



NDT World, 2016, v. 19, no. 2, pp.
DOI: 10.12737/

О применимости компьютерной радиографии в ракетно-космической отрасли

Submitted 4.04.16
Accepted 27.04.16

Критерием применимости систем компьютерной радиографии для контроля изделий в ракетно-космической отрасли является сравнение выявляемости дефектов и достигаемая чувствительность при контроле на рентгеновскую плёнку и запоминающие пластины. На РКЗ им. М.В. Хруничева были подготовлены тестовые образцы, которые контролировались с использованием мелкозернистых рентгеновских плёнок и запоминающих пластин высокого разрешения. В статье представлены примеры полученных снимков, приведены результаты исследований и сделаны выводы о применимости метода компьютерной радиографии для нужд ракетно-космической отрасли.

К. А. Bagaev¹, S. A. Adaspaeva², S. F. Romashin²

Application of Computed Radiography in Missile and Aerospace Industry

Introduction. This article is dedicated to compare computed radiography (CR) X-Ray testing method with conventional testing, which uses X-Ray films, in aerospace sector. This problem is very urgent, because digital inspection methods are widely used in different industries. The purpose of the article was to describe experiments made at Khrunichev State Research and Production Space Center (Moscow).

Method. We have compared inspection results obtained from the CR system (Duerr HD CR-35 NDT Plus with X-Vizor software) and a conventional film system (P5). Some X-rays of parts made of aluminum and steel are presented in the article.

Results. Studies have shown that the sensitivity achieved with the high-resolution imaging plate (Duerr HD-IP Plus) was not worse than the sensitivity obtained with P5 X-Ray film. The exposure time was the same and X-ray tube voltage in case of CR system was 20% less. Sensitivity achieved with standard resolution imaging plates (Duerr IP) was also not worse than the results obtained with P5 X-Ray films, but the exposure time in that case was 3-4 times less. X-ray tube voltage in case of CR system was again 20% less. All the flaws existing on the film images are clearly visible on the digital images obtained with the high resolution CR system.

Conclusion. It can be concluded that application of CR systems in aerospace industry is permissible and economically justified.

Keywords: computed radiography, high-resolution imaging plates, Duerr, X-ray films, missile and space equipment

Введение

Повышение надёжности и долговечности оборудования, улучшение качества промышленной продукции возможно при условии совершенствования производства и внедрения новейших систем контроля качества, отвечающих требованиям XXI века. В действующем производстве установлены определённые требования к качеству продукции. Масштабы производства должны позволять проводить контроль на каждом этапе и осуществлять отбраковку деталей с дефектами.

По мере развития отрасли растут требования к качеству выпускаемой продукции. Основным критерием оценки качества деталей являются физические, геометрические, технологические признаки качества, такие как отсутствие

недопустимых дефектов, соответствие физико-механическим свойствам, соответствие чистоты обработки поверхности требуемым нормативам и т. п.

В настоящее время ни один технологический процесс не внедряется в производство без применения системы НК качества. Применение неразрушающих методов контроля (НМК) не требует материальных затрат, направленных на вырезку образцов, разрушение деталей, больших потерь времени.

В зависимости от принципа работы все НМК делятся на несколько видов: акустический, магнитный, проникающими веществами, радиационный, вихревой и т. д. В условиях промышленного производства рентгеновский метод НК сварных соединений получил наибольшее распространение. До сих

БАГАЕВ
Кирилл Александрович

Технический директор
ООО «Ньюком-НДТ»,
Санкт-Петербург.
К. ф.-м. н., III уровень по
радиационному виду НК.
Область научных интересов:
моделирование взаимодействия
излучения с веществом,
цифровая радиография. Стаж работы
в области цифровой радиографии
10 лет.



Сотрудники ФГУП «Государственный космический научно-производственный центр им. М. В. Хруничева», Москва

АДАСПАЕВА
Саида Айдналяевна

Инженер отдела № 141,
к. т. н., II уровень по УЗК
и ВИК. Область научных
интересов: ультразвуковая
дефектоскопия, волновые
методы воздействия на
нефтяные дисперсные
системы, ракетостроение,
цифровая радиография.



РОМАШИН
Сергей Фёдорович

Начальник центральной
заводской лаборатории.
Область научных интересов:
ультразвуковая
дефектоскопия,
цифровая радиография.



