

ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЯДЕРНЫХ ПОЛИГОНОВ ПРИБОРАМИ

Н. В. Кабыченко, А. А. Разоренов, Б. Г. Горюнов

Институт динамики геосфер РАН, 119334 Москва, knv@idg.chph.ras.ru

Представлены приборы, разработанные в Спецсекторе Института химической физики (Института физики Земли, ныне — Институт динамики геосфер РАН) и изготовленные в ОКБ института для обеспечения регистрации физических процессов, сопровождающих ядерные взрывы. Многие из них стали штатными на ядерных полигонах.

Ключевые слова: взрыв, самописец, акселерометр, сейсмометр, наклономер, деформометр.

ВВЕДЕНИЕ

В 1946 г. в рамках программы проведения ядерных испытаний Институт химической физики АН СССР, руководимый академиком Н. Н. Семеновым, получил задание разработать методы изучения поражающих свойств ядерных взрывов (ЯВ), создать соответствующую научную аппаратуру и измерительные комплексы, оборудовать ими испытательный полигон и подготовить достаточное число специалистов для решения задач испытаний. По предложению и ходатайству Н. Н. Семенова ответственным за выполнение этого задания был назначен заместитель директора ИХФ М. А. Садовский. В то время необходимое приборное оборудование в СССР полностью отсутствовало. Вскоре в ИХФ были организованы научное подразделение — Спецсектор, конструкторское бюро по приборостроению и производственные мастерские. К работам были привлечены видные специалисты в области приборостроения Г. Л. Шнирман, А. И. Соколик, П. В. Кевлишвили и др.

В задачу этих подразделений входили разработка, проектирование и изготовление серий различных измерительных приборов и установок, включая осциллографы, фото- и киноустановки для регистрации развития различных фаз ЯВ во времени, устройства для измерения интенсивности воздушных ударных волн, упругих волн и деформаций в грунтах, а также воздействия мощных потоков различных излучений, γ -лучей и нейтронов и т. д. [1].

За время проведения ЯВ специалистами Спецсектора разрабатывались датчики, приборы и методики их применения по следующим направлениям полигонных исследований: воздушная ударная волна; параметры движения грунта; динамические и остаточные дефор-

мации при воздушных и подземных ядерных взрывах; световое и электромагнитное излучение при воздушных и высотных ЯВ; высокоскоростная фоторегистрация быстропротекающих процессов; системы автоматизации управления подрывом заряда и регистрирующим комплексом; контроль за испытаниями ядерного оружия. Эти разработки и исследования (в том числе в натуральных условиях ЯВ) выполнялись под руководством или при активной поддержке М. А. Садовского с творческим участием руководителей подразделений Спецсектора Г. Л. Шнирмана, П. В. Кевлишвили, А. И. Соколика, А. С. Дубовика, И. Л. Зельманова с их сотрудниками, создавшими, по оценке М. А. Садовского, не менее 80 % всей аппаратуры, использовавшейся на ядерных испытаниях [1].

РЕГИСТРАЦИЯ ВОЗДУШНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Параметры воздушной ударной волны при ЯВ измерялись серией приборов [2], разработанных в лаборатории Г. Л. Шнирмана. Мембранный оптический самописец ОС с диапазоном измеряемого давления 0,05 ÷ 0,3 МПа применялся при первом ЯВ в 1949 г. Движение мембраны под действием давления вызывало (через штوك) поворот зеркала, закрепленного на упругих шарнирах. Отраженный от зеркала луч света записывался на движущуюся фотопленку с отметчиком времени, работающим от внешних сигналов. Приборы устанавливались на железобетонных вышках и постаментов на высоте соответственно 20 и 3 м. Позднее применялась малогабаритная модификация ОС-М.

Индукционный измеритель давления ИДИ с измеряемым давлением до 1 МПа использовался при воздушных ЯВ в 1954 г. Эти датчи-

ки входили в комплект многоканальной системы регистрации.

Тензометрические датчики давления ИДТ применялись для измерения давления ударных волн в грунте в диапазоне до 1 МПа при воздействии воздушного ЯВ. Датчики работали в комплекте с серийной многоканальной тензометрической станцией.

