

УДК 621.039

Ю. В. Верюжский, В. М. Бурлаков, В. В. Гажиенко, И. И. Заруднев, Г. Е. Соколов  
ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ, ИНФОРМАЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И СОСТОЯНИЕ  
РАЗРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ  
В ИНТЕРЕСАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ  
ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ» И ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ ЗОНЫ

В статье описаны поисковые работы по созданию автоматических систем контроля на основе радиолокационной техники, направленных на обеспечение безопасности объекта «Укрытие» (ОУ) и Чернобыльской зоны. Описаны результаты проектирования трех систем. Первая - автоматическая радиогеодезическая система измерения перемещений балок покрытия ОУ. Вторая - радиотехническая система дистанционного обнаружения возникающих в зоне пожаров, работающая по принципу многоканальной радиотеплопеленгации. Третья - комбинированная система дистанционного зондирования подповерхностных сред, предназначенная для обнаружения топливосодержащих масс.

Состояние объекта «Укрытие» (ОУ) и прилегающей к нему промплощадки требует постоянного контроля процессов деформации строительных конструкций и процессов перераспределения радиоактивных веществ внутри ОУ и на промплощадке. Дать эти данные могут лишь системы автоматического контроля, способные работать в местах с большим уровнем радиации.

Здесь описаны исследования по созданию автоматических систем контроля на основе радиолокационной техники.

В течении 1995 г. НИИ механики быстропротекающих процессов при КМУГА выдвинул ряд технических предложений по разработке и изготовлению нескольких радиолокационных и радиометрических систем по обеспечению безопасности ОУ. Эти технические предложения можно условно разбить на три группы по признаку метода технического решения поставленной задачи.

**1. Радиолокационная система контроля за перемещениями опор балок покрытия объекта «Укрытие».** В настоящее время проводится разработка автоматической системы контроля за перемещениями опор (СКПО) балок Б1, Б2 покрытия ОУ. Одновременно создается программно-технический комплекс (ПТК) анализа напряженно-деформированного состояния и оценки несущей способности конструкций ОУ, ядром которого будут программно-информационные средства численного моделирования.

Регистрируемые СКПО перемещения трансформируются средствами ПТК в поля напряжений, которые сопоставимы с прочностными характеристиками конструкционных материалов. Это позволяет оценивать состояние конструкций ОУ по объективным критериям допустимости, отсутствующим для перемещений.

В рамках создания ПТК проведено численное моделирование перемещения опор главных балок покрытия ОУ при различных климатических воздействиях. Анализ показал, что система автоматического контроля за этими перемещениями должна обладать точностью 1-2 мм и динамическим диапазоном 20-30 мм [1].

Требования, предъявляемые к системе контроля за перемещениями опор балок Б1, Б2 покрытия ОУ, усложняются тем, что перемещения должны фиксироваться в абсолютной

системе координат, поскольку на объекте, претерпевшем аварию, нельзя выбрать часть конструкции, которую можно принять за условно неподвижную систему отсчета.

О Ю. В. Верюжский, В. М. Бурлаков, В. В. Гажиенко, И. И. Заруднев, Г. Е. Соколов, 1998

122

В качестве решения такой сложной задачи было предложено построить на объекте «Укрытие» и прилегающей к нему промплощадке радиогеодезическую сеть методом трилатерации на основе радиолокационных дальномеров, зафиксированных в узлах сети, что позволит полностью автоматизировать процесс слежения за общими деформациями опор балок покрытия ОУ.

Узлы трилатерационной сети приведены на рис. 1. Здесь узлы А1-А3, В1-В3 расположены на крыше блока В, узлы С1-С3, D1-D3 размещены на земле. Эти точки являются опорными в сети, т. е. при деформациях ОУ их координаты в абсолютной системе координат (связанной с землей) не меняются. На рис. 1 все координаты представлены по локальной строительной сетке. Узлы А4-А6, В4-В6, С4-С6 и D4-D6 размещены на поверхности ОУ. Они не являются неподвижными в абсолютной системе координат и совершают определенные перемещения при деформациях ОУ. Узлы сети А7, В7, С7, D7 размещены на контролируемых опорах балок Б1, Б2 внутри ОУ; точка А7 - на внешнем краю верхней части южной вентиляционной шахты; точка В7 - на внешнем краю верхней части северной вентшахты; точка С7 - на западном краю опалубки, в верхней ее части; точка D7 - в верхней части опорного узла на стене по оси 50.