¹ Newcom-NDT, LLC, St. Petersburg, Russia; kb@newcom-ndt.ru

² Khrunichev State Research and Production Space Center, Moscow, Russia; saida_0501@bk.ru; romashinsf@rambler.ru

пор в России основным детектором рентгеновского и гамма излучения является [рентгеновская плёнка](#).

Однако за последние десять лет произошёл существенный прогресс в создании цифровых детекторов излучения: [систем компьютерной радиографии \(КР\)](#) [1], плоскочастотных и линейных детекторов.

В России системы КР нашли применение на предприятиях ПАО «Газпром», ОАО «Транснефть», в атомной, авиационной отраслях, их активно применяют для контроля качества электроники, печатных плат. Это стало возможным в связи с непрерывным совершенствованием технологии компьютерной радиографии. Например, в 2006 г. лучшая система КР позволяла получить базовое пространственное разрешение (БПР) 60 мкм, что существенно уступало мелкозернистой плёнке. В 2010 г. техника вышла на новый уровень, БПР систем ведущих производителей стало равным 40 мкм. Это позволило использовать системы КР в атомной отрасли, авиации и для контроля печатных плат. В 2015 г. появилась система КР с разрешением 30 мкм.

В настоящее время в ракетно-космической отрасли сложились технико-экономические условия, позволяющие на действующем производстве внедрять современные средства радиографического контроля, основанные на цифровых технологиях и соответствующем программном обеспечении (ПО).

Испытания

Исходя из предыдущего послыла, на ракетно-космическом заводе (РКЗ) ФГУП «ГКНПЦ им. М. В. Хруничева» (г. Москва) в 1-м квартале 2016 г. проводились испытания аппаратно-программного комплекса (АПК) для компьютерной радиографии на основе сканеров Duerr HD-CR 35 NDT Plus с запоминающими пластинами Duerr IP и Duerr HD-IP Plus и программным обеспечением X-Vizor на базе рентгеновской лаборатории с участием представителей ООО «Ньюком-НДТ». Сканеры и запоминающие пластины производятся в Германии, ПО — отечественное.

В ракетно-космической отрасли при рентгенографическом контроле предъявляются высочайшие требования к пространственному разрешению, используются мелкозернистые плёнки. Именно поэтому было решено провести тестирование системы КР Duerr, так как это единственная на данный момент система, обеспечивающая про-

странственное разрешение 30 мкм. Это подтверждено сертификатом независимого института материаловедения BAM (Германия) [2]. Данное оборудование также соответствует первому классу чувствительности по ГОСТ 7512-82 [3], что подтверждено ФГУП «ЦНИИ КМ «ПРОМТЕЙ».

Целью испытаний являлось определение возможностей АПК для производственных нужд РКЗ, а также выявление соответствия результатов радиографического контроля с использованием комплекса требованиям нормативных документов, действующих на предприятии: ГОСТ 7512-82, ОСТ 92-1611-2014, 15Е6-ТУ12, ОСТ 92-1114-80.

В качестве источника рентгеновского излучения использовался стационарный рентгеновский аппарат Витязь-160. Детекторами излучения являлись многоразовые запоминающие пластины Duerr IP — 10×24 (стандартного разрешения) и Duerr HD-IP Plus — 10×24 (высокого разрешения).

Для определения уровня чувствительности радиографических снимков применялись проволоочные и канавочные эталоны согласно ГОСТ 7512-82, а также образцы сварных швов на пластинах и трубках из АМг6 и 12Х18Н10Т соответственно. Были выбраны типовые материалы, используемые на производстве. Каждый из образцов был предварительно проконтролирован с использованием рентгеновской плёнки, снимки были расшифрованы. На производстве РКЗ используется плёнка P5, аналог Agfa D5 NDT.

Результаты

Данные, полученные с помощью АПК, сравнивались с результатами радиографического контроля с использованием рентгеновской плёнки, который проводился персоналом рентгеновской лаборатории РКЗ в соответствии с заводской технологической инструкцией. Работа с АПК проводилась сотрудниками ООО «Ньюком-НДТ».

Далее приведены некоторые из снимков, полученных с использованием системы компьютерной радиографии. На рис. 1, 2 представлены результаты контроля стального образца толщиной 5 мм и валиком усиления 2 мм на пластины обоих типов.