Самолетные измерители. В 1951 г. для регистрации воздействия ударной волны воздушного ЯВ на самолет-носитель применялись оптические самописцы ускорения (СОС-П) и давления (СОС-Д). Датчиком ускорения в приборе СОС-П являлся груз с зеркалом на упругой консоли. Чувствительность, определенная по фотопленке, $0,3 \div 1 \text{ мм}/(\text{м}/\text{с}^2)$. Внутренняя подмембранная полость прибора СОС-Д сообщалась с внешним пространством через сменный капилляр определенной длины и диаметра для постепенного уменьшения избыточного давления в полости, возникающего при изменении высоты полета. С 1953 г. применялись тензометрические самолетные датчики давления ударной волны ИДТС, которые работали в комплекте с бортовой тензостанцией самолета, а регистрация велась шлейфовым осциллографом. Система датчика монтировалась в обтекателе кинжального типа, расположенном на выносной консоли в носовой части самолета. Измерители этого типа различных номиналов устанавливались на самолеты Ил-28, Ту-4, Ту-16, Ту-95, М-3 и применялись вплоть до окончания проведения ЯВ в атмосфере (в том числе и на самолетах-мишенях при высотных ЯВ).

Микробарограф ДР с чувствительностью в несколько паскалей был разработан в 1949 г. для дальнего обнаружения наземных и воздушных ядерных взрывов. Чувствительным элементом микробарографа служил плунжер, закрепленный на конце подвешенного на упругих шарнирах и сбалансированного коромысла и находящийся на входе рабочей камеры.

ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

Фоторегистраторы. Был разработан комплекс уникальных оптических приборов с поражающими воображение характеристиками. Например, одна из луп времени (Г. Л. Шнирман, П. В. Кевлишвили, А. С. Дубовик) обеспечивала съемку с частотой до

$33 \cdot 10^6$ кадр/с. На выставке в Брюсселе в 1958 г. и затем в США она была единственным экспонатом в своем классе, поразившим зарубежных специалистов. Высокоскоростные фоторегистраторы типа СФР имели частоту съемки $2,5 \cdot 10^3 \div 2,5 \cdot 10^5$ кадр/с, количество кадров 60 и 120 при размерах 10 и 5 мм, разрешение во времени $2 \cdot 10^{-8}$ с при скорости развертки 3750 м/с, поле зрения от $14'$ до $2^\circ 15'$. Фоторегистратор ФР-1 имел разрешение во времени 10^{-8} с, ждущая лупа времени ЖЛВ-2 проводила съемки с частотой до $4,5 \cdot 10^6$ кадр/с. Скоростная камера СК-2 позволяла получать до 2500 кадр/с со скважностью 40 при съемке огненного шара ЯВ. Разработаны и более усовершенствованные фотокамеры: СК-3, СК-3Ш и СК-Ш, предназначенные для установки на самолеты. Для регистрации скорости движения грунта в эпицентральной области взрыва и для оценки тротилового эквивалента был разработан фоторегистратор ФРД-2 с высоким угловым разрешением. Основные типы разработанных приборов и их характеристики приведены в следующей статье этого номера журнала и в книге [3].

Осциллография быстропротекающих процессов была представлена целой серией катодных осциллографов серии ОК, разработанных начиная с 1949 г. группой А. И. Соколика (К. К. Чарнецкий, А. И. Станиславский, В. М. Борцов и др.), и электронных измерителей типа ИВ, разработанных в период с 1950 по 1960 г. группой П. В. Кевлишвили (Е. Э. Голлер, Ю. А. Дрожбин, В. Н. Князев, И. П. Усенко и др.). В приборах ИВ-1 и ИВ-2 сигналы, задержка между которыми измерялась с экрана электронно-лучевой трубки, фотографировались на движущуюся фотопленку шириной 35 мм. К 1960 г. насчитывалось несколько модификаций измерителей времени (ИВ-4, ИВ-8, ИВ-10, ИВ-11, ИВ-13). Погрешность измерения интервалов времени этими приборами не превышала 0,1 мкс, а катодными осциллографами серии ОК — 0,02 мкс. В начале 1950-х годов в Спецсекторе были разработаны пьезоэлектрические измерители давления ПИД на базе осциллографов серии ОК, снабженные пьезоэлектрическими датчиками для регистрации ударных волн в воде и воздухе, применявшиеся при ЯВ и в модельных исследованиях.

