

УДК 539.17

УЧАСТИЕ СПЕЦСЕКТОРА ИНСТИТУТА ХИМИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ АН СССР В ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ ПО «АТОМНОМУ ПРОЕКТУ» (исторический обзор)

© 2023 г. Ю. И. Зецер*

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

**E-mail: zetzer@idg.chph.ras.ru*

В предлагаемой статье, на базе доступных в настоящее время материалов, представлен обзор некоторых работ по ядерным испытаниям в СССР, в которых активное участие принимали сотрудники Спецсектора ИХФ АН СССР, в части разработки уникальных методов измерений и аппаратуры, а также в проведении испытаний и получении результатов.

Ключевые слова: ядерные испытания в СССР, операции K1 ÷ K5, измерения параметров ядерного взрыва, динамика огненного шара, ближняя зона ядерного взрыва.

Для цитирования: *Зецер Ю.И.* Участие Спецсектора института химической физики АН СССР в ядерных испытаниях по «Атомному проекту» (исторический обзор) // Динамические процессы в геосферах. 2023. Т. 15. № 3. С. 103–124. http://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_3_103

Введение

Среди большого числа проектов, реализованных в СССР, особое место занимает «Атомный проект» – программа по разработке, созданию и испытанию ядерного оружия. «Атомный проект» отличается как масштабностью работ, проведенных в трудный послевоенный период (в нем участвовало большое число людей практически всех профессий), так и высоким профессионализмом участников, без которого выполнение столь сложной задачи было бы невозможным.

В числе организаций, активно участвующих в реализации этого проекта, в особенности его начальной стадии, был Институт химической физики АН СССР, возглавляемый академиком Н. Н. Семеновым.

Детальная документальная информация о научном наследии Н. Н. Семенова в советском атомном проекте, составленная на основе архивных документов, хранящихся в архивах Госкорпорации «Росатом», представлена в [Киселев, 2015]. Данная статья, подготовленная и опубликованная на базе открытых в настоящий момент документов и воспоминаний участников работ, посвящена, в основном, приборно-методическому обеспечению экспериментальных исследований, проведенных в процессе осуществления надземных ядерных взрывов.

Приведем несколько документов (термином «реактивный двигатель» для обеспечения закрытости обозначалось название атомной бомбы).

Постановление СМ СССР № 805-327 от 9 апреля 1946 г. Вопросы лаборатории № 2: «...5. Считать необходимым: а) привлечь Институт химической физики АН СССР (директор акад. Н. Н. Семенов) к выполнению заданий Лаборатории № 2 (акад. И. В. Курчатов) расчетов, связанных с конструированием реактивных двигателей, к проведению измерений необходимых констант и подготовке к проведению основных испытаний реактивных двигателей; б) организовать в Институте химической физики АН СССР разработку теоретических вопросов ядерного взрыва и горения и вопросов применения ядерного взрыва и горения в технике. В связи с этим переключить все основные силы Института химической физики АН СССР на выполнение указанных задач...».

Объем работ по организации и проведению испытаний был настолько велик, что Н. Н. Семенов, заведующий специальным сектором ИХФ, поручил курировать эту деятельность своему заместителю

по специальному сектору М. А. Садовскому. Согласно режимным требованиям, испытательный полигон получил условное наименование: полигон № 2, предприятие п/я № 905, Горная станция.

21 апреля 1947 года было принято **Постановление СМ СССР № 1092-313сс/оп Вопросы Горной станции (объекта № 905):** «... 4. Поручить тт. Первухину (созыв), Курчатову, Харитону, Семенову, Садовскому (АН СССР), Антонову, Воронову, Вершинину, Воробьеву (Министерство вооруженных сил), Хруничеву, Звениягину, Александрову и Рожановичу подготовить в 20-дневный срок разработать программу испытания, перечень сооружений объекта 905 и образцов вооружения, подлежащих испытаниям, и представить их Специальному комитету на утверждение... 9. Назначить: – начальником Горной станции Первого главного управления – генерал-лейтенанта артиллерии Рожановича П. М.; – заместителем начальника Горной станции по авиации – генерал-майора Комарова В. Ф.; – научным руководителем Горной станции – т. Садовского М. А. (Институт химической физики АН СССР); – начальником строительства Горной станции – генерал-майора инженерных войск Черных М. И. ...

*Председатель Совета Министров Союза ССР И. Сталин
Управляющий делами Совета Министров СССР Я. Чадаев»*

Проведение каждого ядерного/термоядерного взрыва стоило столь дорого, что для отработки конструкции изделия, определения воздействия взрыва на преграды и окружающую среду в целом возможно было провести лишь минимальное количество экспериментов.

По сути дела, каждый эксперимент являлся уникальным, так как не мог быть повторен при одних и тех же условиях дважды. Кроме того, специфика измерений, проводимых при испытаниях, требовала учета целого ряда дополнительных факторов:

- разнородности измеряемых физических параметров, в частности: ударных волн, оптического излучения и проникающего излучения (нейтронов и гамма-лучей);
- необходимости существенного расширения пределов измерений регистрируемых величин вследствие отсутствия исходных данных об измеряемых процессах и их параметрах;
- наличия очень сильных электромагнитных помех;
- значительного динамического диапазона измеряемых величин;
- необходимости измерений на разных высотах, что потребовало расстановки на территории СССР большого количества измерительных пунктов.

Все эти факторы должны были быть учтены при разработке методов и приборов измерений.

Укажем ряд методик, принципиальных для получения данных о конструкции и взрыве, в разработке которых, а также в создании датчиков и приборов для измерений существенную роль сыграли сотрудники Спецсектора ИХФ.

Исследование тонких характеристик протекания ядерной реакции деления во время взрыва ядерного устройства

Определение динамики развития цепной реакции [Ипаткин, 1997].

Предложение о методе исследования тонких характеристик процесса протекания ядерной реакции деления во время взрыва атомного боеприпаса высказал Н. Н. Семенов 6 мая 1949 г. в письме Ю. Б. Харитону [Киселев, 2015].

Суть метода заключалась в регистрации по времени первичных гамма-лучей деления, количество которых пропорционально интенсивности реакции.

Регистрируемое гамма-излучение попадало на специальный детектор, сигнал с которого по кабелю передавался на пластины осциллографов, находящихся под землей и регистрирующих процесс зависимости количества прореагировавшего вещества как функцию времени. Поскольку закон радиоактивного распада представляет собой кривую, пропорциональную $\exp(-\lambda t)$, по величине t , полученной из экспериментально снятой кривой, определяется λ , отвечающая максимальному

сжатию делящегося вещества. Измерение величины λ данным методом позволяло установить сверхкритичность, фактически имевшую место при испытаниях, и сравнить ее с запроектированной величиной сверхкритичности, что являлось лучшим контролем правильности конструкции изделия.

Если при первом испытании атомной бомбы в 1949 г. исследовались преимущественно процессы, протекавшие после того, как закончилась ядерная реакция в испытывавшемся атомном заряде, то теперь возникла проблема непосредственной регистрации кинетики ядерной реакции в самом изделии (скорости размножения нейтронов в ходе цепной реакции) по гамма- или нейтронному излучению. Сложность задачи обуславливалась скоротечностью процесса деления, длящегося не более десятой доли микросекунды. Требовалось создание аппаратуры, способной зарегистрировать такой быстропротекающий процесс с разрешением по времени не хуже 10^{-9} с. Надежных образцов промышленной аппаратуры с такими параметрами в стране не было.

В 1950 г. усилия лабораторий Б. М. Степанова и Спецсектора ИХФ были направлены на разработку, изготовление и наладку двух комплектов аппаратуры методики измерения кинетики протекания ядерной реакции по гамма-излучению. Одновременно разрабатывались гамма-детектор (впоследствии он стал называться ПГИ – приемник гамма-излучения) и осциллографический регистратор ВО-20. Летом 1951 г. два комплекта аппаратуры были вывезены на Семипалатинский полигон. Впервые получены две осциллограммы «хвостика» экспоненты, отражающей кинетику ядерной реакции в изделии. Работа была отмечена Сталинской премией.

После успешных измерений при испытании в 1951 г. было принято решение о дальнейшем совершенствовании аппаратуры с применением вышеуказанной методики измерений. В лаборатории Б. М. Степанова приступили к разработке новых модификаций гамма-детекторов серии ПГИ, а в лаборатории А. И. Соколика – нового осциллографического регистратора ОК-19.

Дальнейшее повышение точности методов градуировки детекторов гамма-излучения в лабораторных условиях и расширение границ выходных токов гамма-детектора ПГИ обеспечили возможность при испытании сложного изделия измерить и построить графически функциональную зависимость величины гамма-потока во времени и, следовательно, определить коэффициенты размножения нейтронов в каждом из компонентов, а также выявить характер переходной области между этими процессами.

Кроме основного назначения – записи кинетики реакции («быстрый процесс»), была обеспечена возможность измерения временных интервалов между пиками гамма-излучения в сложных изделиях. Для этого использовался осциллограф ОК-19 с замедленной на полтора-два порядка разверткой. Впоследствии эта методика «Тау-гамма-гамма» использовалась во многих испытаниях.

В разработке, изготовлении, градуировке различных модификаций детекторов участвовали Н. В. Никитина, Л. И. Андреева, Л. В. Артеменкова, И. С. Ипаткин, К. И. Мухин, В. А. Егоров, К. В. Микеров и другие. В создание осциллографа ОК-19 основной вклад внесли А. И. Соколик, К. К. Чарнецкий, А. Г. Фомичев.

Измерение времени между началом инициирования в ядерном устройстве и началом ядерной реакции [Голлер, 1997].

Знание данного времени весьма важно для того, чтобы определить, не произошел ли преждевременный взрыв по вероятностным причинам. Без знания этого можно ошибочно отнести всегда существующую принципиальную возможность неполноценного взрыва на счет якобы плохой конструкции.

В 1950 году перед группой П. В. Кевлишвили¹ была поставлена задача создания приборов для измерения интервалов времени между импульсами, характеризующими протекание определенных физических процессов при испытании ядерного оружия в полигонных условиях. Необходимо было измерять интервал времени между началом инициирования в ядерном устройстве и началом ядерной реакции (γ -излучения). Первый сигнал, начало инициирования, передавался по радиоканалу, второй – вырабатывался специальным датчиком γ -излучения. Таким образом, установка измерителя

¹ Лаборатория электроприборов Г. Л. Шнирмана в середине 50-х годов разделилась на четыре лаборатории. Были образованы лаборатории Г. Л. Шнирмана, А. И. Соколика, П. В. Кевлишвили и А. С. Дубовика.

времени (ИВ) содержала радиоприемник, датчик γ -излучения и регистратор интервала времени между сигналами (электрические импульсы). Поскольку аппаратура содержала радиоприемник, проведение измерений было уязвимым для помех. В связи с этим, к регистрирующей аппаратуре предъявлялось требование максимально возможной помехозащищенности. В силу важности измерений и их уязвимости от помех измерения дублировались. Дублирование шло по двум направлениям: первое – применение приборов, построенных на разных принципах измерения; второе – дублирование однотипных приборов. При этом приборы располагались в разных сооружениях, и именно таким образом, чтобы управление приборами (включение, открытие затворов фотоприставок и пр.) осуществлялось по разным каналам автоматики полигона.