Проведено моделирование системы определения координат точек на опорах (А7, В7, С7, D7) в данной трилатерационной сети, которая распадается на четыре независимые части и в которой измерения проводятся без избыточности. Анализ проведен по следующему методу. В схеме расчета координат контролируемой точки по координатам опорных точек и 12 базовых расстояний варьировались величины базовых расстояний (как результат погрешностей в их измерении). При этом вариации расчетных координат контролируемой точки, характерные для выбранной трилатерационной сети, были ошибочными.

Результат анализа показал, что при оптимальном размещении узлов сети погрешность определения координат  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  точки на опоре балок Б1, Б2 такова:

$$\max(dx, dy, dz) \text{ мм} = 3 * dL \text{ мм, где } dL \text{ - погрешность в}$$

определении базовых расстояний. Отсюда следует, что величина  $L$  должна быть порядка 0,5.. 1 мм.

Диапазон изменения базовых расстояний составляет 2030 мм.

Таким образом, автоматически измеряя 48 базовых расстояний в данной трилатерационной сети с помощью радиодальномеров, мы получаем возможность автоматически измерять перемещения опор балок Б1, Б2 относительно абсолютной системы координат.

Радиолокационный дальномер измеряет расстояние между раскрывом приемопередающей антенны и отражателем электромагнитной волны с точностью 1 мм. Для измерения базового расстояния между двумя точками необходимо в одной точке закрепить отражатель, а в другой - антенну дальномера. В разрабатываемой радиогеодезической системе в качестве отражателей предложено использовать уголкового отражатели. Они размещаются в контролируемых точках А7, В7, С7, D7 и в опорных А1-А3, В1-В3, С1-С3, D1-D3.

В каждой из точек на поверхности ОУ А4-А6, В4-В6, С4-С6, D4-D6 размещаются по четыре дальномера, жестко соединенных между собой в конструктив, так что антенна каждого дальномера излучает волну в направлении на свой отражатель: три антенны - на

123

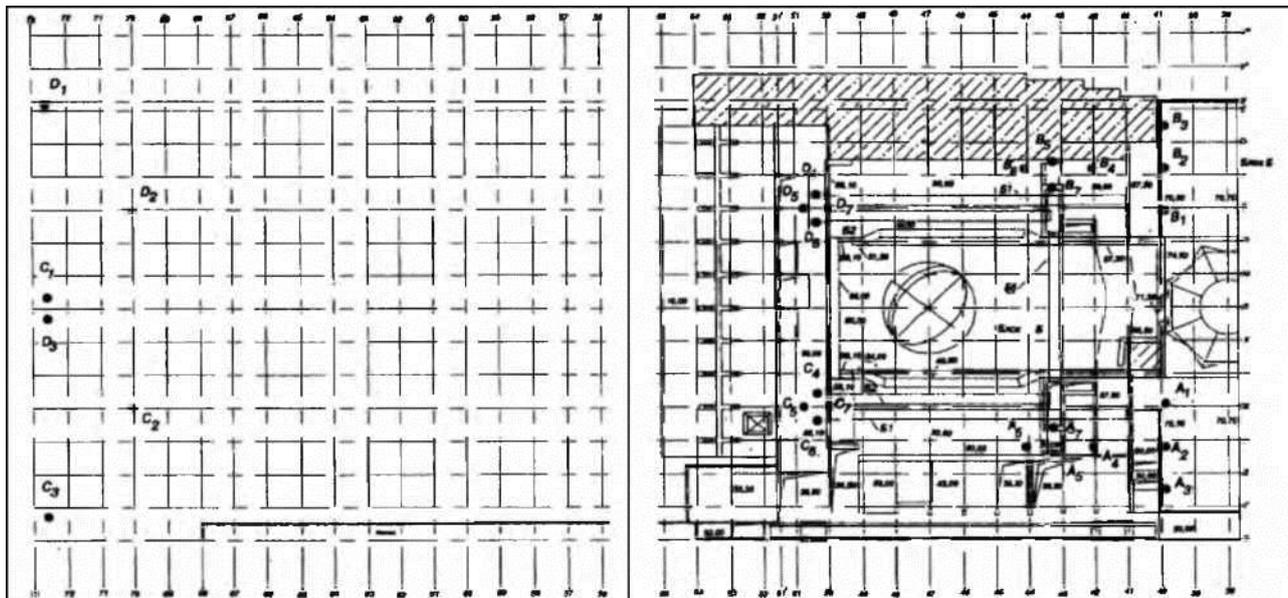


Рис. 1. Размещение СКПО на ОУ:

1 - контрфорсная стена; 2 - лестничная клетка; 3 - стальная опора; 4 - мамонт; 5 - бетонная опора;  
6 - каскадная стена; 7 - опалубка

124-125

базовые точки и одна - на контролируемую. По сути, на каждой из 12 точек расположен четырехканальный датчик расстояний от этой точки до четырех других, при этом углы между направлениями от этой точки до четырех других задаются конструктивом четырехканального датчика.

У каждого из 12 четырехканальных датчиков одна из четырех антенн помещается внутрь ОУ через отверстие в металлическом листе покрытия. Конструкция датчика должна предусматривать уплотняющую манжету, предотвращающую выход радиоактивной пыли за пределы ОУ.

Прорабатывается возможность двух вариантов радиогеодезической системы. Первый вариант основан на радиолокационных дальномерах, измеряющих абсолютное базовое расстояние около 100 м с точностью 1 мм. В качестве выходного параметра здесь используются абсолютные координаты контролируемой точки (еще ни о чем не свидетельствующие). Изменение этих координат во времени дает нам информацию о деформационных перемещениях опор балок Б1, Б2. В этом случае точность измерения расстояния  $s\Delta/b=0,00001$  требует весьма дорогих локационных датчиков, однако стоимость эксплуатации системы уменьшена, так как она допускает произвольное включение и выключение, не нуждаясь при этом в дополнительной настройке.

Второй вариант радиогеодезической системы основан на радиолокационных дальномерах, измеряющих изменение базового расстояния, которое составляет 30 мм, с точностью 0,5 мм. В качестве выходного параметра системы применяются непосредственные деформационные перемещения опор балок Б1, Б2. В этом случае локационные датчики намного дешевле, однако эксплуатационные расходы выше, поскольку радиогеодезическая система должна постоянно работать.

Настройка при включении длительна, требует измерения абсолютных величин базовых расстояний другими приборами; при повторном включении системы процесс настройки должен повторяться.

Разработаны макеты обоих вариантов радиолокационных дальномеров (для двух вариантов системы). Первый вариант - это частотный радиолокационный дальномер, работающий на частотах 35,85-36,15 ГГц. Градуировка данного нестандартизированного средства измерения производится в координатах «длина-напряжение».

Второй вариант дальномера - это фазовый радиолокационный датчик перемещений, работающий на частоте 37,5 ГГц. Градуировка данного нестандартизированного средства измерения производится в координатах «перемещение-напряжение» в пределах длины волны и кратной ей величин.

124-125

Калибровка и испытания обоих макетов проводились на специализированном рабочем месте в НИИ механики быстропотекающих процессов. Базовые расстояния при испытаниях выбирались в пределах 10 м. Измеритель дальности определял эти расстояния с погрешностью 1 см по сравнению с измерением, проведенным стальной рулеткой. Измеритель перемещений фиксировал перемещения 0,5 мм по сравнению с измерением, проведенным стальной линейкой.

Проведенные испытания показали, что данные макеты могут быть основой для разработки опытного образца радиогеодезической системы наблюдения перемещений опорных узлов балок Б1, Б2 объекта «Укрытие».

**1. Радиотехническая система дистанционного обнаружения возникающих пожаров.** Обнаружить пожары объектов, зданий, участков леса и земельных угодий на ранней стадии их возникновения, точно определить координаты очагов пожаров и оперативно оповестить соответствующие службы можно с помощью надежной радиотехнической системы.

Она состоит из трех разнесенных на территории тридцатикилометровой зоны измерительных пунктов (одного центрального и двух вынесенных) устройств связи и оповещения. В каждом из измерительных пунктов осуществляется круговой обзор пространства и пеленг очагов возгорания. Получаемая при этом информация передается на центральный пункт, где определяются координаты очагов, интенсивность и другие характеристики пожаров.