Светолучевые (шлейфовые) осциллогра-

фы. Для ядерных полигонов Спецсектором было разработано три типа многоканальных шлейфовых осциллографов с регистрацией на аэрофотопленке шириной 320 мм. В осциллографе ОШ-1 (1947 г.) имелось 12 шлейфов и два пьезокристаллических отметчика времени, в осциллографе ОШ-2 (примерно 1948 г.) — 24 шлейфа. Осциллограф ОШ-9 (1956 г.) был снабжен 11 шлейфами (из них два использовались в качестве отметчиков времени). Осциллографы ОШ-1 и ОШ-9 изготавливались в ОКБ института большими партиями. Осциллограф ОШ-9 также выпускался серийно заводом «Вибратор». Осциллограф ОШ-2 широкого применения не получил. Кроме того, был разработан специальный осциллограф торпедный ОТ (1950 г.), предназначенный для установки на торпедо с целью изучения работы ее механизмов в моменты запуска и удара о цель. В нем имелось 6 шлейфов, отметчик времени с часовым механизмом, пружинный привод; использовалась фотопленка шириной 35 мм. Ориентировочные габариты: диаметр 250 мм, длина 350 мм.

РЕГИСТРАЦИЯ СВЕТОВОГО И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Световое и электромагнитное излучение наземных, воздушных и высотных ЯВ измерялось обширным комплексом разработанной аппаратуры и методик. Этими исследованиями руководили такие выдающиеся ученые и специалисты, как Н. Н. Семенов, М. А. Садовский, М. А. Ельяшевич, А. А. Ковальский, Г. Л. Шнирман, П. Ф. Похил, И. Л. Зельманов и П. В. Кевлишвили, бывший одним из руководителей исследований при высотных ЯВ.

Количественные измерения энергии излучения основывались на принципе контроля нагрева измерительного теплопроводящего тела с черной поверхностью, поглощающей падающий лучистый поток в широком спектральном диапазоне. С 1949 по 1953 г. проводились измерения плотности лучистого потока $[Дж/см^2]$ измерителями интегрального излучения ИИИ, а его интенсивности $[(Дж/см^2)/с]$ — дистанционным терморациометром ДТР. В дальнейшем были разработаны и широко применялись калориметры КСВ, КСВМ, КСВМ-Ц, КСВМ-С (калориметры механического действия), измеряющие максимальную плотность потока световой энергии, и измерители теплового излучения во времени ИТИ, ИТИ-Д, ИТИ-Б. В

приборе ИИИ температура медных, зачерненных с одной стороны дисков, нагретых световым потоком, измерялась припаянными к обратной стороне дисков последовательно соединенными термопарами. Регистрация проводилась светолучевым осциллографом. Недостатком этого прибора являлась задержка отклика термопары на поток излучения, что приводило к искажению фронта импульса. В приборах типа ИТИ, с калориметрическими медными элементами резистивного типа, этот недостаток был устранен. Приборы ИТИ, ИТИ-Д, ИТИ-ДБ (безусилительная мостовая схема с выходом на шлейф) регистрировали во времени плотность лучистого потока, а прибор ИТИ-Б — интенсивность потока, для чего использовался специальный дифференцирующий трансформатор. Прибор ИТИ-ДБ использовался для регистрации лучистого потока, воздействующего во времени на самолет-носитель (при одновременной регистрации максимума посредством калориметров КСВМ).