Для решения данной задачи в 1950–1951 гг. были разработаны измерители времени ИВ-1 и ИВ-2. В измерителе времени ИВ-1 сигналы, интервал времени между которыми нужно было измерить, подавались по двум усилительным каналам: радиоканал и канал датчика. С выхода усилителей сигналы подавались на вертикально отклоняющие пластины двух электроннолучевых трубок (ЭЛТ). На горизонтально отклоняющие пластины обеих ЭЛТ подавались развертки, на которые, в свою очередь, подавались амплитудные метки времени с частотой 500 кГц (период – 2 мкс), стабилизированной кварцевым резонатором, что обеспечивало точность отсчета ± 0.2 мкс. Изображение с экрана ЭЛТ фотографировалось на пленку шириной 35 мм, которая двигалась в направлении, перпендикулярном движению луча. Движение пленки осуществлялось фотоприставкой, в которой пленка перематывалась с подающей катушки на приемную. На катушку помещалось 120 м пленки. Скорость движения пленки достигала 30 м/с, полное время перематки пленки (время регистрации) составляло 5 с.

Измеритель времени ИВ-2 – прибор ждущего типа: первый проходящий импульс запускал «длинную» и «короткую» развертки двух ЭЛТ. Длительность «длинной» развертки составляла 200–300 мкс, «короткой» – 10–12 мкс. На развертки подавались метки времени: на «длинную» развертку наносились метки времени частотой 200 кГц ($T_{м1} = 5$ мкс), на «короткую» – частотой 200 кГц и 1 МГц ($T_{м2} = 5$ и 1 мкс). Частота меток времени – кварцеванная; погрешность измерения интервалов времени составляла ± 0.1 мкс. Изображение с экрана осциллографа также фотографировалось с помощью фотоприставки, состоящей из откидного тубуса и фотоаппарата «Зоркий» (или ФЭД). Конструктивно измеритель времени ИВ-2 был выполнен аналогично прибору ИВ-1.

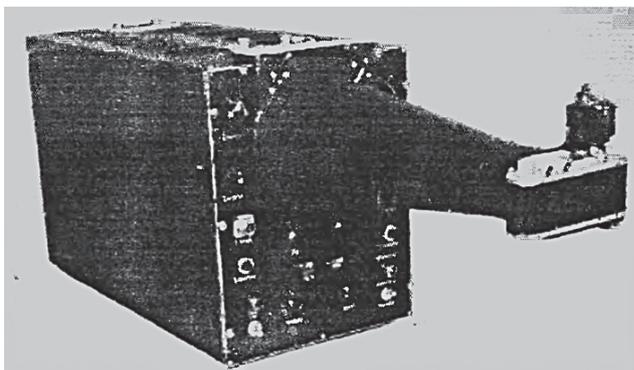
Так как в измерителе времени ИВ-1 электронная развертка работала непрерывно, а движение пленки начиналось с приходом команды автоматики поля, в отношении помехоустойчивости ИВ-1 имел несомненное преимущество перед прибором ИВ-2, у которого запуск развертки осуществлялся от радиосигнала. В то же время прибор ИВ-2, по сравнению с измерителем времени ИВ-1, имел более высокую (примерно в два раза) точность измерения.

В 1950 г. был разработан измеритель времени ИВ-13. Этот прибор имел спиральную развертку и предназначался для измерения интервала времени между двумя сигналами, поступающими на отдельные входы. Максимальный интервал измеряемого времени составлял 300 мкс, точность измерения ± 0.1 мкс. Интервал времени измерялся по длине спирали: первый импульс запускал (высвечивал) спиральную развертку, а второй сигнал гасил луч на экране ЭЛТ. При этом сами импульсы не регистрировались. Для увеличения точности отсчета на спиральную развертку наносились яркостные метки времени. Частота меток времени, стабилизированная кварцевым резонатором, составляла 1 МГц. Серия приборов ИВ-13 и ИВ-13М была изготовлена в экспериментальных мастерских ИХФ. С 1951 г. приборы ИВ-13М выпускались серийно на заводе в г. Вильнюсе. Фотографии измерителей времени ИВ-11 и ИВ-13М приведены на рис. 1.

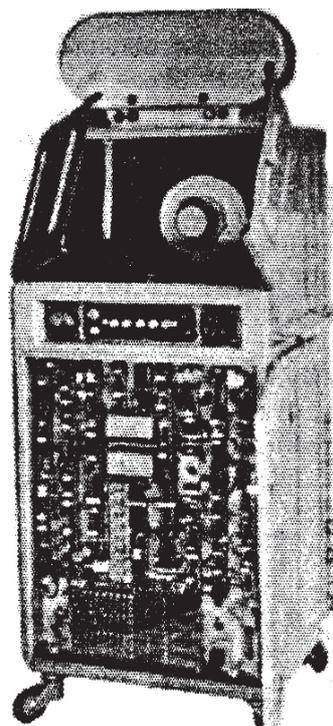
Датчик излучения, разработанный в 1950 г., содержал фотоумножитель, перед катодом которого находился кристалл нафталина. Под воздействием γ -излучения кристалл высвечивался, и на выходе датчика возникал импульс напряжения, который подавался на вход измерителя времени. Работу с датчиком проводили Е. Э. Голлер и В. Н. Князев; руководителями разработки были П. А. Ямпольский и П. В. Кевлишвили. Примерно в 1952–1954 гг. Б. А. Точилин экспериментально определил время задержки сигнала в датчике.

Рис. 1. Приборы, разработанные для использования в методике измерения времени между импульсами при ядерных испытаниях на полигоне: а) ИВ – 13М, б) ИВ – 11

а)



б)



Разработку электронной схемы прибора ИВ-1 выполнил Е. Э. Голлер. Работы по фотопроставке к этому прибору проводил И. П. Усенко, разработку электронной схемы прибора ИВ-2 выполнил Ю. А. Дрожбин, работу по автоматическому управлению (включение питания, включение фотопроставок, открытие затворов, выключение) приборов ИВ-1 и ИВ-2 осуществлял В. Н. Князев. Руководил всеми перечисленными работами П. В. Кевлишвили. Конструкторскую проработку приборов ИВ-1 и ИВ-2 провели в КБ, изготовление – в экспериментальных мастерских, наладку – в лаборатории (Е. Э. Голлер и Ю. А. Дрожбин при участии И. П. Усенко и В. Н. Князева). Было изготовлено по два прибора ИВ-1 и ИВ-2.

При проведении измерений на полигоне в 1951 г. аппаратура ИВ была установлена в двух сооружениях, расположенных от центра взрыва на расстоянии 1000 м и глубине примерно 4–6 м. Стены и потолки сооружений внутри были обшиты стальными листами; спуск осуществлялся через люк, который закрывался крышкой и запирался на обычный амбарный замок. Сооружения были длинными и имели два неодинаковых по длине отсека: в одном располагалась аппаратура ИВ, в другом, более длинном, аппаратура КТ. Аппаратура ИВ была установлена в сооружении у стены, обращенной к башне, под стальными вертикальными трубами, которые выходили на поверхность земли. Трубы для датчиков γ -излучения, со стороны поверхности земли, заканчивались фланцами. Датчик γ -излучения имел жгут проводов длиной примерно 8–10 м, прокладываемый через трубу. После прокладки жгута труба засыпалась песком. Сверху датчик γ -излучения закрывался массивным стальным цилиндрическим корпусом. Недалеко от датчиков γ -излучения устанавливались радиоприемные антенны.

Для контроля работы γ -тракта (датчик-кабель-усилитель измерителя времени) в датчике перед катодом фотоумножителя устанавливалась неоновая лампочка. Поэтому установка кристалла нафталина перед катодом фотоумножителя производилась в последнюю очередь, после проведения генеральной репетиции.

Операция с выкладыванием ВВ и установка электродетонаторов в аппаратуре производилась в последнюю очередь, незадолго до проведения опыта, когда на полигоне уже почти не было людей. Эту операцию осуществлял П. В. Кевлишвили.

К ядерным испытаниям 1954 г. группа во главе с П. В. Кевлишвили на замену приборам ИВ-1 и ИВ-2 разработала новые измерители времени – ИВ-8 и ИВ-4 соответственно. Принципы работы новых приборов не отличались от старых разработок. Но схемно и конструктивно приборы

были полностью переработаны. Оба прибора по конструкции были однотипными: вертикальная стойка на колесах. Конструкция прибора обеспечивала легкий доступ ко всем элементам схемы: фотоприставка снималась, индикаторный блок либо вынимался, либо после открытия фронтальной дверцы легко откидывался на петлях наружу. Все это значительно облегчало установку приборов в защитные сооружения полигона, а также их эксплуатацию. Увеличена была точность отсчета временных интервалов примерно в два раза (точность отсчета в приборе ИВ-4 составляла ± 0.05 мкс, а ИВ-8 – ± 0.1 мкс).

К 1960 г. в лаборатории П. В. Кевлишвили вместо приборов ИВ-4 и ИВ-8 были разработаны измерители времени ИВ-10 и ИВ-11. Принципиальное построение схемы прибора ИВ-10 было таким же, как измерителей времени ИВ-2 и ИВ-4, а прибор ИВ-11 был построен на тех же принципах, на которых были построены измерители времени ИВ-1 и ИВ-8. Но схемно оба прибора были выполнены совершенно по-другому, на новой элементной базе, и имели существенно меньшие габариты и массы. В приборе ИВ-10 точность измерения была значительно повышена и составляла ± 0.02 мкс

Разработку принципиальных схем этих приборов (они использовались также при подземных ядерных испытаниях) проводил А. М. Толмачев при участии В. Н. Князева, руководителем разработок был П. В. Кевлишвили.

Оценки энергии взрыва по давлению на фронте ударной волны

[Ядерные испытания, 1997а].

Затухание с расстоянием избыточного давления на фронте проходящей ударной волны для наземного взрыва определяется в диапазоне давлений $10^2 \text{ кг/см}^2 > P_\phi > 0.1 \text{ кг/см}^2$ интерполяционной формулой М. А. Садовского:

$$P_\phi = A(q^{1/3})/R + B(q^{2/3})/R^2 + C(q/R^3),$$

где P_ϕ – избыточное давление на фронте волны, q – энерговыделение взрыва, R – расстояние до точки регистрации. Коэффициенты A , B и C представляют собой значения, получаемые статистической обработкой результатов экспериментальных данных, и неоднократно корректируются по мере накопления информации.

В ходе организации измерений с одной стороны было необходимо обеспечивать надежную регистрацию избыточного давления, с другой – исключить возможные искажения, связанные с условиями распространения ударной волны: при высоких давлениях искажения фронта ударной волны могут быть связаны с влиянием разогрева приземного слоя воздуха в условиях поглощения светового излучения взрыва грунтом; при малых давлениях существенное значение может играть ветер.