Время экспозиции для пластин высокого разрешения было взято таким же, как для плёнки P5, для пластин стандартного разрешения оно было в 4 раза меньше. При этом напряжение на рентгеновской трубке было установлено

на 20 кВ меньше, чем стандартное напряжение по нормативам для данной детали при контроле на рентгеновскую плёнку.

Согласно ГОСТ 7512-82 чувствительность контроля для данной толщины не должна превышать 0,2 мм для соответствия первому классу. Как видно из рисунков, в обоих случаях различимы 5 проволоочек 12-го эталона по ГОСТ 7512-82. Достигнута абсолютная чувствительность 0,160 мм. Система имеет запас по чувствительности в одну проволочку.

На снимке чётко виден искусственный дефект в виде вольфрамового включения. Чувствительность контроля, выявляемость дефектов, резкость границ при контроле стальных образцов с помощью системы КР Duerr оказалась не хуже, чем с использованием плёнки P5. При этом имел место существенный выигрыш во времени экспозиции и/или ресурсе рентгеновского аппарата. (Напряжение при контроле с использованием запоминающих пластин обычно на 10–20% ниже, чем при контроле с использованием плёнки).

Нужно обратить внимание на значение отношения сигнал/шум (ОСШ). Это один из ключевых параметров, определяющих качество цифрового снимка. Чем выше это отношение, тем чётче видны детали, выше контраст.

При контроле на плёнку критерием качества снимка является величина оптической плотности, в стандартах указывается её минимальное значение. При этом подразумевается, что соблюдаются условия хранения и проявки плёнки (концентрация химикатов, температура, время проявки и т. д.).

Аналогом оптической плотности является значение цифрового сигнала. И оно может выступать критерием качества снимка для конкретного цифрового детектора излучения при заданных параметрах работы прибора. Например, для сканера КР этими параметрами могут быть усиление ФЭУ, размер пикселя, мощность лазера, скорость вращения призмы. Для плоско-панельного детектора параметры иные, там величина сигнала зависит от усиления детектора, времени накопления кадра и т. д. В связи с многообразием приборов и параметров, которые определяют величину сигнала, стандарты по цифровой радиографии не вводят величину сигнала как отдельный критерий качества снимка.

Вместо него как раз используется отношение сигнал/шум. Эта величина является критерием качества безотноси-

