

О РАЗВИТИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ В ФИЗИКЕ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕГИСТРАЦИИ ПРОВЕДЕНИЯ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ И ИХ ПОСЛЕДСТВИЙ

В августе 2019 г. исполняется 70 лет со дня испытания первой ядерной бомбы в СССР. Это историческое событие в современной истории страны положило начало созданию ее «ядерного щита». Еще задолго до «Хиросимы», в 1930-е гг. советские ученые, сотрудники Института химической физики АН СССР (ИХФ) Ю. Б. Харитон и Я. Б. Зельдович изложили принципы создания ядерной бомбы. После успешного испытания первой ядерной бомбы в США под кодовым названием «Trinity» в июле 1945 г. Правительство СССР в 1946 г. выпустило Постановление об организации в ИХФ научного отдела в целях разработки теоретических основ ядерных зарядов. По другому Постановлению при ИХФ был создан Спецсектор по изучению теории ядерных цепных реакций и взрывов, а также разработки методов и специальной аппаратуры для регистрации физических процессов, сопровождающих ядерный взрыв. Академик М. А. Садовский был назначен руководителем Спецсектора (а впоследствии и научным руководителем Семипалатинского полигона), в основные обязанности которого входило обеспечение физических измерений параметров взрыва.

Спецсектор, ставший в 1991 г. самостоятельной структурной единицей Академии наук — Институтом динамики геосфер, был участником испытаний практически во всех средах (геосферах): на поверхности земли, под землей, под водой, в атмосфере и космосе.

Как все это начиналось?

В то время ядерный взрыв был тайной за семью печатями, которые нужно было сломать за весьма короткий срок, иными словами определить его физические параметры, масштабы и воздействие. Если взрыв химических взрывчатых веществ (ВВ) оказывал в основном ударное и тепловое воздействия, то ядерный взрыв имел целую гамму поражающих факторов. В связи с этим возникали вопросы, каков диапазон параметров взрыва, что и как измерять, и, следовательно, какие требования должны предъявляться к измерительной аппаратуре?

Директор ИХФ академик Н. Н. Семёнов мобилизовал весь высококвалифицированный коллектив ученых ИХФ на работы в новой для них области науки. Он организовал систематически работающие семинары для обсуждения проблем в этой области и вовлек в них многих видных ученых и инженеров как из числа сотрудников АН СССР, так и из других ведомств и учреждений.

С огромным трудом и напряжением, иногда на основе казалась бы несущественных сведений из газет, случайных наблюдений и событий, связанных с информацией об экспериментах в ядерной физике, удавалось устанавливать важные сведения о качественных и количественных физических характеристиках нового явления — ядерного взрыва.

Выводы и заключения семинаров доводились до сведения специалистов, занимавшихся разработкой аппаратуры для полигонных испытаний ядерных взрывов. На их основе составлялись технические задания на проектирование и изготовление научной измерительной аппаратуры и оборудования испытательного полигона. В Институте была создана производственная база, включающая опытно-конструкторское бюро научного приборостроения (ОКБ ИХФ, 1960 г.), а также производственные оптико-механические цеха для изготовления образцов приборов по проектам, разработанным конструкторами. Классическая схема: явление—теория—эскиз—макет—прибор в короткие сроки дала существенные результаты. Идеи сотрудников, подчас в виде эскизов, разрабатывались в конструкторском бюро с участием технологов и воплощались в виде макета, позволявшего быстро провести измерение нужного параметра взрыва. В результате под руководством М. А. Садовского сформировался творческий коллектив ученых и инженеров, подготовивший в сжатые сроки комплекс измерительных приборов для регистрации всего спектра физических параметров ядерного взрыва, причем некоторые образцы приборов в то время не имели зарубежных аналогов.

Достаточно сказать, что 80% всей аппаратуры, использовавшейся на первом испытании советской бомбы РДС-1 в августе 1949 г., было спроектировано и разработано в Спецсекторе ИХФ, включая регистрирующую аппаратуру для контроля физического процесса взрыва, а также систему автоматического включения всей измерительной аппаратуры. Автором большинства разработок стал выдающийся ученый-приборист Г. Л. Шнирман, «приборист от Бога» по выражению М. А. Садовского.