Для наземных взрывов получил развитие метод определения энерговыделения по измеряемой величине импульса давления $J = \int p dt$ в течение времени, пока избыточное давление $p > 0$. В случае воздушного взрыва ударная волна, достигнув поверхности, отражается от неё, в результате чего давление у поверхности увеличивается по сравнению с давлением падающей волны. На некотором расстоянии от эпицентра при малых углах падения ударной волны α существует зона регулярного отражения – отраженная ударная волна пересекается с падающей волной на поверхности. Начиная с некоторого предельного значения угла α , характерного для данных условий, отраженная волна пересекается с падающей выше поверхности, а в промежуточной зоне распространяется третья, так называемая, головная волна. Таким образом, при воздушном взрыве приборы, расположенные на поверхности, будут регистрировать или давление отражения, или давление в головной ударной волне, а не давление в падающей волне.

Важным является вывод о том, что все последовательные стадии распространения ударной волны воздушного взрыва обладают свойствами подобия, то есть предельный угол α и избыточное давление на поверхности одинаковы для равных приведенных высот взрывов $H_{np} = H/q^{1/3}$ и эпицентральных приведенных расстояний $R_{np} = R/q^{1/3}$.

В разработке методов и измерения параметров ударной волны принимал участие большой коллектив специалистов, которым руководил (на первых ядерных испытаниях) М. А. Садовский. Среди непосредственных участников этих работ необходимо отметить Ю. В. Кондратьева, Е. И. Забабахина, Г. А. Пырьева.

Определение энерговыделения по данным измерений параметров светящейся области.

Разработка и создание высокоскоростной фоторегистрирующей аппаратуры

Определение энергии ядерного взрыва по данным измерений параметров светящейся области основано на том, что в зоне сильной ударной волны, распространяющейся в атмосфере, фронт которой представляет собой границу светящейся области (огненный шар (ОШ)), заключена практически вся энергия взрыва (за вычетом небольшой доли энергии, уносимой гамма-нейтронным излучением и небольших потерь на поток светового излучения) [Ядерные испытания, 1997б].

Идеи определения энергии ядерного взрыва (эквивалента) на основе экспериментальных данных о скорости ударной волны D_ϕ и ограниченному ею объему V_0 были сформулированы Я. Б. Зельдовичем.

Существовало несколько методов определения энергии ядерного взрыва:

- по скорости изменения фронта ударной волны (границы ОШ) на основе данных скоростной фото регистрации границы светящейся области в процессе ее развития (авторы Л. А. Франк-Каменецкий и Н. А. Попов);
- по преобразованию зависимости энергии взрыва от скорости фронта волны в зависимость энерговыделения E от радиуса фронта ударной волны R_ϕ и времени его достижения t (авторы Л. А. Франк-Каменецкий и Н. А. Попов);
- по зависимости энерговыделения взрыва E с температурой фронта ударной волны T_ϕ и объемом V_0 , охваченном ударной волной;
- по экспериментально установленному факту уменьшения до определенного предела потока излучения области взрыва в процессе ее развития, этот момент характеризовал окончание первой фазы развития светящейся области (среди авторов Я. Б. Зельдович и Ю. П. Райзер);
- по регистрации максимальной интенсивности светового потока на второй стадии развития светящейся области (авторы – специалисты институтов МО).

Основопологающим условием использования указанных методов измерения энерговыделения ядерного взрыва являлось наличие соответствующей оптической аппаратуры. Разработка такой оптической аппаратуры для регистрации параметров ОШ была поручена лабораториям Спецсектора ИХФ АН СССР (Г. Л. Шнирман, П. В. Кевлишвили), в дальнейшем для этих целей была организована лаборатория оптики, руководителем которой был назначен А. С. Дубовик, в которых создавались основные образцы специальной фоторегистрирующей аппаратуры, обеспечившие испытания ядерных зарядов, начиная от первых опытов в атмосфере до последних подземных взрывов. Фактически эта группа лабораторий стала в тот период ведущим центром в стране по созданию высокоскоростной фоторегистрирующей аппаратуры. Два первых образца высокоскоростных фоторегистраторов типа СФР-2М, в том числе за № 1, разработанных и изготовленных в ИХФ, были отправлены в Арзамас-16 и успешно использовались для отработки конструкции первой атомной бомбы.

Камера СФР-2 имела частоту съемки 2.5×10^5 – 2.5×10^6 к/с, размер кадра – 10 и 5 мм, количество кадров – 60 и 120. Разрешение во времени составляло 2×10^{-8} с при максимальной скорости развертки 3750 м/с; поле зрения от $14'$ до $2^\circ 15'$.

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. Идея коммутации изображения была заложена также и в приборе ЛВ-2 («лупа времени») с частотой съемки до 7.5×10^5 к/с, разработанном в Спецсекторе, и применявшемся при испытаниях водородной бомбы в ноябре 1955 г.

Для полевых испытаний было создано несколько образцов приборов, которые увеличивали отдельные параметры СФР: частоту съемки, скорость развертки, количество кадров. К таким приборам можно отнести фоторегистратор ФР-10 с разрешением во времени 10^{-8} с и ждущую лупу времени, ЖЛВ-2, имеющую частоту съемки до 4.5×10^6 к/с. Прибор ФР-10 был специально спроектирован для регистрации свечения отдельных элементов в начальной стадии первой фазы взрыва относительно начала ядерной реакции.

Для определения размеров ОШ во времени была создана скоростная камера СК-2, позволяющая получать кадры с большой скважностью. Камера позволила получать до 2500 к/с при скважности – 40. Время экспонирования при этом составляло 10^{-5} с. На пленке шириной 100 мм получалось до 60 снимков при вертикальном размере кадра 40 мм. Одновременно на пленку впечатывались кварцованные метки времени от искрового разрядника. Камеры использовались в основном для работы с землей.

Для наведения на заданный квадрат неба приборы снабжались специальным оптическим угломерным инструментом. Предусматривалась также возможность установки камеры такого типа на самолет. Усовершенствование этих камер в направлении увеличения размера кадра и угла поля зрения было реализовано в приборах СК-3, СК-4, СК-3Ш и СК-Ш. Но они появились уже перед запрещением испытаний в атмосфере. Камеры СК-3 использовались также во время проведения высотных взрывов и для регистрации начальной стадии развития ОШ при мощных взрывах химического ВВ. Основное определение тротилового эквивалента при воздушных взрывах было выполнено указанными приборами.

Оптические методы также успешно применялись при проведении штольневых и скважинных камуфлетных взрывов и взрывов на выброс грунта. К факторам, усложнявшим съемку в этих условиях, относятся воздействие сейсмозрывных волн и необходимость проведения съемки с больших расстояний, что накладывало ограничения на точность съемки из-за значительного воздействия турбулентности атмосферы. Для регистрации скорости движения в эпицентральной области был разработан фоторегистратор с высоким угловым разрешением ФРД-2, который применялся для оценки тротилового эквивалента подземного взрыва. Методы спектральных измерений развития «огненного шара» разработали специалисты Государственного оптического института (г. Ленинград).

Наблюдения при высотных и космических ядерных взрывах в операциях ЗУР 215, Гром, Гроза, К-1, К-2, К-3, К-4, К-5

Учитывая сложность и комплексность процессов развития как собственно термоядерной реакции, так и взаимодействия выделившейся при этом энергии с элементами конструкций и окружающей средой, регистрация происходящих явлений должна происходить в широких временных и пространственных масштабах.

1. Специфика измерений при разных временных масштабах

Что касается *временных* масштабов, то, условно, полный процесс развития взрыва можно разбить на несколько фаз [Сборник ..., 1962]:

- *начальная* фаза, в течение которой происходит образование светящейся области, представляющей собой тепловую волну и быстрое ее расширение; начальная фаза заканчивается выходом на поверхность тепловой волны фронта сильной ударной волны;
- *первая* фаза, в течение которой происходит расширение светящейся области, поверхность которой совпадает с фронтом ударной волны; это расширение сопровождается быстрым понижением температуры поверхности, которая достигает своего минимального значения в момент отрыва ударной волны от светящейся области;
- *вторая* фаза, в течение которой наблюдается свечение воздуха и вещества конструкции во внутренней области за фронтом ударной волны;
- *в конце второй фазы* из постоянно охлаждающейся светящейся области возникает облако взрыва, которое начинает подниматься вверх, сносится ветром, а затем рассеивается.

Разделение развития светящейся области на фазы, которое зависит от высоты взрыва, возможно только на основе анализа изменения размеров светящейся области во времени, который, в свою очередь, позволяет установить время выхода ударной волны на поверхность светящейся области и ее последующего отрыва. Оценки показали, что характерные времена начальной фазы составляют десятки микросекунд, первой фазы – миллисекунды, второй фазы – секунды, образования и развития облака – минуты. Указанные оценки легли в основу использования измерительной аппаратуры.

1.1. Измерения геометрических характеристик и яркостной температуры светящейся зоны в начальный период развития взрыва [Программа, 1959; Гарнов, 1997; Шнирман, 2003]

Фоторегистратор ФР-10МК (рис. 2а) обеспечивал развертку во времени изображения светящейся области взрыва. Использовался для исследования раннего свечения в самом заряде при ядерном взрыве в 1950-х годах. Разрешение во времени – 10^{-8} с, длительность записи – 30 мкс.

Высокоскоростная фотокамера ЛВ-2 (рис. 2б) имела частоту съемки до 750000 кадров в секунду (аппарат давал возможность получить до 60 кадров); фокусное расстояние – 800 мм, угол поля зрения $2^{\circ}40' \times 1^{\circ}20'$. Регистрация производилась на фотопленку шириной 100 мм.

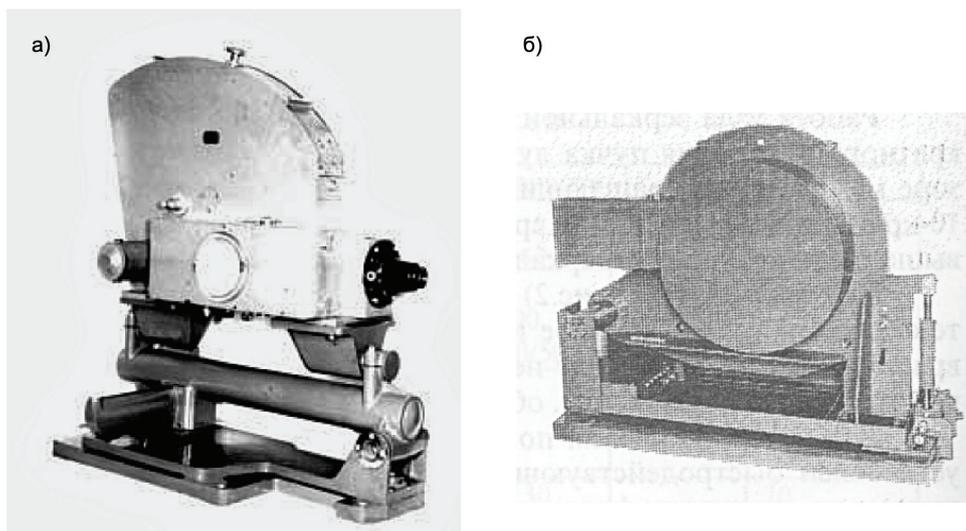


Рис. 2. Высокоскоростные камеры, использованные при высотных взрывах для измерения начальной стадии динамики светящейся зоны: а) ФР-10, б) ЛВ-2

Высокоскоростная фотокамера ЖЛВ-1 с частотой съемки 350000 кадров в секунду и длительностью регистрации до 330 мкс; фокусное расстояние от 90 до 460 мм; размер кадра 5×5 , 10×10 и 15×15 мм. Регистрация производилась на фотопленку шириной 35 мм.