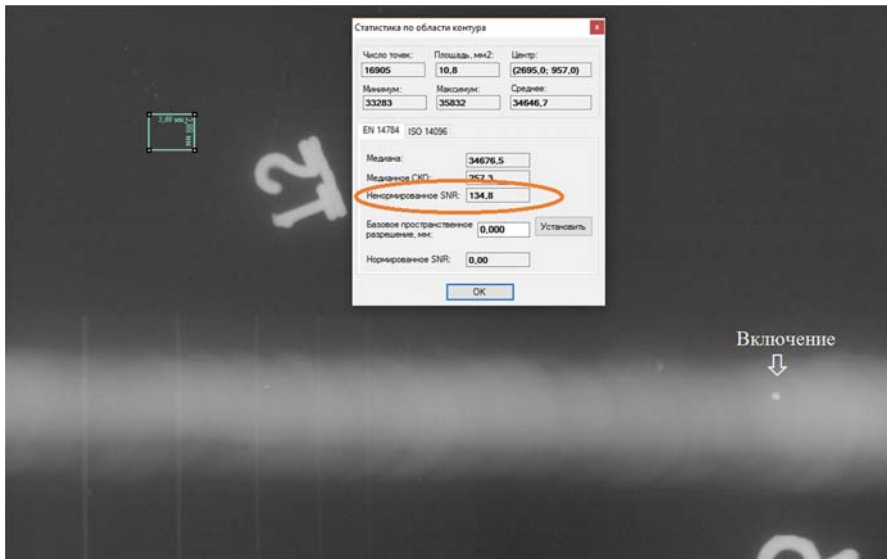


Рис. 1. Сталь 5 мм, снимок на пластину высокого разрешения

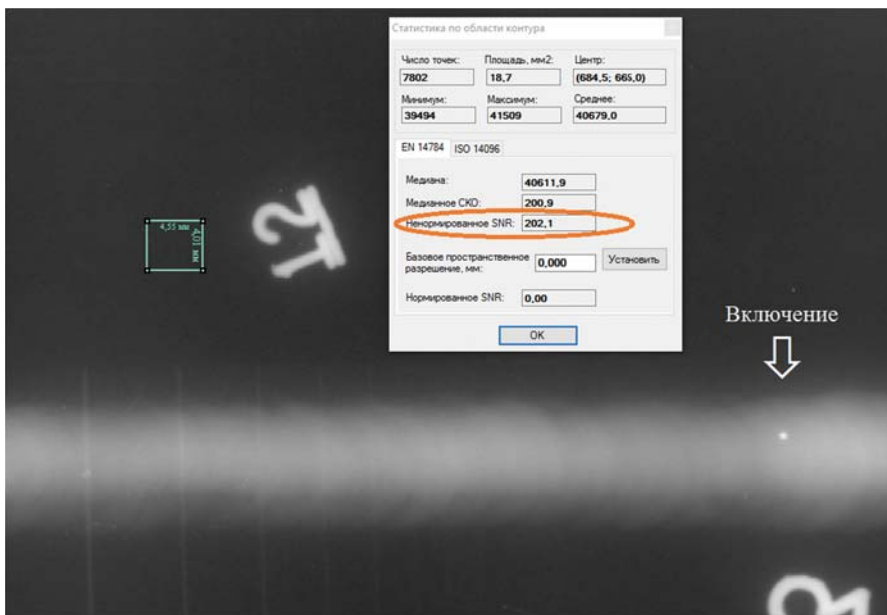


Рис. 2. Сталь 5 мм, снимок на пластину стандартного разрешения

тельно типа цифрового устройства и параметров его работы. Современное ПО для цифровой радиографии всегда содержит инструмент для вычисления ОСШ.

Стандарт EN 14784 [4] вводит 6 классов систем КР в зависимости от ОСШ. Для достижения наивысшего класса необходимо, чтобы отношение сигнал/шум было не менее 130 единиц.

Для обоих приведенных снимков отношение сигнал/шум больше 130 единиц. Эта величина автоматически вычислялась ПО X-Vizor по прямоугольной области согласно методике из EN 14784.

При контроле на пластины стандартного разрешения размер пикселя ска-

нирования выбирался равным 50 мкм, при контроле на пластины высокого разрешения — 25 мкм. В связи с этим чёткость снимка, резкость границ при контроле на пластины высокого разрешения лучше.

Расшифровка радиографических изображений проводилась с помощью программного обеспечения X-Vizor. При расшифровке снимков применялись цифровые фильтры, подстройка гистограммы, измерительная лупа и другие возможности, которые предоставляет цифровая обработка изображений. На рис. 3 показан результат контроля образца из АІ толщиной 5 мм с валиком усиления 1,5 мм. Использовались

пластины высокого разрешения. Было установлено минимально возможное напряжение для «Витязь-160» — 50 кВ, время экспозиции — 2 мин, ток 2 мА.

Как видно из рис. 3, достигнута чувствительность 0,1 мм по канавочному и 0,125 мм по проволочному эталону. Таким образом, вновь с запасом реализуются требования первого класса чувствительности по ГОСТ 7512–82. Также на снимке чётко видны все дефекты.

Компьютерная радиография позволяет применять цифровую фильтрацию изображений. После корректного применения цифрового фильтра можно чётче увидеть мельчайшие детали изображения. На рис. 4 показан тот же снимок после применения цифрового фильтра «Литьё». Здесь намного чётче видна третья проволочка эталона и частично видна четвёртая. Цифровой фильтр позволил улучшить качество снимка.

На следующем рисунке показано применение цифрового инструмента «Измерительная лупа» для измерения размера дефектов. С его помощью можно увеличить интересующую область снимка и измерить размер дефекта. Есть возможность менять кратность увеличения и цену деления для измерения размеров дефектов.

Использование цифровой техники позволило заметить небольшой дефект слева от поры. При контроле на плёнку он был практически неразличим.

Как видно из приведённых примеров, при использовании цифровых методов радиационного контроля значительную роль играет программное обеспечение. Также очень важно то, как реализуется отображение полученного цифрового снимка на мониторе компьютера. Обычно цифровые системы выдают на компьютер снимок в формате 2 байта информации на пиксель — от 12 до 16 бит на точку. Понятно, что чем выше разрядность оцифровки, тем больше информации содержит снимок. (Система КР Duerg выдаёт снимок в формате 16 бит на точку.)