Специфика ядерного взрыва, отличающегося от взрыва обычных ВВ, предъявляла к разработчикам аппаратуры особые требования. Основные параметры, подлежащие измерению: ударная волна (давление в ударной волне, ее длительность, изменения давления и длительности с расстоянием, сейсмическое действие, световое излучение взрыва (размеры и форма светящейся области, скорость ее развития, спектральный состав, тепловое действие светового излучения); проникающие излучения (мощность потоков нейтронов и гамма-квантов, наведенная радиоактивность и т. п.).

Аппаратурные измерения при ядерных взрывах — это сложная и трудная техническая задача. Регистрация параметров взрыва потребовала совершенно нового подхода к проектированию аппаратуры, организации измерений. Такой подход определялся широким спектром измеряемых физических параметров, кратковременностью некоторых из них, сильным механическим, тепловым и радиационным воздействием, большим диапазоном изменения параметров взрыва. Приборы должны были иметь высокое разрешение, широкое ранжирование (эшелонирование) по чувствительности, прочность и живучесть по отношению к внешним воздействиям. Приборы, расположенные на полигоне в августе 1949 г., были еще по сути дела макетами, но первые подчас оценочные результаты после взрыва уже позволили определить не только основные его параметры, но и наметить дальнейшие пути совершенствования как самого изделия, так и приборов.

Мы не будем останавливаться на конкретных взрывах, о которых подробно можно узнать в таких изданиях, как «Атомный проект СССР», а также «Ядерные испытания в СССР», и, избегая численных характеристик приборов, опубликованных в соответствующих работах, отметим основные применявшиеся при испытаниях методики и приборы, подчеркнем их особенность и оригинальность, и выделим полученные с их помощью важные экспериментальные результаты и их ценность для развития геофизики. Предваряя изложение, кратко опишем особенности развития взрывов в разных средах.

Воздушные взрывы. Вначале при взрыве возникает газообразный светящийся шар (огненный шар — ОШ), создающий световое (тепловое) излучение, гамма-лучи, потоки нейтронов. Вскоре образуется ударная волна. Прямая волна, отражаясь от поверхности земли, создает отраженную волну. На определенном расстоянии от эпицентра они сливаются, образуя головную волну. Остывающий ОШ эволюционирует в горячее облако («термик»), при подъеме которого происходит втягивание с поверхности земли пыли и других частиц, что зависит от высоты и энергии взрыва.

Основным параметром взрыва является его энергия, которую можно определить на основе данных регистрации границы светящейся области ОШ в процессе ее развития. Поэтому особое внимание было уделено оптическим измерениям. Если вначале регистрация велась на подвижный фоточувствительный материал, то в дальнейшем за основу был взят вариант неподвижного фотоматериала и высокоскоростного вращения зеркала с покадровой разверткой, где малое время экспонирования сочеталось с большой длительностью записи. На этом принципе был разработан высокоскоростной фотохронографический регистратор СФР с разрешением во времени 10^{-8} с. Совершенствование СФР шло как в направлении увеличения частоты съемки, скорости развертки, количества кадров, так и в расширении целевых возможностей: для стереосъемки, для регистрации в инфракрасном свете.

К таким приборам можно отнести фоторегистратор ФР-10 и «Лупу времени» ЛВ-1. Прибор ФР-10 был специально спроектирован для регистрации свечения отдельных элементов в начальной стадии первой фазы взрыва относительно старта ядерной реакции.

Прибор с непрерывной (щелевой) разверткой — «Лупа времени» — был построен на принципе коммутации изображений и регистрировал явление со скоростью до 33 млн кадр/с. Успешному созданию такого прибора способствовали исследования в Спецсекторе в области механического привода зеркал, теории их высокоскоростного вращения и специальной электроники для синхронизации. Лупа времени ЛВ-1, представленная на Всемирной выставке в Брюсселе (1958 г.) и в США, поразила специалистов. Удачный выбор оптической схемы и оптимальное конструкторское решение обеспечили длительную жизнь прибору СФР, который в заводском варианте выпускался до 1990 г. под названием ВФУ-1 и отличался от первоначального варианта системой управления и комплектом приставок. Созданная серия скоростных фоторегистраторов различного назначения использовалась для регистрации взрывов в различных средах.