В измерительной аппаратуре пунктов реализован радиопеленгационный метод, сущность которого сводится к следующему. Все физические тела (участки земной поверхности, здания, дороги, лес и т. д.) излучают электромагнитные волны, интенсивность которых зависит от термодинамической температуры и электрофизических свойств поверхности объектов. Радиотехническая аппаратура с помощью узких лучей способна воссоздать радиояркий «портрет» просматриваемых поверхностей. При возникновении пожаров (даже на ранней стадии) поверхности, маскирующие очаги, нагреваются, т. е. становятся радиоконтрастными, что фиксируется аппаратурой.

Данный метод давно известен, он широко используется в радиоастрономии, исследовании земной поверхности со спутников, в военной технике (при наблюдении воздушных целей с земли и наземных с воздуха). Однако простая реализация этого метода в Зоне отчуждения по проведенным расчетам оказывается неприемлемой по следующим причинам. Во-первых, возгорающиеся объекты наблюдаются под малыми углами, в результате чего фон естественных излучений земной поверхности оказывает значительное маскирующее влияние. Во-вторых, известные способы радиотеплолокации (при ограничениях на стоимость аппаратуры) не гарантируют приемлемую точность определения координат объектов исследования. В-третьих, возникает необходимость обеспечения значительных коэффициентов некогерентного накопления сигналов, что порождает трудности технического характера.

Авторами статьи разработан способ многоканальной радиотеплопеленгации слабоконтрастных объектов, позволяющий успешно использовать его в условиях Чернобыля. При разработке данного способа обобщен опыт по разработке такой многоканальной системы, как цифровая антенная решетка (в части обеспечения

значительного динамического диапазона трактов и большого коэффициента накопления сигналов), а также обработки сигналов в условиях их аномальных искажений.

Укрупненная структурная схема предлагаемого многоканального радиотеплопеленгатора изображена на рис. 2. Схему предполагается реализовать в миллиметровом или сантиметровом диапазоне. Основное преимущество схемы - высокая эффективность: точность пеленгов не хуже 15 угловых минут, схема фиксирует возрастание температуры объектов на единицы градусов при их размерах 10x10 м, обеспечивая дальность действия измерителя в пределах 10-30 км при высоте используемой вышки 30 м и более. Эти характеристики достигаются при приемных каналах с коэффициентом шума порядка 1-2 дБ.

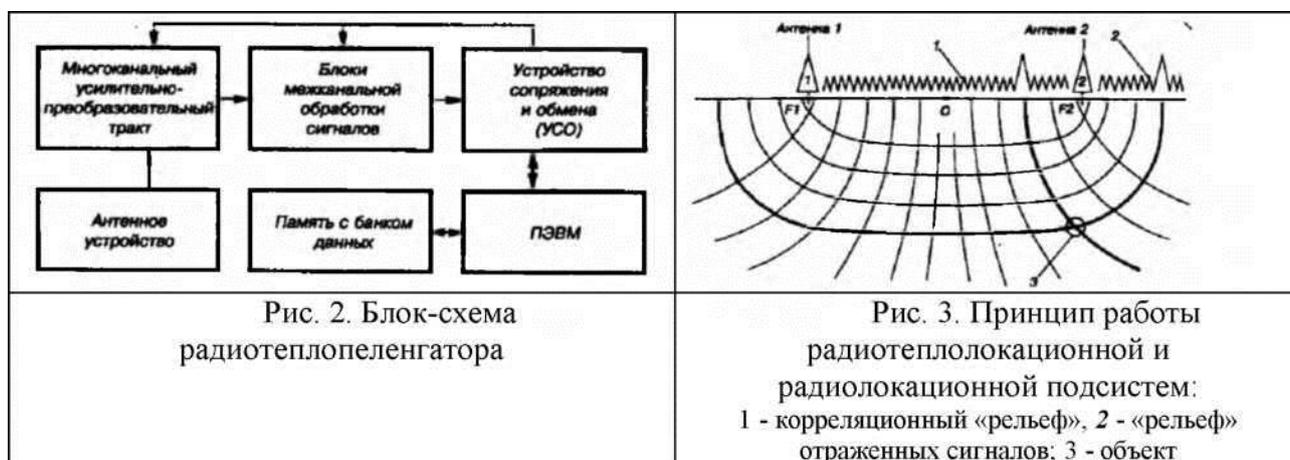
В настоящее время имеются два макета, работающих в сантиметровом диапазоне волн, на которых отрабатываются технические решения по проведению аналоговой обработки сигналов. Достигнутый коэффициент шума в их приемных каналах составляет величину 3 дБ.