Прецизионная скоростная фотокамера СК-3М с частотой съемки от 1000 до 2500 кадров в секунду, с временами экспонирования каждого кадра от 25 до 13 мкс. Длительность регистрации от 20 до 50 мс; количество кадров – 40; фокусное расстояние аппарата 200, 350, 600, 1050 мм. Регистрация производилась на перфорированную аэропленку шириной 190 мм.

Скоростная фотокамера ФП-36 с частотой съемки 5000, 10000 и 25000 кадров в секунду. Длительность регистрации соответственно – 9, 19, 45 с; объективы сменные с фокусным расстоянием 75 и 500 мм; размер кадра 10×10 мм. Регистрация производилась на аэропленку шириной 320 мм.

1.2. Измерения геометрических характеристик развития взрыва в более поздние времена

Киносъёмочный аппарат АКС-2 (рис. 3б) с частотой съемки до 48 кадров в секунду. Объективы сменные с фокусным расстоянием – 35, 50, 135 и 1500 мм; размер кадра 18×24 мм.

Аэрофотоаппараты АФА-40, АФА-33/20, АФА-42/50, АФА-БАФ/40, АФА-33/20 (рис. 3а) с частотой съемки 1 кадр в 3 секунды; фокусное расстояние от 200 до 1800 м.

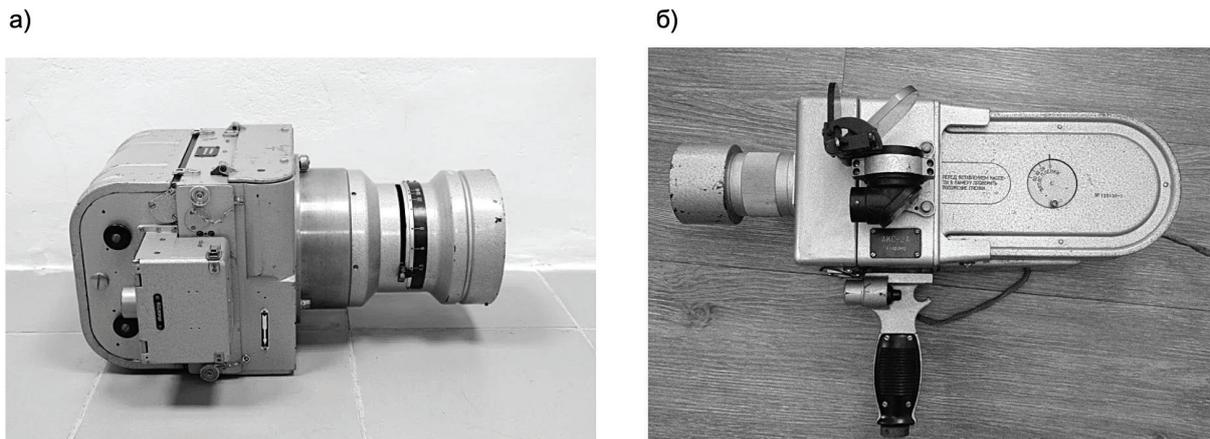


Рис. 3. Аэрофотоаппараты для регистрации внешней картины развития взрыва на поздних временах: а) АФА БАФ-40, б) АКС-2

1.3. Измерения спектрального состава излучения светящейся области взрыва и рекомбинационного послесвечения атмосферы [Сводный отчет, 1963]

Высокоскоростной светосильный кварцевый спектрограф СП-75, который регистрировал спектр в видимой и ультрафиолетовой областях (от 2300 до 7000 Å). Максимальное временное разрешение – 10^{-7} с, дисперсия – 40 Å/мм. Относительное отверстие – 1/4. Регистрация производилась на фотопленку шириной 35 мм. Аппарат позволял изучить как спектральный состав излучения, так и распределение энергии по спектру, а также характер изменения интенсивности отдельных линий во времени.

Высокоскоростной спектрограф ФР-10 МКС для видимой области спектра (4000–7000 Å). Аппарат имел разрешение во времени до 2×10^{-8} с, среднюю дисперсию – 400 Å/мм и светосилу 1/50. По данным аппарата производился анализ спектров в самой начальной стадии развития взрыва (длительность регистрации – 30 мкс).

Спектрограф ИСП-54 для видимой области спектра, с разрешением во времени до 10^{-7} с, средней дисперсией – 200 Å/мм, светосилой – 1/40. Спектрографы этого типа позволяли определять цветовые температуры и проводить спектральный анализ излучения в начальный период развития взрыва. Длительность записи до 2 мс.

Спектрографы ИСП-57 для ультрафиолетовой области спектра и ИСП-58, 59 для видимой области спектра. Эти спектрографы использовались для изучения спектрального состава в более поздние времена развития взрыва. Длительность регистрации – несколько секунд; разрешение во времени до 2×10^{-5} с при средней дисперсии – 200–20 Å/мм и светосиле – 1/15.

Спектрограф ИСП-51, имеющий кассету с прерывистым движением пленки, который позволял производить регистрацию спектров свечения воздуха через заданные промежутки времени с экспозицией 0.7 с; средняя дисперсия 40 Å/мм, светосила – 1/5.

Кварцевый спектрограф ИСП-28 использовался для регистрации спектров рекомбинационного свечения в телесном угле 4° с временем экспонирования 3 с; средняя дисперсия – 70 Å/мм, светосила – 1/15.

Кварцевый спектрограф ИСП-55 со сканирующей приставкой использовался для исследования спектрального состава рекомбинационного свечения в пределах угла $\pm 3^\circ$; средняя дисперсия – 70 Å/мм, время экспонирования от 10^{-2} с до 2 с, светосила – 1/15.

1.4. Определение параметров светового излучения, достигающего поверхности земли [Гарнов и др., 2004; Адушкин и др., 2006]

Фотоэлектрический регистратор светового излучения КИЭ-2 использовался для определения интенсивности излучения в широком спектральном интервале длин волн (от 0.3 до 3 мкм). В приборе

имелось два канала, один из которых с разрешением во времени 3×10^{-5} с и длительностью записи до 15 мс и второй – с разрешением во времени 3×10^{-3} с и длительностью записи до 10 с. Максимальная чувствительность по первому каналу – 1.5×10^{-4} кал/(см² с) и по второму – 4×10^{-5} кал/(см² с); поле зрения прибора – 6°.

Полупроводниковый термоэлектрический калориметр ПТЭК-М позволял регистрировать полный световой импульс, достигающий поверхности земли, в диапазоне длин волн 4000–10000 Å. Воспринимающий элемент прибора – медные зачерненные пластинки с полупроводниковыми термопарами. Возникающая термоэдс подавалась на микроамперметр М-95, показания которого регистрировались кинокамерой АКС-2. Диапазон чувствительности ПТЭК-М составлял 10^{-4} – 10^{-2} кал/см²; поле зрения прибора 70°.

Измеритель прямого светового излучения (ИПСИ) позволял регистрировать световой импульс, достигающий поверхности земли. Воспринимающим элементом служила зачерненная медная пластинка с термопарой. В приборе применялась телескопическая оптическая система для концентрации световой энергии. Термоэдс регистрировалась микроамперметром М-95, показания которого фотографировались кинокамерой АКС-2. Диапазон чувствительности ИПСИ – 10^{-5} – 10^{-3} кал/см².

Фотоэлектрический измеритель ФЭ-5 регистрировал поток излучения в узких спектральных интервалах (синий $\lambda_{\max} = 450$ нм, оранжевый – $\lambda_{\max} = 590$ нм и ближний инфракрасный $\lambda_{\max} = 800$ – 850 нм). Приемниками излучения в синей и оранжевой областях спектра служили фотоумножители ФЭУ-33, а в инфракрасной – фотоэлемент ЦВ-3 с кислородно-цезиевым фотокатодом на металлической подложке. Разрешающая способность – 10^{-6} с, длительность регистрации – 10^{-4} с. Чувствительность прибора в синей области – 5×10^{-7} вт/см², оранжевой – 1.5×10^{-7} вт/см² и инфракрасной – 5×10^{-4} вт/см². Запись светового импульса производилась на электронном осциллографе ОК-17.

Измеритель лучистого потока (ИЛП) позволял регистрировать изменение энергетической освещенности во времени. Приемником являлся фотодиод ФД-1. В приборе была предусмотрена концентрация светового потока с помощью телескопической оптической системы. Регистрация производилась электронным осциллографом ЭНО-1 или шлейфовым осциллографом Н-102.

Фотодиод ФД-1 в режиме фотоэлемента позволял определить изменение энергетической освещенности. Возникающий фототок регистрировался шлейфовым осциллографом Н-102.

Фотоэлектрический измеритель ФЭ-52 регистрировал спектральную освещенность в двух узких областях спектра при $\lambda = 391$ нм ($\Delta\lambda = 10$ нм) и при $\lambda = 550$ нм ($\Delta\lambda = 10$ нм), выделяемых специальными интерференционными фильтрами. Прибор позволял определять изменение во времени интенсивности свечения линии молекулярного азота и кислорода. Приемниками излучения служили фотоумножители ФЭУ-33. Разрешающая способность прибора 10^{-6} с, длительность регистрации 50 мкс. Чувствительность прибора в синей области спектра – 5×10^{-5} вт/(см² мк), в зеленой области спектра 3×10^{-5} вт/(см² мк). Запись светового импульса производилась на электронном осциллографе ОК-17.

Фотоэлектрический измеритель ФЭ-5В позволял регистрировать интенсивность свечения линий молекулярного кислорода, выделяемой интерференционными светофильтрами – $\lambda = 556$ нм ($\Delta\lambda = 10$ нм), в течение всего времени развития взрыва. Приемным элементом являлся фотоумножитель ФЭУ-33. Запись светового импульса производилась на шлейфовый осциллограф Н-102. Чувствительность прибора – 4.4×10^{-9} вт/см²; разрешающая способность – 1×10^{-3} с, длительность регистрации – 2 мин.