Для измерения ионизирующих излучений взрыва были разработаны различные методики. Так, например, в пионерских работах по изучению потоков нейтронов в полигонных условиях использовались толстостенные фотопластинки, что позволяло определять спектр нейтронов взрыва и отслеживать его изменение с ходом взрывного процесса.

Интересной была методика фотографирования начальной стадии взрыва в гамма-лучах с помощью уникальной камеры-обскуры с преобразованием гамма-излучения в видимое на люминесцентных экранах с последующей киносъемкой процесса.

Классический метод регистрации гамма-излучения содержал фотоумножитель, перед катодом которого находился кристалл нафталина. Под воздействием гамма-излучения кристалл высвечивался и на выходе датчика возникал импульс напряжения, который усиливался.

В дальнейшем был разработан практически безынерционный метод регистрации гамма-излучения, к тому же позволявший измерять излучение в широком диапазоне интенсивности за счет ранжирования датчиков («методика КТ»). В приемнике гамма-излучения (ПГИ) возникал поток электронов с внутренней стенки вакуумированного цилиндра, который усиливался блоком электронных умножителей, расположенных вдоль центральной оси цилиндра. Сигнал достаточно большой амплитуды за счет электронного умножения подавался коаксиальным кабелем на пластины электроно-лучевого осциллографа.

Следует остановиться на специально разработанном измерителе времени (ИВ), который предназначался для измерения интервала времени между иницированием реакции в ядерном изделии и началом самой ядерной реакции (всплеск гамма-излучения). Этот измеряемый параметр был чрезвычайно важен для характеристики испытуемого изделия. Сигнал от иницирования принимался радиоприемником, а импульс от гамма-излучения поступал с ПГИ. Измерители времени получили широкое распространение на полигонах.

Необходимо отметить еще один результат систематических исследований радиации ядерного взрыва. При подготовке к Международным соглашениям о запрещении ядерных испытаний в трех средах О. И. Лейпунским был сделан обширный обзор по потокам гамма-излучения и создаваемого им электромагнитного импульса при воздействии на атмосферу. Это позволило в методы контроля за проведением ядерных испытаний внести методы измерения всплеск гамма-излучения с космических аппаратов и регистрации электромагнитного излучения (ЭМИ) взрыва.

Одним из важных факторов взрыва является его тепловое и световое излучение, которое оказывает поражающее воздействие. Были разработаны измерители интегрального излучения (ИИИ) для оценки плотности потока, для измерения интенсивности светового излучения во времени (дистанционный радиометр ДТР), чувствительными элементами которых были датчики в виде «черного тела». Полевой калориметр (калориметр светового воздействия, КСВ) предназначался для автономной записи максимального значения плотности теплового потока. Его оригинальная модификация работала на принципе теплового изменения размеров тел. Для регистрации во времени теплового воздействия были созданы приборы с тензометрическими чувствительными элементами, в которых изменение поглощенной энергии отображалось в изменении сопротивления. Одним из таких приборов был измеритель теплового излучения «Дальний». Комплексное использование перечисленных приборов позволило определить как параметры поражающего действия взрыва, так и коэффициент выхода его лучистой энергии.

Ударная волна присутствует при взрыве в любой среде. Для измерения давления в ударной волне была создана серия приборов различного назначения, регистрирующих ударные волны наземных, удаленных воздушных ядерных взрывов, а также подземных и подводных взрывов. При проектировании этих приборов принималась во внимание, в особенности, прочностная устойчивость, позволяющая вести дистанционные измерения без риска повреждения.

Определение максимальных величин давления в ударной волне выполнялось двумя методами: прямым измерением величин максимального давления в волне и давления отражения, а также путем измерения скорости фронта ударной волны с последующим вычислением величины давления.