Интенсивность теплового излучения воздушного ЯВ характеризуется двумя фазами, резко отличающимися величиной и длительностью. Длительность более короткой и менее мощной первой фазы хорошо коррелирует с величиной тротилового эквивалента воздушного ЯВ. Тепловые измерители из-за инерционности не могли измерить первую фазу с достаточной точностью, поэтому были разработаны специальные измерители первой фазы: ИПФ-1, Ф-1, Ф-2, Ф-3. В них спектральные характеристики светоприемников с помощью светофильтров корректировались под спектральную характеристику фотопленки, используемой в съемочных камерах [2].

Важным результатом применения измерителей лучистого потока при воздушных ЯВ было обнаружение влияния нагретого слоя на механическое действие ЯВ. Следствием этого стало проведение А. А. Разореновым измерений нестационарной температуры воздуха на различных расстояниях от поверхности земли параллельно с измерениями давления ударной волны на поверхности. Кроме того, М. А. Садовским вскоре были инициированы специальные исследования обнаруженного явления на модельных опытах в лабораторных условиях Спецсектора, проведенные А. И. Коротковым и В. В. Адушкиным [4].

Следует упомянуть еще об одном поручении М. А. Садовского осенью 1962 г. Необходи-

мо было зарегистрировать в районе сейсмической станции Боровое земные токи, наведенные высотным ЯВ. Годом раньше началась разработка аппаратуры. Руководителем специально созданной лаборатории Спецсектора О. Г. Сорохтиным был разработан на полупроводниках цифровой регистратор «УДАР» для записи геофизической информации на цифровой магнитофон типа ЛМР. Это была первая в СССР цифровая аппаратура подобного назначения, получившая высокую оценку специалистов. Этой аппаратурой сотрудники Спецсектора В. А. Ан и Н. В. Кабыченко, участвовавшие и в разработке опытного образца «УДАР», впервые получили цифровые записи земных токов при высотных ЯВ на магнитном носителе. Напряженность электромагнитного импульса в районе регистрации в момент ЯВ была настолько большой, что во время телефонных переговоров происходил электрический пробой между оператором и телефонной трубкой в его руке, подключенной к временной линии связи пункта регистрации с сейсмостанцией Боровое (длина линии ≈ 1 км).

РЕГИСТРАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ГРУНТА

Акселерометры различных номиналов и частотных диапазонов разрабатывались в Спецсекторе для регистрации возникающих в результате взрыва сильных движений грунта, сооружений и объектов. Еще в 1935 г. М. А. Садовский, будучи сотрудником Сейсмологического института АН СССР, разработал акселерометр для измерения ускорений при землетрясениях [5].

Для регистрации сильных движений грунта в ближней зоне подземного (штольневое) ЯВ был разработан емкостный мембранный акселерометр с частотной модуляцией, допускающий установку его на расстоянии 2 км от блока регистрации. Акселерометры этого типа (АК-1, АК-1М) измеряли ускорения от 10 до $3 \cdot 10^4$ м/с². Разработаны были также методы и оборудование как для статической, так и для динамической градуировки акселерометров. Использование этих приборов в условиях ближней зоны взрыва показало их наибольшую жизнеспособность по сравнению с приборами других типов для регистрации движения, а в наиболее жестких условиях они оставались единственными, дававшими необходимую информацию. В начале 1970-х годов были

разработаны скважинные акселерометры АКГ, АГС-2К на ускорения до 2000 м/с² и АГС на ускорения до 10^4 м/с².

Удачной разработкой Спецсектора в последние годы был акселерометр ЭА, в виде электродинамического преобразователя с большим затуханием (в 30–60 раз больше критического), расстояние между датчиком и усилителем которого может достигать 3 км. Диапазон частот 0,05 ÷ 500 Гц, диаметр 60 мм, высота 83 мм, масса 1 кг. Датчик может регистрировать ускорения до 200g при скорости грунта до 5 м/с при чувствительности 0,25 В/g. Малые габариты приборов позволяли использовать их на полигоне в составе гирлянды контейнеров на три составляющих движения в скважинах диаметром 105 мм.