Многоканальный фотоэлектрический измеритель ФЭ-5С регистрировал освещенность при помощи фотоумножителя ФЭУ-33. Каналы прибора были разведены относительно друг друга на десятки градусов, что позволяло регистрировать освещенность от различных участков светящейся зоны. Разрешающая способность – 2.5×10^{-2} с, длительность регистрации – 3 мин. Запись производится на шлейфовом осциллографе Н-102.

Основная часть оптической, фотоэлектрической и спектрографической аппаратуры вместе с переносными пунктами управления (ППУ) была смонтирована на специальных подвижных подставках,

Запуск и управление работой специальной регистрирующей аппаратуры на ИП-25 и ИП-2 осуществлялись от автономной системы автоматики каждого пункта, связанной со службой единого времени полигона. Запуск медленных спектрографов ИСП-28, 55, 51, УФ-85, а также аэрофотоаппаратов АФА-33/20 и АФА-42/50 проводился вручную по специальной программе.

Для решения поставленных задач использовалось большое количество аппаратуры, указанной выше, с широким размещением на территории СССР. Примеры расположения аппаратуры на наблюдательных пунктах при операциях ЗУР 215 и К-1–К-2 показаны на рис. 5 [Операции..., 1962а].

На рис. 6 для иллюстрации полученных результатов приведены последовательные фотографии свечения воздуха, разогретого ударной волной (операция К-1) [Операции..., 1962а], а на рис. 7 – регистрация лития в свечении воздуха [Геофизические, 1963].

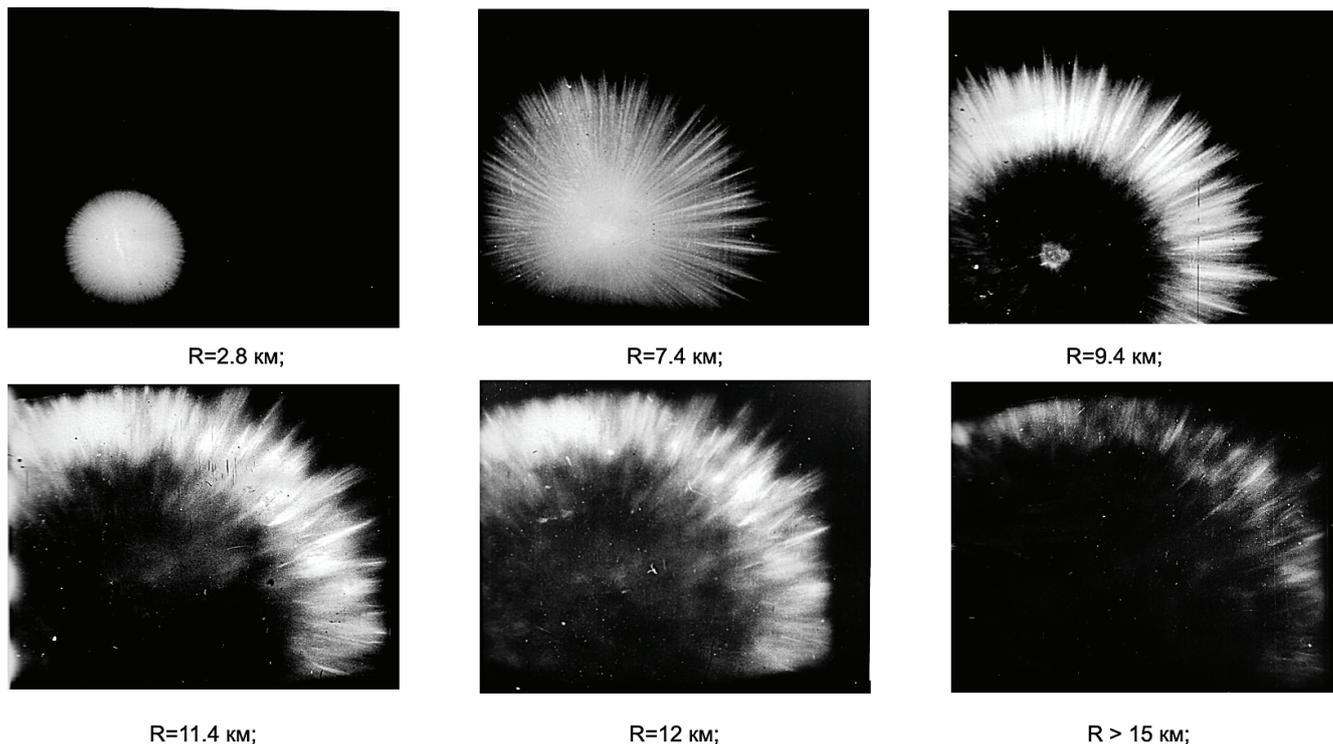


Рис. 6. Последовательные фотографии свечения воздуха, разогретого ударной волной в операции К-1

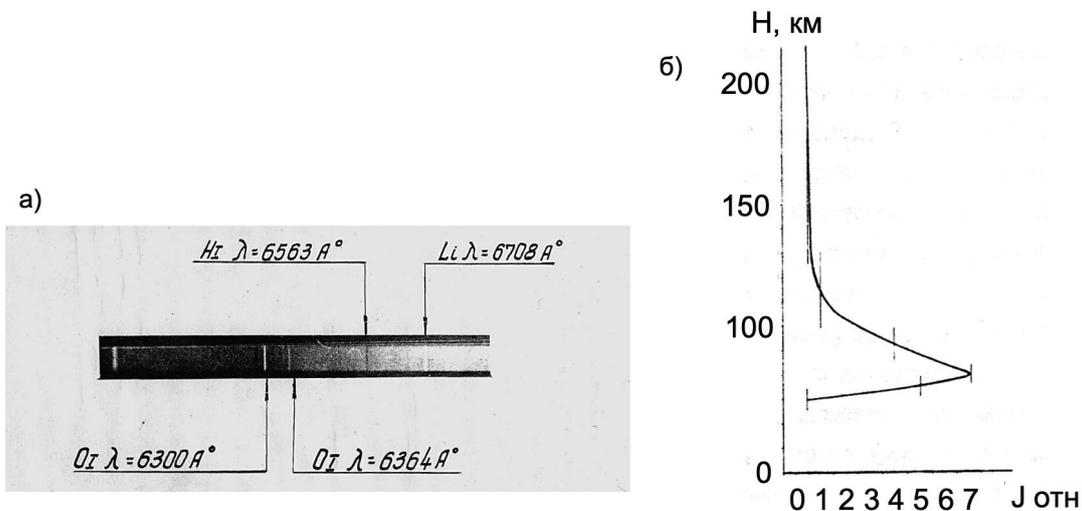


Рис. 7. Регистрация лития в свечении воздуха: а) спектр сумеречного свечения, б) интенсивность свечения лития на разных высотах

2. Специфика измерений при разных пространственных масштабах

Что касается *пространственных* масштабов, то при измерениях четко обозначаются две зоны:

- *ближняя* зона, где основным разрушающим фактором, применительно к расположенной в этой зоне преграде (например, головной части баллистической ракеты), является рентгеновское излучение и проникающая радиация;
- *дальняя* зона, в которой, кроме разрушающих факторов, проявляются физические и геофизические факторы воздействия взрыва на окружающую среду.

Мощный поток рентгеновского излучения порождается сильно нагретым веществом боеприпаса. Взаимодействуя с преградой, это излучение поглощается в тонком поверхностном слое вещества, сильно нагревает его и вызывает взрывообразный разлет испаряющегося слоя. При этом на преграду кратковременно действует давление, которое вызывает в материале преграды мощную ударную волну. Импульс давления при определенной величине разрушает конструкцию преграды, а ударная волна вызывает откол внутренних слоев металла [Геофизические..., 1963].

Проникающая радиация взрыва представляет собой поток нейтронов и гамма-квантов. Воздействуя на вещество заряда и элементы системы автоматики преграды, проникающая радиация при определенных величинах потоков излучения может вывести из строя ядерный боеприпас в целом.

Была разработана программа исследований эффективности разрушающего действия высотных ядерных взрывов различной мощности на воздушные, космические и наземные объекты, а также определения безопасной высоты перехвата, в которой были выделены характерные диапазоны высот: $(7-10) \div (35-40)$ км; $(35-40) \div (90-100)$ км и более 100 км. Были запланированы и проведены операции для диапазона высот: $(7-10) \div (35-40)$ км – ЗУР 215 и Гроза; $(35-40) \div (90-100)$ км – Гром и К-5; свыше 100 км – К-1 и К-2, К-3 и К-4.

Отличительной особенностью операций К-3, К-4 и К-5 – была возможность наиболее полного измерения эффективности действия рентгеновского и проникающего излучений. Это связано со сравнительно большой мощностью зарядов (~ 300 кт) и достаточно больших высот проведения операций (59, 149 и 291 км), на которых излучение поглощается достаточно слабо [Геофизические..., 1963].

На рис. 8 для сравнения представлено распределение по высотам и эквивалентам советских и американских высотных взрывов.

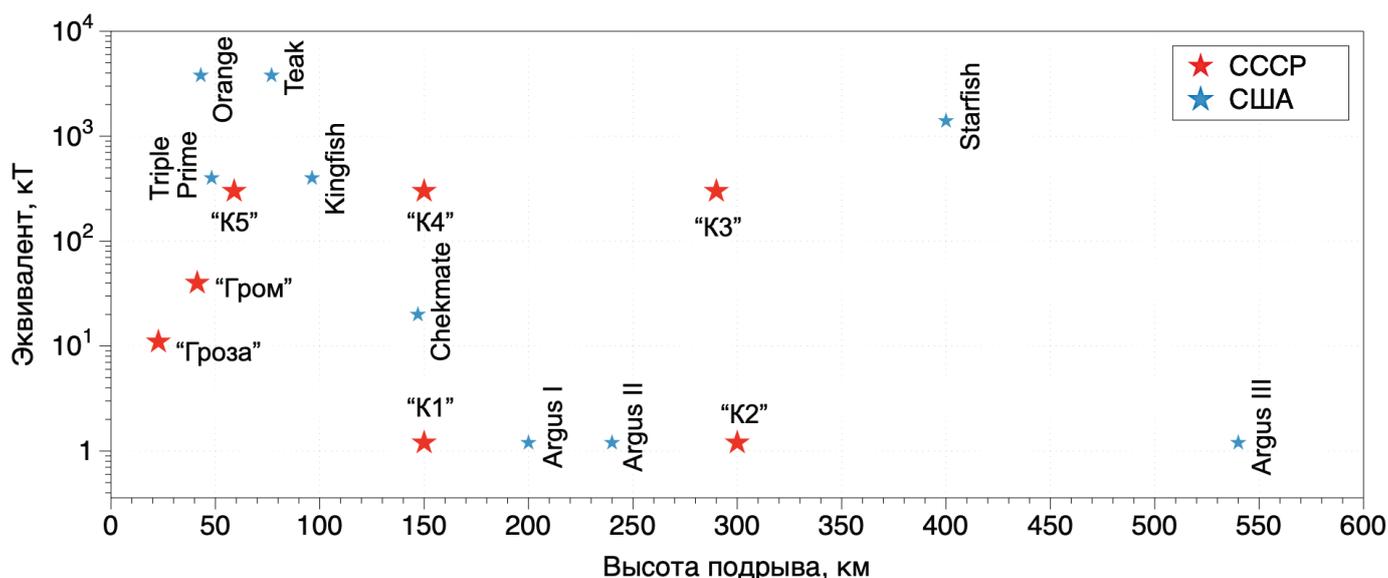


Рис. 8. Распределение по высотам и эквивалентам советских и американских высотных взрывов

При решении задач, сформулированных в упомянутой программе исследований, выполнялись следующие измерения:

- механического действия взрыва на специальные мишени и приборные контейнеры;
- полного потока и спектра рентгеновского излучения;
- спектра и потока нейтронов;
- параметров ударной волны и светового излучения у поверхности земли.