Простейшим измерителем давления в первых опытах был мембранный крешер, чувствительным элементом которого является мембрана, прогибающаяся под действием ударной волны. Но уже в опыте 1949 г. для регистрации давления воздушной ударной волны наземного ядерного взрыва применялись мембранные оптические самописцы (ОС) с записью сигнала на движущуюся пленку с отметчиком времени, работающим от внешних сигналов.

В дальнейшем были разработаны многоканальные регистраторы с индукционным измерителем (ИДИ), позволяющие записывать волну в широком диапазоне изменения давления, а также тензометрические датчики давления ударных волн в грунте (ИДТ).

Для определения воздействия ударной волны на самолет-носитель применялись ОС ускорения (СОС), а также тензометрические датчики ударной волны (ИДТС).

В 1949 г. был разработан и проходил экспериментальную эксплуатацию микробарограф ДР («Дальняя разведка») для регистрации удаленных наземных и воздушных взрывов. Это была одна из первых моделей прибора, предназначенного для дальнего обнаружения наземных и воздушных испытаний ядерного оружия.

При измерениях на различных глубинах остаточных деформаций грунта в результате прохождения ударной волны применялись механические штанговые деформометры; для измерений динамических и остаточных деформаций в целых блоках горной породы были разработаны тензометрические датчики. Для регистрации параметров движения грунта и вибраций инженерных сооружений при взрывах на полигонах были спроектированы и изготовлены маятниковые приборы с магнитоэлектрическими преобразователями с записью на светолучевых осциллографах.

И. П. Пасечником и Д. Д. Султановым был предложен метод определения высоты и мощности ядерного взрыва в атмосфере по сейсмическим данным. Этот метод основан на обнаружении сейсмических колебаний, вызванных тепловым воздействием взрыва на поверхности Земли, и соответствующей связи мощности взрыва и амплитуды сейсмической волны.

После запрещения ядерных испытаний разрабатывалась аппаратура для обнаружения удаленных взрывов с целью контроля. Большое внимание уделялось созданию приборных средств для регистрации сейсмических явлений. Были созданы новые типы сейсмических, акустических и гидроакустических датчиков, усовершенствованы отдельные элементы сейсмических каналов регистрации с целью расширения их частотного и динамического диапазонов. В середине 1960-х гг. была разработана цифровая станция регистрации.

Многое было сделано в Спецсекторе для развития специальной осциллографии быстротекущих процессов. Данные измерений во многих случаях записывались светолучевыми (шлейфовыми) осциллографами. Двенадцатишлейфовый осциллограф записывал сигналы от множества датчиков и являлся составной частью измерительного комплекса полигона. Катодная осциллография была представлена серией однолучевых и двухлучевых катодных осциллографов серии ОК, в которых сигнал поступал непосредственно на пластины, что обеспечивало регистрацию сигналов длительностью до 10^{-8} с практически без искажения.

Важную роль в испытаниях играла автоматизация управления подрывом заряда и регистрирующим комплексом. Для Семипалатинского полигона был разработан автомат пуска АП, выдававший относительно момента подрыва сигналы с заданными интервалами. Дополнительно были созданы устройства для ретрансляции сигналов и доставки их к аппаратурному комплексу. Аналогичный автомат работал и на полигоне Новая Земля, но с большим числом команд. К автоматам дополнительно были спроектированы устройства для ретрансляции сигналов, поступающих с датчиков, и распределения их по потребителям.

За три года после первого испытания было подготовлено около 500 различных измерительных, регистрирующих и кино съемочных приборов, проработавших практически без сбоев. Многие разработки, выполненные в Спецсекторе за время испытаний и после них (осциллографы для записи однократных и быстротекущих процессов, скоростные фоторегистраторы для исследования взрывных процессов, детонации, ударных волн, быстрого горения, искровых разрядов), были востребованы и в других научно-исследовательских организациях. Промышленные серии таких приборов выпускались на советских заводах партиями до 100 штук в год.

Какова значимость проведенных атмосферных испытаний не только для создания атомного оружия, но и для науки (для геофизики, в частности), поскольку они в основном проводились в среде обитания человека?

