология создания активных сред и компонентов лазеров). Многие научные и технические достижения были использованы в последующих работах, включая работы по инерциальному термоядерному синтезу, продолжающиеся до сих пор. Именно Н.Г.Басов, О.Н.Крохин и их ближайшие сотрудники были пионерами и инициаторами работ по управляемому термоядерному синтезу на основе использования для сжатия дейтерий-тритиевой мишени импульсного излучения высокоэнергетических лазеров. Но это тема уже другой статьи.

Ко второй половине 70-х годов руководство военно-промышленного комплекса, и в первую очередь министр оборонной промышленности С.А.Зверев, систематически знакомясь с очередными докладами ученых о ходе работ, осознало, что задача лазерного ПРО пока не решена. В связи с этим решение о фактическом прекращении программы разрабатывалось и принималось «кабинетным» путем. В Министерстве оборонной промышленности и в ВПК в начале 1978 г. было подготовлено постановление правительства, которое должно было «перевести стрелки» работы с нерешенной проблемы на иную насущную задачу обороны страны. Предусматривалось использование для новой задачи основной части технических достижений в области мощных лазеров, полученных в ходе работ по программе «Терра-3» под общим руководством Н.Г.Басова (а они, безусловно, были весьма солидными). Реализация решения способствовала то обстоятельству, что еще в начале 70-х годов в ЦКБ «Луч» были начаты работы по другим направлениям оборонных и гражданских применений лазеров. Некоторые из них развивались успешно. После серии совещаний и обсуждений состояния работ у министра оборонной промышленности С.А.Зверева было принято решение о прекращении работ по программе «Терра-3», и в 1978 г. с согласия Министерства обороны СССР программа была закрыта.

Итогом программы был колоссальный подъем как научного, так и технического уровня исследований и разработок высокоэнергетических лазеров в СССР. Достигнутые в конце 60-х – середине 70-х годов энергетические характеристики не превзойдены до сих пор. В стране была создана необходимая для обеспечения масштабных лазерных программ передовая конструкторско-технологическая, полигонно-испытательная и производственная база. Были сформированы новые коллективы ученых и инженеров, успешно работающие и в наши дни, расширились лазерные лаборатории в ведущих научных центрах страны в Москве, Ленинграде, Сарове, Новосибирске и во многих других местах. Эти коллективы, наряду с разработками оборонного характера, успешно выполняли и другие программы, инициированные идеями Н.Г.

Басова, например создание мощных лазеров для осуществления термоядерного синтеза с инерциальным удержанием плазмы, чему Н.Г.Басов уделял особое внимание. В ходе изысканий впервые к высокоэнергетическим лазерам были применены идеи нелинейной оптики, в частности обращение волнового фронта. Основной движущей силой этих программ в течение долгих лет были интеллектуальная мощь, неиссякаемая энергия и предвидения Николая Геннадиевича Басова. Научные результаты работ отражены в сотнях публикаций Н.Г. Басова и его сотрудников, перечислить которые в рамках этой статьи невозможно.

Автор приносит глубокую благодарность тем инициаторам и участникам работ, беседы с которыми позволили восстановить ход событий и развитие идей, лежавших в основе работ по программе «Терра-3». Особенно автор благодарен нынешнему директору ФИАНа О.Н.Крохину, стоявшему у истоков этой программы. Полученные от О.Н.Крохина сведения особенно ценны для освещения исторических моментов первых лет развития лазерной программы и ее основных идей. Автор также благодарен участникам программы Н.В.Чебуркину (Москва, ОКБ «Гранат») и В.Д.Урлину (Саров, РФЯЦ «ВНИИЭФ») за ценные замечания по содержанию настоящей статьи.

1. Ломоносов М. *Слово о происхождении света, новую теорию о цветах представляющее* (СПб: изд-во Императорской АН, 1757 г., с. 42).
2. Голубев О.В., Каменский Ю.А., Минасян М.Г., Пупков Б.Д. *Российская система противоракетной обороны (прошлое и настоящее – взгляд изнутри)* (М.: Техноконсалт, 1994).
3. Teller E. *Laser Focus*, № 6, 8 (1983).
4. Прилепский Б.В. В сб. *Лазерные и оптические системы* (М.: ГНЦ РФ «НПО "Астрофизика"», 1994).
5. Белкин Н.Д. *Тезисы докл. Междунар. конф. «Оптика лазеров»* (СПб, 1993).
6. Крохин О.Н. *Частное сообщение* (1994).
7. Раутиан С.Г., Собельман И.И. *ЖЭТФ*, 41, 2018 (1961).
8. Kasper J.V.V., Pimentel G.C. *Appl. Phys. Lett.*, 5, 231 (1964).
9. Аржанов В.П., Борович Б.Л., Зуев В.С., Казанский В.М., Катулин В.А., Кириллов Г.А., Кормер С.Б., Куратов Ю.В., Курапин А.И., Носач О.Ю., Снинцын М.В., Стойлов Ю.Ю. В сб. *Вещество в экстремальных условиях* (Саров: изд-е ВНИИЭФ, 1992, с. 97).
10. Basov N.G., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 3574, 398 (1998).
11. Зуев В.С., Кириллов Г.А. *Тезисы докл. Междунар. конф. «Оптика лазеров»* (СПб, 1993).
12. Крохин О.Н. *Частное сообщение* (1998).
13. Basov N.G., Grasuk A.Z., Zemskov E.M., Kazansky V.M., Izgodin V.M., Kormer S.B., Sinelnikov S.P., Yushko K.V. *Proc SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 3574, 49 (1998).
14. Земсков Е.М. *Тезисы докл. Междунар. конф. «Оптика лазеров»* (СПб, 1993).
15. Земсков Е.М., Синельников С.П., Терещенко В.Н. В сб. *Лазерные и оптические системы* (М.: ГНЦ РФ «НПО "Астрофизика"», 1994).
16. Зарубин П. *Газета «Красная Звезда»*, № 37 (23338), 2 (2001).
17. Косьминов И.С. *Воспоминания о прожитом* (М., 1996, с. 43–50).
18. *Beam Defence an Alternative to Nuclear Destruction* (Fallbrook, CA, USA: AERO Publ. Inc., 1983, ch. 9, p. 77).
19. *Soviet Strategic Defence Programs* (Washington, USA, 1985).
20. Joint Program on Lasers to Aid Countermeasures. *Aviation Week and Space Technology*, 114, 61 (1981).
21. Basov N.G., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 3574, 403 (1998).