В ближней зоне взрыва производились измерения механического действия и проникающей радиации с помощью механических приборов и индикаторов, размещавшихся в неспасаемых приборных контейнерах высокой прочности. Эти контейнеры использовались во всех советских высотных взрывах, начиная с операции Гроза, различаясь только в расположенных внутри датчиках и некоторых особенностях конструкции, связанных с различными задачами испытаний и методам крепления к различным типам ракет, несущих ядерный заряд.

В частности, приборные контейнеры ПА-6 и ПА-7, применявшиеся в операции Гром, представляли собой полый шар, состоящий из двух половин. Внешний диаметр стальной оболочки контейнера – 455 мм, толщина стенок – 8–10 мм. Наружная поверхность контейнера была покрыта термостойкой асботекстолитовой обмазкой толщиной 20 мм. Контейнер ПА-6 выдерживал без остаточных деформаций внешнее гидростатическое давление ~ 500 кг/см². По своим прочностным и теплозащитным свойствам приборный контейнер ПА-6 имитировал упрочненную головную часть баллистической ракеты.

Контейнеры оснащались аппаратурой для измерения давления на поверхности контейнера, перегрузок и импульсов перегрузок, испытываемых контейнером при воздействии ударной волны, деформаций оболочки, температуры на внутренней поверхности оболочки и набором индикаторов для измерения параметров проникающей радиации.

В приборных контейнерах устанавливались также некоторые радиоэлементы и источники питания с целью проверки воздействия проникающей радиации. Внутренние объемы контейнеров заполнялись меламин-веществом, которое по своему элементному составу и удельному весу близко к тринитротолуолу и, следовательно, обладал такими же поглощающими свойствами по отношению к потоку проникающей радиации [Исследование..., 1961].

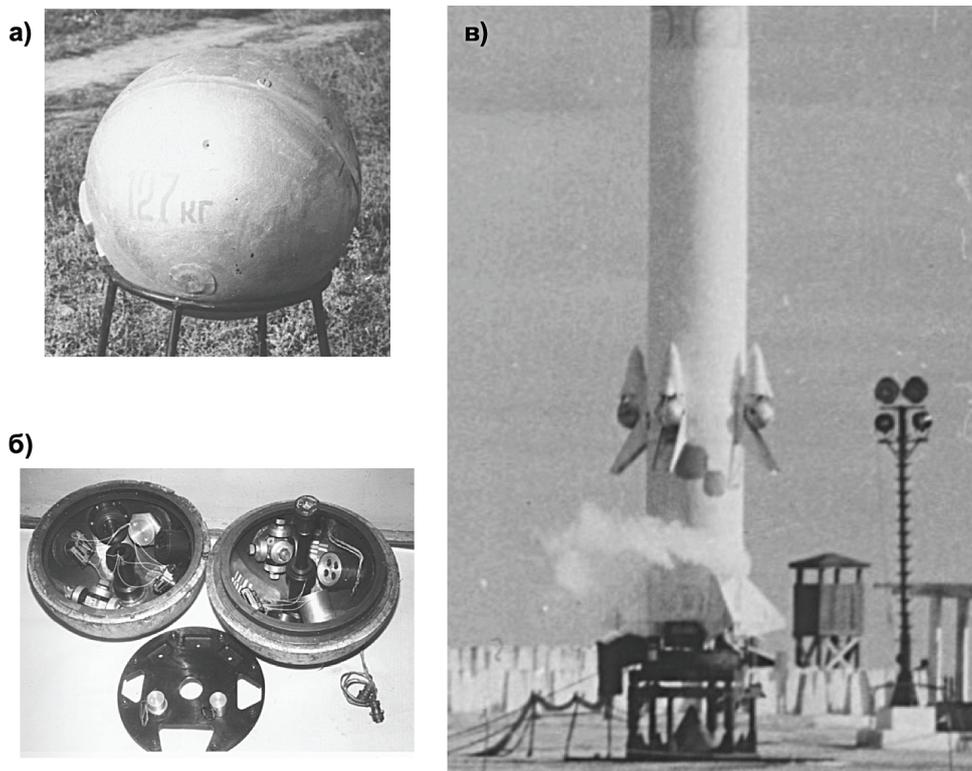


Рис. 9. Контейнер ПА-6, использовавшийся в операции Гром: а) внешний вид контейнера, б) раскрытый контейнер с измерительной аппаратурой, в) контейнеры, установленные на боевой ракете

Аппаратура для измерений механического действия взрыва имела выключатели, которые отключали регистрирующие элементы после измерения воздействий взрыва по импульсу мгновенного гамма-излучения или импульсу сил инерции, что исключало возможность повторного срабатывания при ударе о землю.

На рис. 9 показаны фотографии внешнего вида приборного контейнера ПА-6 и раскрытого контейнера, с установленной в нем измерительной аппаратурой [Световые..., 1961; Измерение..., 1961].

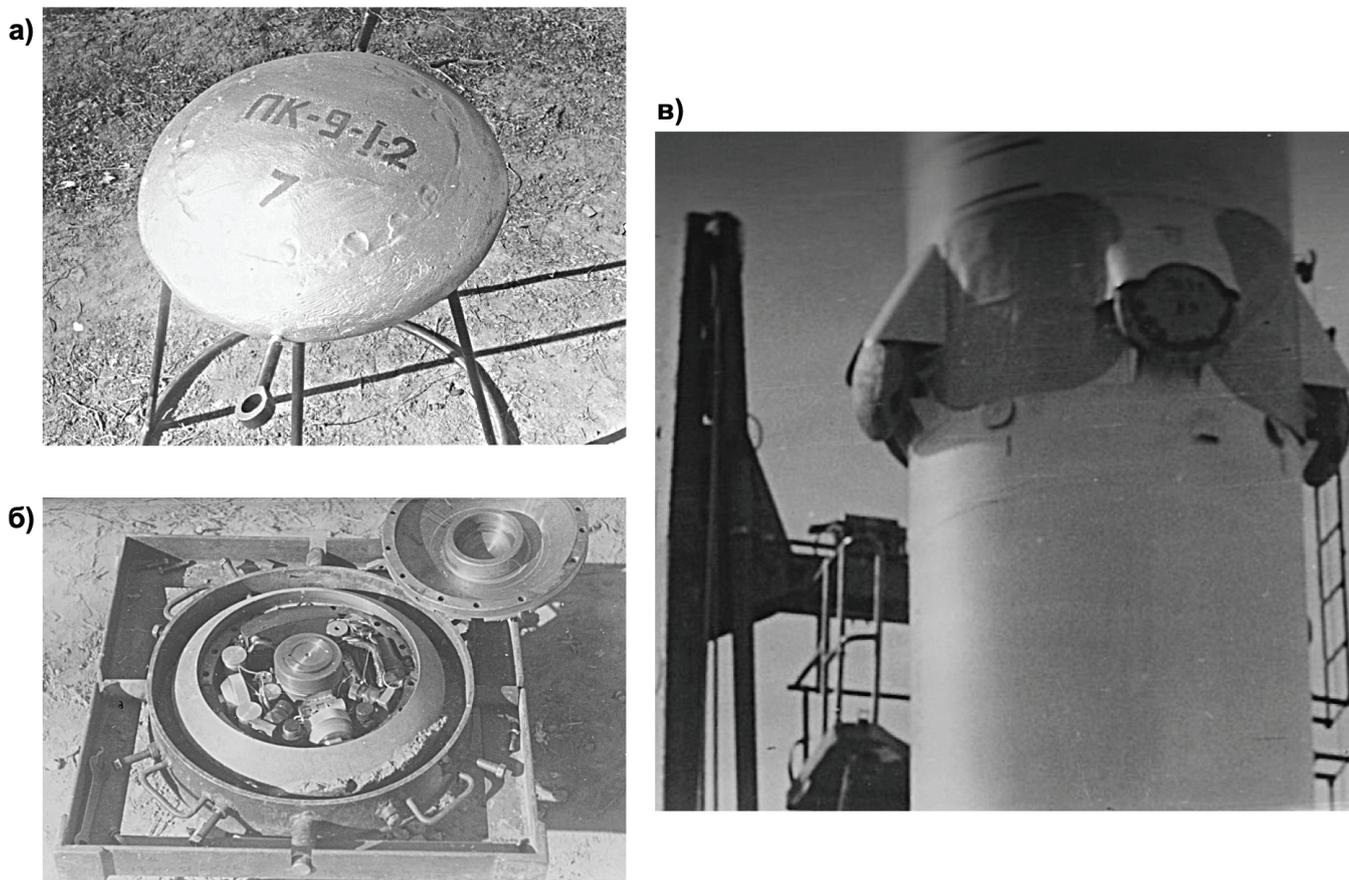


Рис. 10. Контейнер ПК-9, использовавшийся в операциях серии К: а) внешний вид контейнера, б) контейнер, вскрытый после эксперимента, в) расположение контейнеров на боевой ракете

В операциях «К» использовались приборные контейнеры ПК-9, закрепляемые на корпусе боевой ракеты в местах, не вносящих ощутимых искажений в показания приборов, фиксирующих перегрузки от взрывов [Методы..., 1963]. Контейнеры имели форму двояковыпуклой линзы с внешним диаметром 525 мм и толщиной (в центре) 215 мм; минимальная толщина металлических стенок составляла 24 мм. Наружная часть контейнера была покрыта термостойкой асботекстолитовой обмазкой толщиной 20 мм. Вес окончательно собранного контейнера – 127 кг (рис. 10). Оснащение контейнеров ПК-9 в операциях К-1 и К-2, где при малой мощности ядерного заряда основное воздействие на преграду ожидалось за счет действия газового потока и проникающей радиации, в комплект аппаратуры входили датчики перегрузок и импульса перегрузок, а также индикаторы проникающей радиации.

В операциях К-3, К-4 и К-5, где мощность заряда была в сотни раз большей, а основным фактором воздействия являлось рентгеновское излучение, комплектация контейнера ПК-9 была дополнена прибором МИДЭ, предназначенным для измерения импульса давления от рентгеновского излучения.