При воздушных испытаниях установлена эффективность поражающих факторов взрыва: воздушной ударной волны, радиационных потоков гамма-излучения и нейтронов, светового и теплового излучения, от его мощности, расстояния от эпицентра и условий проведения. Эти результаты помещены в соответствующие справочники и методические руководства. На их основе были разработаны меры и способы защиты от действия ядерного оружия, оценены мгновенные и долговременные последствия взрывов.

Была разработана методика регистрации воздушной ударной волны. Предложенные М. А. Садовским зависимости амплитуды ударной волны, импульса фазы сжатия и ее длительности от энергии взрыва и расстояния стали базовыми для определения эффективности механического действия взрыва на окружающую среду, в частности оценки тротилового эквивалента взрыва в атмосфере, из которого следовал основополагающий результат, что только 50% энергии ядерного взрыва расходуется на образование ударной волны. При наземном взрыве тротиловый эквивалент снижается до 35%.

Яков Борисович Зельдович и Александр Соломонович Компанеев развили теорию ядерного взрыва в атмосфере с учетом реальных уравнений состояния, Михаил Александрович Садовский установил фундаментальные зависимости основных параметров ударной волны от энергии взрыва и расстояния.

Сергеем Алексеевичем Христиановичем разработана теория развития ОШ и поднятия грибообразного газопылевого облака («термика») с учетом распределения скорости ветра и температуры по высоте. Практически установленная важная зависимость высоты зависания облака от величины тепловой энергии в источнике используется в настоящее время для оценки энергии вулканических извержений, при крупных пожарах, ударах космических тел и других катастрофических явлениях. Христиановичем также была создана теория нерегулярного отражения слабых ударных волн, что при определенных условиях приводит к значительному, до 5-кратного, увеличению давления в слабой ударной волне взрыва на значительном расстоянии от эпицентра.

При первых испытаниях было обнаружено возникновение мощного ЭМИ в широком диапазоне частот, вызванного комптоновскими электронами, а также токовой системой взрыва. Расчеты А. С. Компанейца показали роль электронных и ионных составляющих токовой системы взрыва в генерации ЭМИ. Теоретические работы Ю. П. Райзера объяснили частотно-амплитудные характеристики ЭМИ высотных взрывов.

По результатам первых взрывов в атмосфере была разработана теория точечного взрыва, сыгравшая важную роль в развитии механики сплошной среды (Л. И. Седов). Теория Л. И. Седова использована в сейсморазведке при решении уравнения распространения упругих колебаний, возбужденных точечным взрывом.

Михаилом Александровичем Садовским был обнаружен эффект теплого слоя — глобальной перестройки газодинамического течения с исчезновением фронта ударной волны взрыва и образованием сильного динамического потока, движущегося вдоль земной поверхности с аномально высокой скоростью. Причина этого явления — предварительный прогрев приземного слоя воздуха световым и тепловым излучением. Это явление экспериментально промоделировал В. В. Адушкин в лабораторных условиях. На основе этого эффекта была разработана новая теория газодинамических течений подобных явлений в природе (Г. И. Таганов). В дальнейшем эта теория нашла широкое распространение в ряде других процессов, касающихся механики сплошных сред.

Методики регистрации ионизирующих излучений оказались востребованными в «Ядерной геофизике», занимающейся разведкой радиоактивных полезных ископаемых.

Подводные взрывы. Возникший при подводном взрыве газовой пузыря выталкивает воду в виде «султана», который генерирует ударную волну в воде и воздухе. Волна в воде, выйдя на границу вода—воздух, создает дополнительную воздушную волну. Образование базисной волны происходит при растекании воздушно-капельной массы султана у его основания, а в процессе его обрушения от него по воде распространяются гравитационные (поверхностные) волны.

При подводных взрывах использовался комплекс методик и аппаратуры для регистрации подводной ударной волны, образования султана, базисной и гравитационной волн, воздушной ударной волны, радиоактивного облака. Развитие взрыва фотографировалось длиннофокусными фоторегистраторами с высоким временным разрешением и с различной скоростью съемки (серии АФА, АКС, СК), гамма-излучение измерялось автоматическим гамма-рентгенометром с записью на шлейфовый осциллограф. В результате был измерен ход интенсивности гамма-излучения в широком диапазоне чувствительности, что позволило дать подробную характеристику гамма-поля при подводных взрывах. Специальные методики позволили оценить концентрацию осколков деления в ближней зоне облака, а также на следе облака взрыва.