Модификация акселерометра ЭА (СДУ) имеет ряд преимуществ перед своим прототипом: максимальное регистрируемое ускорение 500g, допустимая максимальная скорость грунта 14 м/с. Значительными преимуществами датчиков электродинамического типа с большим затуханием являются возможность их многократной дистанционной калибровки по основным параметрам в уже замурованном в грунт датчике и высокая помехоустойчивость.

Сейсмометры. Для регистрации на светолучевых осциллографах параметров движения грунта и вибраций инженерных сооружений при взрывах на полигонах в период 1949–1975 гг. [2] были разработаны и изготовлены герметизированные маятниковые приборы с магнитоэлектрическим преобразователем ВИБ, ВИБ-2, ВИБ-А, ВИБ-У, ВИБ-С, МВИБ, ВИБ-ЦГ, ВИБ-ЦВ и ВИБ-ТЦК. Длительное время вибрографы ВИБ-А и ВИБ-У были на полигонах основными приборами для регистрации перемещений при взрывах в диапазоне 10 ÷ 100 мм.

Деформометры. При проведении воздушных ЯВ 1954 г. для измерения на различных глубинах вертикальных остаточных деформаций грунта, возникающих в результате воздействия воздушной ударной волны, применялись механические штанговые деформометры. В последние годы разработан ряд деформометров различного целевого назначения с различными принципами действия.

Для измерения динамических и остаточных деформаций в целых блоках горной породы (измерение «в точке») разработаны тензометрические датчики ДДП в дюралюминиевом

корпусе диаметром 26 мм и высотой 20 мм, на который наклеиваются два ортогонально расположенных полупроводниковых (или проволочных) тензорезистора, закрытые специальными крышками. Датчик помещается в шпур диаметром $35 \div 45$ мм с помощью специальной штанги и закрепляется цементным раствором или расплавом тиосульфата натрия. Для учета влияния разницы упругих характеристик горной породы, материала корпуса и цементного раствора (расплава тиосульфата натрия) непосредственно в месте установки датчика проводилась его динамическая тарировка ударом. Чувствительность канала ≈ 100 В/(м/м). Диапазон измерения $10^{-6} \div 5 \cdot 10^{-3}$ м/м для полупроводниковых тензорезисторов и $10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-2}$ м/м — для проволочных тензорезисторов.

Для измерения динамических и остаточных перемещений, локализованных на межблоковых промежутках небольшого масштаба, использовался струнный датчик перемещений ДПС. Длина струны $0,8 \div 1,5$ м, натяжение с усилием 600 Н/мм², верхняя граничная частота $3 \div 5$ кГц, регистрируемое взаимное смещение блоков горной породы от $0,01$ до 6 мм. Измерения остаточных линейных перемещений на больших базах выполнялись ленточными деформометрами, оснащенными двоянными потенциометрами и мостовыми схемами. Погрешность измерения относительных перемещений опор деформометра не превышает $0,01$ мм. В начале 1990-х годов в ИДГ РАН был разработан шестикомпонентный скважинный радиальный емкостный деформометр для регистрации квазистатических деформаций грунта. Один из приборов использовался для длительного наблюдения (около 1,5 лет) за развитием деформационных процессов на крутом склоне, подверженном оползням. Полученные результаты требуют отдельного рассмотрения.

Наклономеры. Для измерения остаточных наклонов блоков до и после проведения взрыва наряду с серийными угловыми квадрантами КО-10 использовались разработанные в Спецсекторе электролитические наклономеры ЭНЖ, позволившие осуществлять дистанционную регистрацию угловых характеристик. Разрешающая способность наклономера ЭНЖ — $0,2''$ при интервале измерений угла наклона 3 угловые минуты.