Для доставки приборных контейнеров с измерительной аппаратурой в ближнюю зону использовались корпуса боевых ракет. Боевые ракеты запускались по расчетным траекториям, различным для операций К-1 и К-2 и операций К-3, К-4 и К-5.

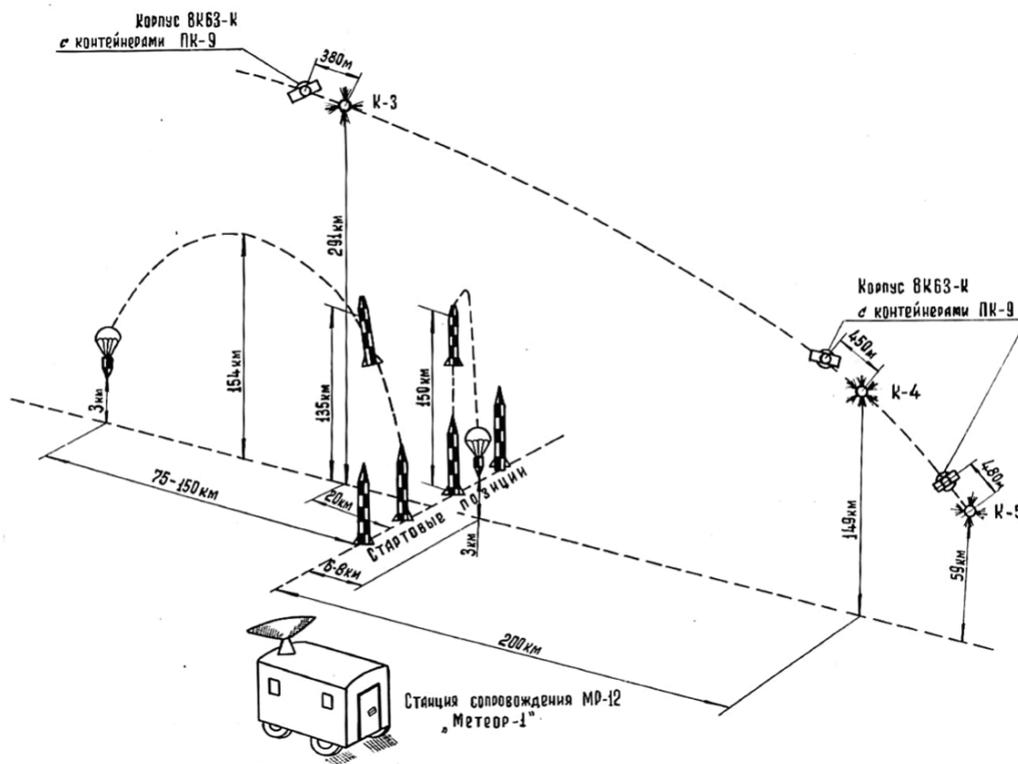


Рис. 11. Схема расположения ракет с контейнерами ПК-9 и метеорологических ракет МР-12 в момент взрывов при проведении операций К-3, К-4 и К-5

На рис. 11 показана схема положения корпусов боевых ракет с контейнерами ПК-9 и метеорологических ракет МР-12 в момент взрывов при проведении операций К-3, К-4 и К-5 [Методы..., 1963].

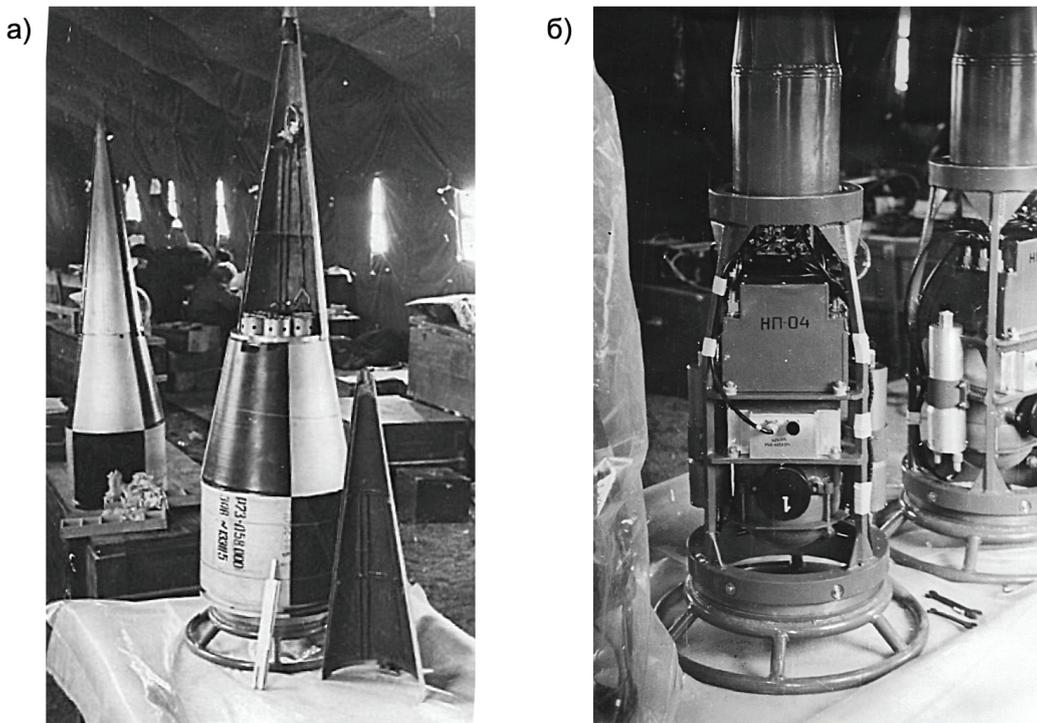


Рис. 12. Расположение детекторов в головной части ракеты МР-12: а) аппаратура для регистрации спектра рентгеновского излучения, б) аппаратура для регистрации параметров нейтронного излучения

В дальней зоне взрыва (на расстояниях $\sim 150\text{--}200$ км) производились измерения энергии и спектрального состава рентгеновского излучения и проникающей радиации специальной аппаратурой, располагавшейся в головных частях метеорологических ракет МР-12, пуск которых производился со стартовой позиции с соответствующей синхронизацией относительно расчетного времени подрыва ядерного заряда. Помимо измерения величин электронных концентраций, возникающих при взрыве в различных слоях атмосферы, в приборных контейнерах ракет располагалась аппаратура для измерения потока и спектра нейтронов (рис. 12) [Методы...., 1963]. Приборные контейнеры, располагаемые на ракетах МР-12, обеспечивались средствами спасения, предотвращающими их выход из строя при падении на землю после проведения эксперимента. Приборные контейнеры П6-А и ПК-9 падали на землю без применения каких-либо средств спасения со скоростями, не превышающими 300 м/с. Прочность их была таковой, что после падения на землю остаточные деформации оболочки отсутствовали.

Особая методическая проблема – поиск приборных контейнеров после их падения на землю. Он осуществлялся отрядами разведывательных дозоров на вертолетах, оснащенных геологоразведочными гамма-радиометрами ЭСГ-65 высокой чувствительности. Контейнеры под действием потока нейтронов получали наведенную активность, что и использовалось при их поиске [Методы...., 1963].

Геофизические явления, сопровождающие высотные и космические ядерные взрывы

При проведении операций Гром, Гроза, К-1 и К-2 было установлено, что высотные и космические ядерные взрывы сопровождаются интенсивным электромагнитным излучением (ЭМИ) радиодиапазона. Причем, амплитуда сигнала при одинаковых значениях мощности и расстояния до эпицентра высотного взрыва была в несколько раз больше, чем при низких воздушных взрывах соответствующей мощности. Было показано, что регистрация электромагнитного излучения может быть осуществлена на значительных расстояниях от места взрыва (до 6000 км). Было также определено, что существовавшая на тот момент аппаратура позволяла определить пеленг на источник излучения.

Учитывая указанные обстоятельства при проведении взрывов в операциях К-3, К-4 и К-5, были сформулированы следующие основные задачи:

- регистрация формы, измерение интенсивности и спектральной плотности ЭМИ на различных расстояниях от эпицентра взрыва;
- исследования, связанные с анализом физической природы радиоизлучения;
- определение воздействия ЭМИ на линии связи;
- исследования, связанные с разработкой метода определения положения эпицентра ядерного взрыва.

Программа измерений имела чрезвычайно широкий масштаб [Материалы...., 1962]. На территории СССР было развернуто около 50 постоянных и временных пунктов, на которых проводилась регистрация. На поверхности Земли регистрировались: радиоимпульс, МГД ЭМИ, ударная волна, акустические колебания [Геофизические...., 1963]. На рис. 13 показаны примеры измеренных значений ЭМИ в зависимости от расстояний для разных взрывов.

При измерениях МГД ЭМИ использовались, в основном, два метода регистрации: измерения вариаций напряженностей горизонтальных компонент магнитного поля (H_x , H_y) и вариаций земных токов (E_x , E_y). Расстояния до центров областей взрывов колебались от 200 до 6000 км.

Как было показано в [Материалы...., 1962; Электромагнитные...., 1962; Результаты...., 1963], электромагнитные возмущения, вызванные высотными ядерными взрывами, регистрируются вариациями в виде колебаний, которые можно разделить на три фазы:

I – быстрые колебания, начало которых совпадает с моментом взрыва.

II – главная – характеризуется одной большой волной продолжительностью: К-1 – 60, К-2 – 150, К-3 – 380–450, К-4 – 600–900, К-5 – 2800–3500 с. Амплитуда главной фазы на один-два порядка больше амплитуд всех других фаз магнитного возмущения.