Воздушная ударная волна измерялась самописцами давления, волна в воде — пьезоэлектрическими датчиками, в которых чувствительным элементом был турмалиновый индикатор всестороннего сжатия. Сигналы от датчиков записывались на осциллографической установке ПИД. Поверхностные волны регистрировались резистивными датчиками с записью на тензометрических станциях. В ближней зоне взрыва применялись механические измерители давления крешерного типа, показывавшие максимальное давление в воде, и крешерные поршневые импульсомеры.

Аппаратура устанавливалась на кораблях и специальных плотиках. В результате этой работы, были получены ценные материалы по развитию взрыва, образованию полого цилиндрического столба воды — султана.

Подводные испытания дали новые фундаментальные результаты: установлена эффективность поражающего действия подводных ядерных взрывов, получены зависимости параметров ударной волны в воде от энергии взрыва и расстояния. Определен тротиловый эквивалент взрыва, равный 65% от полной его энергии. Установлены закономерно-

сти развития и колебаний газового пузыря подводного взрыва, а также зависимость размеров султана от энергии и глубины заложения заряда. Разработанная С. А. Христановичем теория коротких волн выявила особенности поражающего действия подводного взрыва и позволила также решать задачи взаимодействия ударных волн с различными поверхностями. Были исследованы физические процессы подводных взрывов в мелком водоеме. Определен характер действия подводного взрыва на технику и живые организмы. Большой объем экспериментальной информации об основных параметрах и факторах воздействия подводного взрыва был востребован Военно-Морским Флотом.

Высотные и космические взрывы. Характер развития таких взрывов изменяется с высотой. На высоте более 30 км возникает лишь ОШ, практически отсутствует ударная волна, увеличивается доля световой энергии. При этом возникают мощное электромагнитное и интенсивное рентгеновское излучения. Измерительная аппаратура располагалась в спускаемых на парашютах контейнерах на разных высотах и содержала приборы регистрации давления в проходящей волне (самописцы давления), проникающей радиации (датчики гамма-излучения, потоков нейтронов), светового давления (калориметры). При измерении светового потока использовались вышеупомянутые калориметры КСВ, но с измененной поверхностью датчиков: цилиндрической и шаровой. Тензометрические приборы фиксировали реакцию контейнеров на механическое действие взрыва в ближней зоне, тензодатчики определяли остаточную деформацию.

Наземные комплексы записывали ударную волну (при невысоких взрывах), световое излучение (спектральный состав, интегральный поток, временные характеристики), проникающее излучение. Развитие взрыва фотографировалось длиннофокусными ждущими лупами времени, расположенными на прожекторных платформах, а также аэрофотоаппаратами. В некоторых опытах на контейнеры устанавливались измерители давления от рентгеновского излучения.

Особо нужно остановиться на генерации мощного ЭМИ. Был разработан полупроводниковый цифровой регистратор «УДАР» для записи информации на цифровой магнитофон. Этими приборами впервые были получены цифровые данные на магнитном носителе земных токов, генерируемых ЭМИ.

Высотные взрывы дали уникальный экспериментальный материал как по физическим процессам, сопровождающим взрывы на разных высотах, так и по эффективности поражающего фактора.

Исследовано облако взрыва, его размеры, отражение от него радиоволн. Измерена электронная концентрация в ионизированной области, а также поглощение космического излучения. Кроме того, был обнаружен ряд новых эффектов, оказавших сильное возмущающее воздействие на окружающую среду. Это — образование вокруг Земли устойчивого радиационного пояса из-за захвата геомагнитным полем заряженных частиц, крупномасштабные свечения атмосферы, полярные сияния, возбужденные потоками электронов и их высыпанием вдоль магнитных силовых линий, глобальные магнитогидродинамические колебания в окружающем пространстве за счет расширения плазмы взрыва, возникновение мощного электромагнитного импульса и акустико-гравитационных волн глобального характера.