**3. Радиотехническая система дистанционного зондирования подповерхностных сред.** Система предназначена для обнаружения топливосодержащих масс под поверхностью укрывающих их слоев бетона, строительных конструкций и других материалов; определения координатной информации распределения масс в подповерхностной среде и установления степени опасных мест локализации радиационных материалов.

Система состоит из трех подсистем: пассивной, - реализующей радиотеплолокационный метод, основанный на приеме и обработке сигналов электромагнитных излучений материалов, имеющих тепловую контрастность; активной - реализующей радиоволновые методы локации сред, электрофизические свойства которых меняются под ионизирующим воздействием радиационных излучений; активной, реализующей модифицированный индуктивный метод электроразведки, позволяющий получить интегральное представление об электромагнитных свойствах сред по аномалиям их магнитных полей, возбуждаемых производимыми излучениями электромагнитных волн.

Принцип действия пассивной подсистемы наиболее просто поясняется на примере определения координат точечного объекта.

Полагается, что система простейшей комплектации состоит из двух каналов, обеспечивающих прием и корреляционную обработку сигналов, принимаемых двумя разнесенными в пространстве антеннами. Всплеск получаемого корреляционного рельефа (рис. 3, между точками P1 и P2) указывает на положение гиперболы, проходящей через точечный объект. Фокусы гиперболы (P1 и P2) совпадают с энергетическими центрами используемых антенн. В трехмерном подповерхностном пространстве указанному всплеску соответствует гиперолоид вращения, если подповерхностная среда однородна.



127

Пассивная подсистема, следовательно, обеспечивает измерение координат объектов в гиперболической системе координат.

Если антенны подсистемы перемещать дискретно по поверхности среды, вращая относительно некоторой точки, то фактически можно получить кольцевую решетку. Совместная обработка получаемых при этом наблюдений позволяет однозначно и более точно определить координаты объектов, если они точечные, и их границы, если они объемные.

Возможности данной подсистемы в значительной мере определяются отношением полосы обрабатываемых сигналов к полосе выходных фильтров накопления. Поэтому основные требования к подсистеме сводятся к обеспечению широкополосности приема и обработки сигналов и их длительному накоплению.

Глубина действия подсистемы зависит от диапазона используемых частот. Большая глубина достигается при использовании более низких частот, что приводит к увеличению размеров используемых антенн, и наоборот.

Полагается, что радиолокационная подсистема в простейшей комплектации состоит из передающего и приемного устройств, обеспечивающих прием и излучение сигналов с помощью двух антенн, разнесенных в пространстве (рис. 3). В приемном устройстве обеспечивается измерение рельефа отраженных сигналов. Всплеск этого рельефа (рис. 3, правее точки Б2) указывает на положение эллипса, проходящего через объект. Фокусы этого эллипса (П и Б2) совпадают с энергетическими центрами используемых антенн. В трехмерном подповерхностном пространстве указанному всплеску соответствует эллипсоид вращения эллипса вокруг оси ПГ2, если среда однородна.

Радиолокационная подсистема, следовательно, обеспечивает измерение координат объектов в эллиптической системе координат. Как и в пассивном случае, вращение (или другое перемещение) антенн по поверхности среды позволяет однозначно и более точно определить координаты точечных и пространственно распределенных объектов. Возможности данной подсистемы также в основном определяются шириной спектра обрабатываемых сигналов.

Из изложенного видно, что при согласовании пассивной и радиолокационной подсистем в полосе обрабатываемых сигналов можно рационально объединить координатную информацию об объектах в ортогональных софокусных гиперболической и эллиптической системах координат. Кроме этого, в создаваемом образце в активной и пассивной подсистемах могут использоваться одни и те же антенны, общие высокочастотные блоки приемных устройств и единое устройство сопряжения и обмена с ПЭВМ.