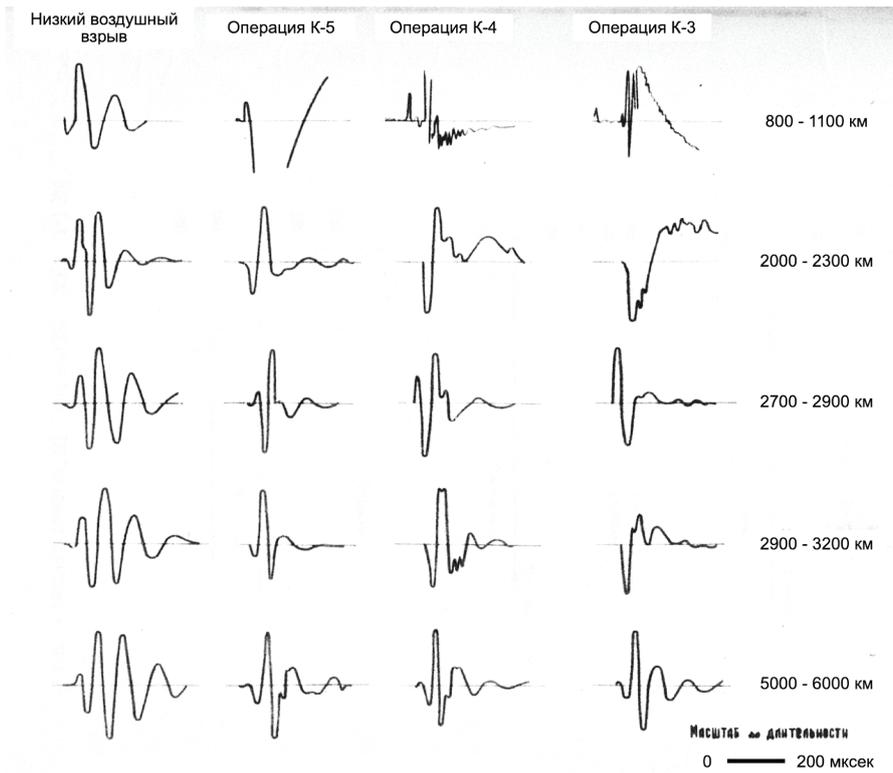


Рис. 13. Типичные виды осциллограмм ЭМИ в зависимости от расстояний для разных взрывов

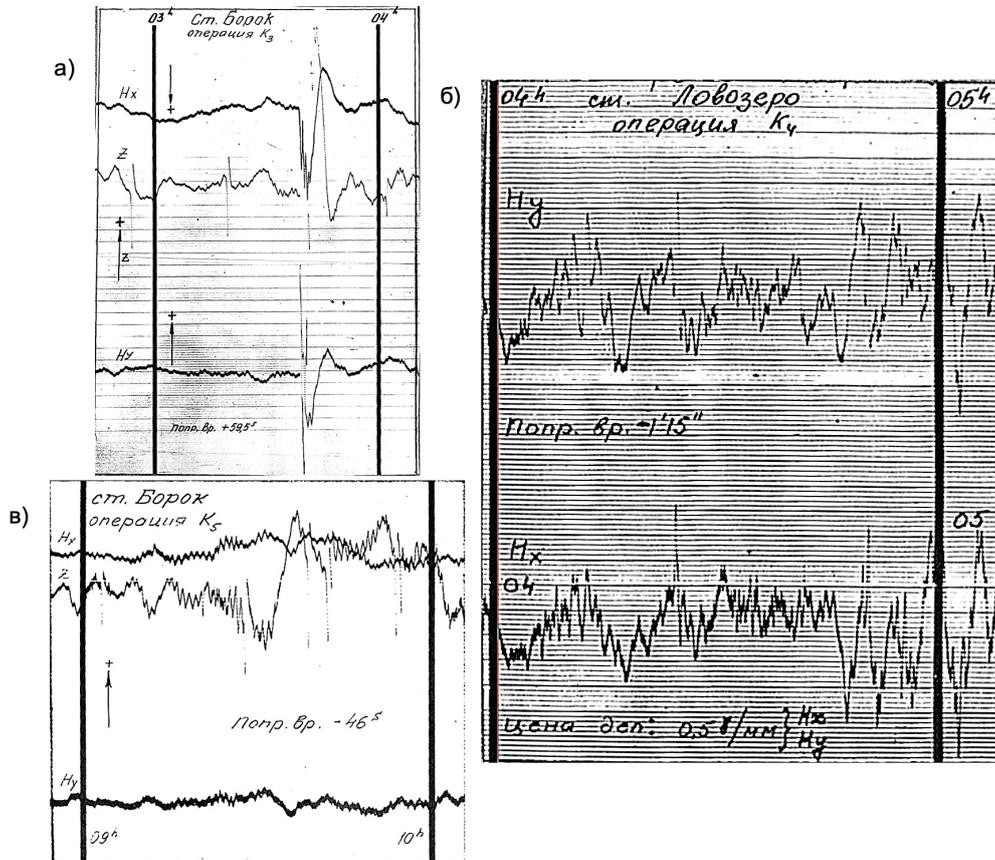


Рис. 14. Магнитное возмущение (МГД ЭМИ), зарегистрированное на поверхности Земли во время операций К-3 – К-5 на различных расстояниях от центров областей взрывов: а) К-3 – 2170 км, б) К-4 – 3270 км, в) К-5 – 2470 км

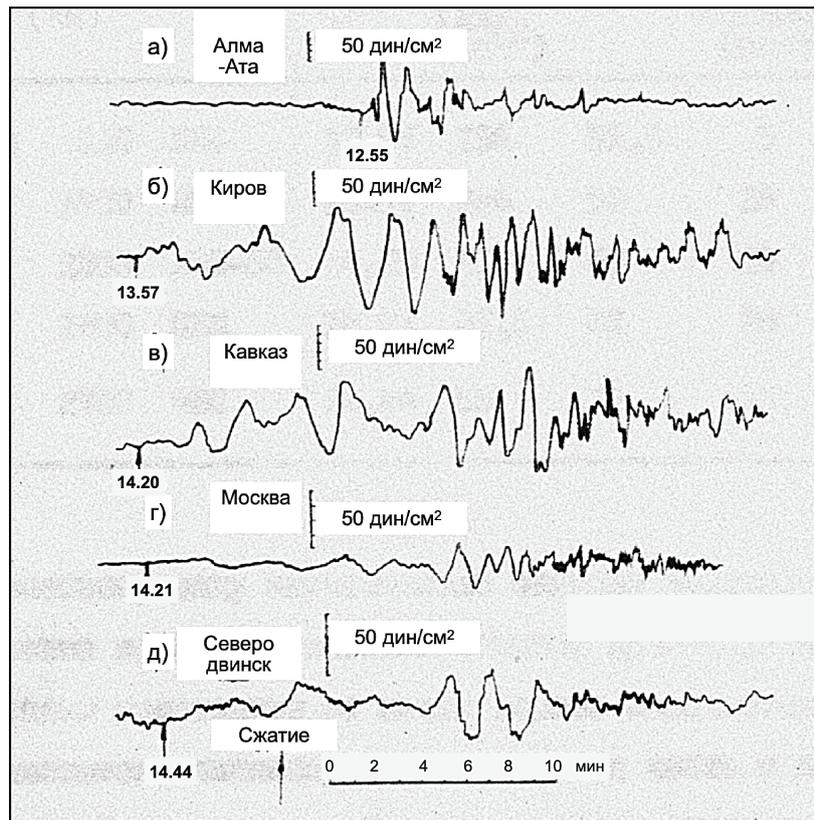


Рис. 15. Барограммы акустических сигналов в дальней зоне

III – имеет вид относительно медленных, довольно правильных синусоидальных колебаний с небольшой начальной амплитудой и слабо затухающих.

На рис. 14 приведен пример записи магнитного возмущения (МГД ЭМИ), зарегистрированного на поверхности Земли во время операций К-3 – К-5 на различных расстояниях от центров взрывов. На рис. 15 приведены барограммы акустических сигналов в дальней зоне взрывов.

Банк экспериментальных результатов, полученный в процессе геофизических исследований при проведении высотных ядерных взрывов, является уникальной коллекцией данных, востребованных не только в прикладных задачах.

Список литературы

Адушкин В.В., Горбенко Б. З., Овсянников Г. А., Разоренов А. А. О методах измерения светового излучения воздушного ядерного взрыва // Ядерные испытания. Кн. 1: Ядерные испытания в Арктике. Т. 2. 2006. С. 246–261.

Гарнов В.В. Оптические приборы для регистрации ядерных взрывов. В сб. Курчатовский институт: История Атомного проекта. Вып. 11. Москва. 1997. С. 75–81.

Гарнов В.В., Б.Г. Горюнов, Н.М. Сицинская. Высокоскоростная фоторегистрирующая аппаратура для регистрации ядерных взрывов и других быстропротекающих процессов // Физика горения и взрыва, 2004. Т. 40. № 6. С. 132–137.

Геофизические явления, используемые для обнаружения высотных взрывов: Сводный отчет по операциям К-3, К-4, К-5 / отв. исполнители: П.В. Кевлишвили, С.В. Форстен, И.В. Немчинов, В.А. Троицкая, В.Ф. Шельтинг. Москва. 1963. Т. 3. Фонды ИДГ РАН.

Голлер Е.Э. Методика ИВ. В сб. Курчатовский институт: История Атомного проекта. Вып. 11. Москва. 1997. С. 181–201.

Измерение спектра нейтронов: Отчет / отв. исполнитель П.А. Ямпольский. Москва. 1961. Фонды ИДГ РАН.

Ипаткин И.С. Методика КТ. В сб. Курчатовский институт: История Атомного проекта. Вып. 11. Москва. 1997. С. 150–160.

Исследование проникающей радиации в операции Гром: Отчет / отв. исполнители А.А. Осин, П.В. Кевлишвили, С.В. Форстен. Москва. 1961. Фонды ИДГ РАН.

Киселев Г.В. Научное наследие лауреата Нобелевской премии академика Н. Н. Семенова в советском Атомном проекте. Саров : ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2015. – 409 с.

Материалы по результатах проведения операций Гроза, Гром / Отв. исполнители С.В. Форстен, П.В. Кевлишвили, И.В. Немчинов, Н.В. Козин, Ю.П. Райзер. Москва. 1962. Фонды ИДГ РАН.

Методы измерений при операциях К-3, К-4, К-5: Сводный отчет / отв. исполнители: С.В. Форстен, Ю.А. Романов, П.В. Кевлишвили, Н.В. Козин, И.В. Немчинов. Москва. 1963. Т. 2. Фонды ИДГ РАН.

Операции К-1 и К-2: Отчет / отв. исполнитель П.В. Кевлишвили. Москва. 1962. Фонды ИДГ РАН.

Программа оптических наблюдений взрыва при проведении опыта по теме К-1 и К-2: Отчет / отв. исполнитель Б. Меловатский. Москва. 1959. Фонды ИДГ РАН.

Результаты изучения быстрых вариаций земных токов в ближней зоне. Отчет / отв. исполнитель: В.А. Троицкая. Москва. 1963. Фонды ИДГ РАН.

Световые явления в операциях К-1 и К-2: Отчет / отв. исполнитель Ю.П. Райзер. Москва. 1961. Фонды ИДГ РАН.

Шнирман Г.Л. Аппаратурные наблюдения: Избранные труды. ОИФЗ РАН. Москва. – 2003 с.

Ядерные испытания в СССР. Москва. 1997а. Т. 2. С. 33–34.

Ядерные испытания в СССР. Москва. 1997б. Т. 2. С. 29–33.

**PARTICIPATION OF THE SPECIAL DEPARTMENT
OF THE CHEMICAL PHYSICS INSTITUTE OF THE USSR ACADEMY
OF SCIENCES IN THE SOVIET NUCLEAR
(historical overview)**

© 2023 J. I. Zetzer*

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: zetzer@idg.chph.ras.ru*

This article, based on currently available materials, submits for consideration an overview of the part of the soviet nuclear testing work, in which employees of the Special Sector of the Institute of Chemical Physics of the USSR Academy of Sciences took an active part, in the direction of the development of unique measurement methods and equipment, as well as in conducting tests and obtaining results.

Keywords: nuclear tests USSR, K-1÷K-5 Projects, high-speed photo cameras, fireball dynamics, nuclear explosion near zone.