Было обнаружено появление долгоживущих изменений структуры и электропроводности ионосферы с сопутствующим нарушением радиосвязи на расстоянии нескольких тысяч километров, значительно превышающих область возмущения от взрыва.

Глобальные геофизические эффекты, возникавшие при взрыве в космосе, значительно расширили понимание многих физико-химических и электродинамических процессов, происходящих в системе атмосфера—ионосфера—магнитосфера, и стимулировали проведение широкого круга фундаментальных исследований, продолжающихся в настоящее время.

Подземные взрывы. Образующаяся при взрыве каверна представляет собой сильно оплавленную по поверхности сферическую полость. Эту полость охватывает сферический слой сильного дробления вмещающей породы, за которым располагается протяженная область трещиноватости. При определенных условиях может наблюдаться поднятие поверхности земли над эпицентром или даже прорыв с выбрасыванием грунта в форме столба. Обнаружено дальнее действие взрыва, т. е. наличие локальных сильно выраженных разрушений среды на расстояниях, значительно превышающих размер зоны интегрального разрушения. Последнее представляет особый интерес, поскольку отражает влияние на механический эффект взрыва тектонических разломов.

Регистрация сильных движений грунта, главным образом в ближней зоне подземного (штольневой) взрыва, а также при скважинных опытах, проводилась акселерометрами, чувствительным элементом которых служила плоская мембрана. Акселерометры работали при ускорениях грунта в широком диапазоне. Наиболее перспективным в жестких полевых условиях оказался однокомпо-

нентный скважинный вертикальный акселерометр. В начале 1960-х гг. были разработаны экспериментальные образцы тензодатчиков для измерения давления в полости подземного ядерного взрыва. При проведении штольневых и скважинных камуфлетных взрывов и взрывов на выброс грунта успешно применялись оптические методы. Запись начальной стадии движения грунта велась длиннофокусной камерой ФРД-1, скорость движения в эпицентральной области измерялась фоторегистратором с высоким угловым разрешением (ФРД-2).

Для регистрации деформаций среды, в том числе блочного строения, был разработан ряд деформографов струнного типа, а также наклонометры разных модификаций. С целью определения движений в горных массивах блочно-иерархического строения был создан комплекс оптической и светодальномерной аппаратуры, располагавшийся на глубинных геодезических реперах.

Исследования подземного взрыва вызвали значительный прогресс в геомеханике — науке, изучающей физико-механические свойства горных пород и массивов, их напряженное состояние в условиях природного залегания, процессы деформирования и разрушения, происходящие под воздействием природных и техногенных факторов. Подземный взрыв явился также инструментом изучения внутреннего строения Земли.

Помимо исследования процесса взрыва представляла интерес реакция геологической среды сложного структурно-тектонического строения на мощное воздействие ядерного взрыва с точки зрения энергомассообмена в среде, а также деформационных и релаксационных процессов.

Были построены аналитические функции сейсмического источника подземного взрыва в соли, граните, песчанике, известняке и глине. Определены зависимости функции источника от физико-механических свойств среды, мощности и глубины заложения заряда. Детально изучены основные экспериментальные закономерности формирования сейсмического сигнала при взрыве в подземной полости (сейсмический декаплинг). Оценены экспериментальные значения коэффициента сейсмического декаплинга при взрыве в соли и химических взрывах в известняке, а также зависимость коэффициента декаплинга от частоты.

В результате исследований подземного взрыва был решен ряд задач, имеющих прикладное значение. Так, были определены основные закономерности формирования воронок выброса грунта при крупномасштабных, в частности мощных (ядерных), взрывах, разработаны основные принципы моделирования мощных взрывов на выброс, образования провальных воронок.

Значительным достижением явилось создание специальной аппаратуры для регистрации сильных движений, с помощью которой были определены параметры волны в ближней зоне подземного взрыва. Полученные при изучении сейсмического действия подземных взрывов данные используются сейсмологами до настоящего времени при анализе параметров очагов землетрясений.

С целью определения степени нарушенности горных пород мощными взрывами был разработан уникальный метод, позволивший установить фильтрационные характеристики массива и слагающих его горных пород на разных расстояниях от взрывного источника. Позже метод был с успехом использован в мирных целях при определении нарушенности вмещающих горных пород и рудных тел.