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОДРЫВОМ ЗАРЯДА И РЕГИСТРИРУЮЩИМ КОМПЛЕКСОМ

Это было одно из важных направлений разработок Спецсектора (под руководством Г. Л. Шнирмана [2]), которые предназначались для обслуживания комплексов измерительной аппаратуры ядерных полигонов, самолетных измерительных комплексов, служб единого времени, скважинных комплексов сейсмических приборов и для других приложений. Для Семипалатинского полигона был разработан автомат пуска АП (1949 г.), выдававший относительно момента подрыва (момент «0») сигналы «-10 минут», «-20 секунд», «-1 секунда», «0», «+45 секунд», гармонические сигналы меток времени с частотами 1000 и 100 Гц и импульсные сигналы с частотой 1 Гц, а также автомат БА (1954–1955 гг.) с аналогичными характеристиками. Для полигона Новая Земля был разработан морской автомат МА (1954–1955 гг.) с большим числом команд, чем у АП. Автоматы строились по принципу поэлементного резервирования и дублирования для повышения надежности срабатывания программы. К автоматам АП и БА дополнительно были разработаны устройства для ретрансляции сигналов, поступающих с автоматов, и распределения их по потребителям, а также автономные системы автоматизации с короткими частными программами, срабатывающими от инициирующего сигнала. Разработаны были также самолетный автомат СА, автомат службы единого времени ГКСВ и системы автоматизации для дистанционного управления параметрами скважинных сейсмометров с уплотнением передачи команд по ограниченному числу сигнальных линий.

КОНТРОЛЬ ЗА ИСПЫТАНИЯМИ ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ

Контроль за проведением ЯВ включал разработку сейсмического метода обнаружения и идентификации подземных ЯВ, разработку новых методов регистрации сейсмических колебаний, развитие сейсмической измерительной аппаратуры. К этим исследованиям М. А. Садовский привлек большую группу специалистов Спецсектора в области механического и сейсмического действия ЯВ. Особенно заметную роль в научных исследованиях по сейсмическому эффекту взрывов и по

сейсмическим методам обнаружения играли и ныне работающие в Институте динамики геосфер РАН академик В. В. Адушкин, к.ф.-м.н. К. Е. Губкин, д.ф.-м.н. В. Н. Костюченко, д.ф.-м.н. И. В. Немчинов, д.ф.-м.н. В. Н. Родионов, д.т.н. А. Н. Ромашов, д.т.н. Б. Д. Христов, д.ф.-м.н. В. М. Цветков и др. В решение проблемы обнаружения ЯВ и проведение специальных сейсмологических исследований большой вклад внесла лаборатория И. П. Пасечника (О. К. Кедров, В. М. Овчинников, Д. Д. Султанов и др.).

На базе сейсмической станции Боровое был создан измерительно-вычислительный комплекс, разработано математическое обеспечение для алгоритмов контроля и обнаружения ЯВ на межконтинентальных расстояниях, подготовлены научно-технические кадры как для обнаруженческого комплекса Спецсектора, так и для военных организаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Почти через 14 лет после первого ЯВ был подписан Договор о запрещении испытаний ядерного оружия в трех средах. Созданные академиками Н. Н. Семеновым и М. А. Садовским коллективы ученых, инженеров и техников с честью выполнили поставленные перед ними труднейшие задачи по обеспечению ядерных

полигонов приборами и методиками, которые не имели аналогов и поэтому создавались с начала. За период ядерных испытаний были открыты новые технологии, развита приборно-методическая база, подготовлены высококвалифицированные кадры, определившие для Института динамики геосфер РАН новые направления исследований в последующие годы до настоящего времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Садовский М. А.** Институт химической физики // История атомного проекта. М.: РНЦ «Курчатовский институт», 1997. Вып. 11. С. 45–48.
2. **Шнирман Г. Л.** Аппаратурные наблюдения (избранные труды). М.: ОИФЗ РАН, 2003.
3. **Ядерные** испытания СССР. Т. 2 / Под ред. В. Н. Михайлова, В. В. Адушкина, И. А. Андришина и др. М., 1997. С. 29–33. (Министерство РФ по атомной энергии).
4. **Садовский М. А., Адушкин В. В.** Влияние нагретого пристеночного слоя на параметры ударной волны // Докл. АН СССР. 1988. Т. 300, № 1. С. 79–83.
5. **Садовский М. А.** Прибор для измерения ускорений при землетрясениях // Тр. Сейсмологического института Академии наук СССР. 1935. Вып. 79. С. 15–24.

Поступила в редакцию 9/VI 2004 г.