128

Полагается, что подсистема индуктивной разведки состоит из генератора, излучающей антенны и двух приемников.

С помощью генератора и рамочной излучающей антенны в подповерхностной среде возбуждается электромагнитное гармонически меняющееся поле с дискретно меняющейся частотой. Антенна грубого приемного канала совмещена с излучающей антенной. Наводимые в ней первичные колебания устраняются с помощью компенсатора. В результате этого в приемнике грубого канала наблюдается реактивная составляющая сигнала, порожденная исследуемой средой. В приемнике точного канала, при перемещении его антенны по поверхности среды, измеряются параметры аномального изменения магнитного поля, порожденные подповерхностной средой.

В целом информационная основа активной и пассивной подсистем не является полностью эквивалентной. Активная подсистема оказывается более «чувствительной» к изменениям значений электрофизических параметров подземного пространства. Пассивная же подсистема лучше «чувствует» тепловой контраст сред, порождаемый проникающими в них излучениями, связанными с радиоактивным распадом веществ. Другими словами, объединение данных подсистем приводит к повышению возможностей общей системы.

Использованная подсистема индуктивного зондирования хотя и уступает по точности локализации неоднородностей активной подсистеме, однако позволяет проще и надежнее вести анализ более глубоких слоев. Это объясняется тем, что используемые в данной подсистеме сигналы имеют частоты более чем на порядок меньшие, чем в активной подсистеме.

Глубина действия подсистемы подповерхностного зондирования лежит в пределах 3-7 м, если используется метровый диапазон волн, близких к дециметровому, и - 5-15 м, если используется более низкочастотная часть метрового диапазона волн. При необходимости глубина действия системы может быть увеличена за счет использования скважин и соответствующей адаптации антенных систем.

Точность определения координат объектов (неоднородностей) лежит в пределах 5-10 % глубины действия.

В настоящее время созданы и успешно прошли испытания два макета, реализующие радиотеплолокационный и индуктивный методы разведки подповерхностных сред. Макеты предназначены для отработки использования данных методов в условиях специально создаваемого в Чернобыле компактного полигона [3].

Основные характеристики макета, реализующего радиотеплолокационный метод: диапазон используемых частот 150-600 МГц; шумовая температура входных УВЧ - менее 120 К; коэффициент усиления в приемных трактах регулируется в пределах 60-110 дБ; коэффициент корреляционного накопления - порядка 50 дБ.

Основные характеристики макета, реализующего индуктивный метод зондирования: мощность генерируемых сигналов - не менее 15 Вт; несущие частоты при переключении 1,75; 3,5; 7 МГц; пороговая чувствительность приемников выше 6 мВт.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При разработке предлагаемых систем учтены имеющийся опыт создания подобных систем за рубежом, специфика исследуемых сред Чернобыльской зоны, а также использованы оригинальные разработки авторов, создавших макеты.

129

2. Состояние экспериментальных наработок таково, что имеется настоятельная необходимость проверки основных технических решений в условиях специально создаваемых компактных полигонов.

3. Целесообразно параллельно с созданием компактных полигонов приступить к разработке действующих образцов систем.

1. *Исследования состояния опорных конструкций балок «Укрытия» Б1, Б2 в осях 47-51, Г-Л аварийного блока Чернобыльской АЭС // Отчет по НИР, выполненной НИИМБП по договору № 14. - Кн. 1: Численные исследования напряженно-деформированного состояния опорных конструкций. - Киев, 1993. - 382 с.*

2. *Радиотехническая система дистанционного определения пожароопасных участков и предупреждения о появлении газовых выбросов и альфа-зараженных территорий / В. А. Драпий, В. В. Гажиенко, И. И. Заруднев и др. - Деп. в УкрНИИНТИ 25.11.92., №-Госрегистрации 0193Ш16762.*

3. *Разработка зонда, предназначенного для определения местоположения и плотности топливосодержащих масс в помещении объекта «Укрытие» // Отчет по НИР, выполненной НИИМБП по договору № 85/95. - Киев, 1996. - 51 с.*

Получено 1.04.96