Изучение движений среды, вызванных взрывным воздействием, позволило установить важную закономерность деформирования массивов горных пород, вмещающих разломные зоны, а именно: показать значительную пространственную неравномерность деформаций земной коры, связанную с ее локализацией в зонах влияния нарушений сплошности.

В качестве другого важного результата исследований взрывных движений среды следует отметить объяснение неоднократно наблюдающегося эффекта дальнего действия крупномасштабных подземных взрывов, проявляющегося в нарушении монотонности зависимости величины деформации среды от расстояния до взрывного источника. Необходимость обеспечения радиационной безопасности при проведении подземных взрывов заставила сотрудников Спецсектора разработать и в дальнейшем развить теорию выхода продуктов подземного взрыва в атмосферу на разных его стадиях.

На основе результатов исследования взрывов, модельных и лабораторных экспериментов, а также теоретических изысканий была разработана феноменологическая теория подземного взрыва, на основе которой были предложены методики определения сейсмической и радиационной безопасности, сейсмического контроля испытаний, а также намечена перспектива применения взрывов в мирных целях, нашедшая отражение в специальном докладе МАГАТЭ.

Были решены такие проблемы, как определение степени защищенности и долговременной устойчивости подземных сооружений при крупномасштабных воздействиях взрывного типа, возможности использования ядерных взрывов в мирных целях.

Накопленные сейсмические данные по подземным взрывам используются в настоящее время

в Институте для фундаментальных исследований глубинного строения Земли: от земной коры и верхней мантии до внутреннего ядра.

Данные о временах пробега объемных волн на станциях ЕССН (единой системы сейсмических наблюдений) и результаты других сейсмических наблюдений используются для построения двумерных и трехмерных распределений скоростей в коре и верхней мантии методом сейсмической томографии.

Анализ волн РКiKP, РКPDF и РКPBC позволил выявить существование тонкого высокоскоростного слоя в основании жидкого ядра, наличие дифференциального вращения внутреннего ядра, его анизотропию и отражающие свойства его поверхности, привел к новым подходам в ряде геофизических и геодинамических проблем.

Изучение механических эффектов подземных взрывов имело цель использования их в мирном приложении. Мирное приложение — это сейсмическое зондирование, создание подземных емкостей-хранилищ, водохранилищ, каналов, плотин, интенсификация добычи нефти и газа, ликвидация нефтяных факелов, дробление руды. Всего в период с 1965 по 1988 гг. в СССР было проведено более ста подземных взрывов в мирных целях.

Созданные в Спецсекторе за годы испытаний аппаратура и методики помимо изучения физических полей и механического действия ядерных и химических взрывов использовались в его научной тематике, которая включала в этот период также исследования (как теоретические, так и экспери-

ментальные) взаимодействия с веществом интенсивных потоков излучений в широком диапазоне частот (от светового до микроволнового), по механике горных пород и грунтов, физической газодинамике, прохождению радиоволн в возмущенной атмосфере и ионосфере, распространению сейсмических волн и высокоскоростным ударным процессам.

Получены крупные наблюдательные, экспериментальные и теоретические результаты в области воздействия ядерных и химических взрывов на окружающую среду, разработаны высокочувствительные и широкодиапазонные цифровые сейсмические и другие системы, совместимые с современными ЭВМ, для решения широкого круга задач прикладной и фундаментальной геофизики, созданы оригинальные сенсоры и методики для регистрации напряженно-деформированного состояния горных пород и физических процессов в верхних геосферах.

Результатом испытаний во всех средах стал не только «ядерный щит» страны, но и накопленный богатый экспериментальный и теоретический материал, легший в основу фундаментальных исследований в науках о Земле, которые проводит в настоящее время Институт динамики геосфер РАН (бывший Спецсектор).

Можно с уверенностью сказать, что работы в области испытаний заложили фундамент дальнейших исследований Спецсектора, создавшего новое научное направление — геофизику сильных воздействий.

В. В. Адушкин, А. А. Калмыков