При этом большинство мониторов отображают лишь 256 градаций серого, то есть только 8 бит информации. Использование 10-битных мониторов позволяет улучшить отображение снимка на экране и одновременно отобразить детали, которые сливаются на 8-битном мониторе. 10-битные мониторы несущественно дороже обычных, 8-битных. Проблема в том, что большинство программ для компьютерной радиографии в любом случае отображают снимок в формате 8 значащих

бит на точку. По нашей информации, ПО X-Vizor — единственное в России, которое реализует вывод цифрового снимка в режиме 10 бит на пиксель.

К сожалению, нам приходилось сталкиваться с заявлениями о том, что цифровой снимок содержит 32 бита информации на точку. Это не так. В данном случае имеет место подмена понятий. Дело в том, что при стандартном выводе снимка на монитор компьютера точка экрана кодируется четырьмя байтами (это как раз 32 бита). Один из этих байтов определяет прозрачность (не несёт никакой информации, связанной с контролем), три остальных отвечают за цвет точки. Это так называемые RGB байты — Red, Green, Blue. С помощью их комбинации можно реализовать любой цвет. Так как рентгеновские снимки серые, то для кодирования подобной цветопередачи три цветовых байта всегда содержат одно и то же значение $R = G = B$. При $R = G = B = 0$ получается чёрный снимок, при $R = G = B = 255$ белый. Остальные значения — это оттенки серого от черного к белому. Таким образом, 32-битный пиксель содержит только 256 градаций серого. Это 8 бит информации, а не 32.

Выводы

1. Наши исследования показали, что компьютерная радиография не уступает по качеству стандартному методу радиационного контроля — с использованием плёнки. Считаем правильным дальнейшее изучение и последующее внедрение данного метода на предприятиях ракетно-космической отрасли.

2. Оценка производительности испытываемого оборудования показала, что использование запоминающих пластин требует существенно (на 20%) меньшей энергии излучения (напряжения на рентгеновской трубке). При этом время экспозиции с применением запоминающих пластин высокого разрешения сравнимо со временем экспозиции на плёнку P5, а при контроле на пластины стандартного разрешения время экспозиции уменьшается в 2–4 раза.

3. Система компьютерной радиографии Duerg позволила выявить все дефекты на контрольных образцах. При этом чувствительность контроля соответствовала первому классу по ГОСТ 7512–82.

4. Несомненным достоинством метода компьютерной радиографии является практически мгновенное преобразование скрытого радиационного изображения в цифровое. Благодаря

Рис. 3. Al 5 мм, снимок на пластину высокого разрешения

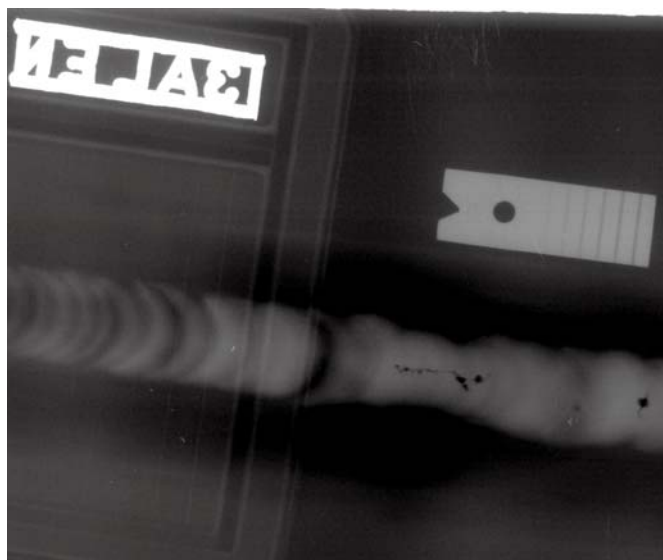
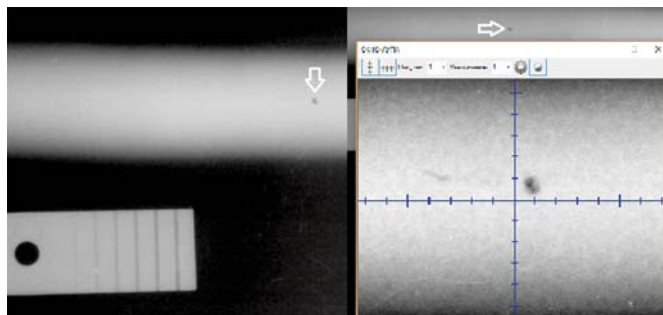


Рис. 4. Al 5 мм, снимок на пластину высокого разрешения. Вид после применения цифрового фильтра «Литьё»



Рис. 5. Инструмент программы X-Vizor «Измерительная лупа»



этому в несколько раз увеличивается производительность труда оператора-дефектоскописта. Производительность испытанного АПК по сравнению с традиционным способом увеличивается минимум в 2–4 раза.

5. Ещё одним преимуществом компьютерной радиографии перед рентгеновской плёнкой является более широкий динамический диапазон. Это позволяет за одну экспозицию просвечивать существенно разнотолщинные объекты. Также широта динамического диапазона позволяет «вытянуть» слабый сигнал,

либо наоборот «уйти от пересвета», если на пластину была набрана излишняя доза излучения. В случае «пересвета» пластина сканируется в режиме с меньшим усилением ФЭУ и получается нормальный снимок.

6. Главной проблемой, препятствующей широкому применению компьютерной радиографии в России, является отсутствие отечественной нормативной базы. Наши ГОСТ и ОСТ устарели. Их необходимо обновлять и расширять, включать в них современные технологии, развившиеся в последние годы.

Разумно за основу принять международный опыт, так как за рубежом стандарты по цифровой радиографии приняты и успешно применяются уже более 10 лет. Оптимальный по времени и трудозатратам способ — это перевод международных стандартов по цифровым методам радиационного контроля и утверждение их в качестве российских, за исключением требований к качеству контроля. Эти требования должны быть гармонизированы с действующими российскими ГОСТ и ОСТ.

Литература

1. Willems. P., Sauerschnig. M. A new Computed Radiography system covering Corrosion to Weld NDT applications, performance assessment

according international standards ISO 17636-2. — In: 11th ECNDT/Book of Abstracts. — Prague, 2014, p. 140.

2. Сертификат на системы компьютерной радиографии института BAM (Federal Institute for Materials Research and Testing). № BAM/ZBF/003/15, выдан 25 мая 2015 г.

3. ГОСТ 7512–82. Контроль неразрушающий, соединения сварные, радиографический метод. — М.: Изд-во стандартов, 1982. — 33 с.

4. Европейский стандарт EN 14784–1,2. Non-destructive testing — Industrial computed radiography with storage phosphor imaging plates. Part1: Classification of systems. Part 2: General principles for testing of metallic materials using X-rays and gamma rays.

according international standards ISO 17636-2. In: 11th ECNDT. Book of Abstracts. Prague, 2014, p. 140.

2. Certificate for Computer Radiography Systems by the Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM, Germany) No. BAM/ZBF/003/15 dd 25.05.2015.

3. GOST 7512–82. Kontrol nerazrushayushchiy, soedineniya svarnye, radiograficheskiy metod [Nondestructive testing. Welded joints. Radiography method], IPK Izdatelstvo Standartov, Moscow, 1982, 33 p. (in Russ.).

4. EN 14784–1,2. Non-destructive testing — Industrial computed radiography with storage phosphor imaging plates. Part1: Classification of systems. Part 2: General principles for testing of metallic materials using X-rays and gamma rays.

References

1. Willems. P., Sauerschnig. M. A new Computed Radiography system covering Corrosion to Weld NDT applications, performance assessment

Статья получена 4 апреля 2016 г., в окончательной редакции — 27 апреля



Комплекс Цифровой Радиографии «КАРАТ» с программным обеспечением X-Vizor
Сделано в России

Мини компьютер

Автономная работа без компьютера

Запись на SD

До 32 Гб

Вес 17,5 кг

Самый легкий в своем классе

HD дисплей

Цветной сенсорный дисплей

Новая технология считывания

Запатентованная система TreFoc

Прочный кейс

Обеспечивает безопасную транспортировку

Питание от батареи

Может работать автономно до 8 часов

Первый и единственный в мире сканер

с разрешением 30 мкм !!!
(сертифицировано BAM)



тел.: +7 812 313 9674 info@newcom-ndt.ru
+7 812 313 9675 www.newcom-ndt.ru