

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПОЛЯРИЗАЦИИ ОТРАЖЕННОГО СВЕТА ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОЙ ДИАГНОСТИКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

А.С. Бугаев<sup>1</sup>, А.И. Ивашов<sup>2</sup>, С.И. Ивашов<sup>2</sup>,  
Б.А. Левин<sup>3</sup>, Б.Л. Недорчук<sup>3</sup>, В.В. Разевиг<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт, Москва, Российская Федерация  
e-mail: bugaev@cos.ru

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: sivashov@rslab.ru; ivashovai@mail.ru; vrazevig@rslab.ru

<sup>3</sup>Московский государственный университет путей сообщения,  
Москва, Российская Федерация  
e-mail: borisnedorchuk@mail.ru; tu@miit.ru

*Предложен новый метод бесконтактной оптической диагностики железнодорожного полотна, который позволяет выявлять локальные дефекты рельсов (волны, сколы, трещины и др.) и может обеспечить оперативность осмотра железнодорожных путей с помощью дистанционно пилотируемых летательных аппаратов или других видов летательной техники. Метод обнаружения дефектов заключается в регистрации отраженного от поверхности головки рельсов света (который становится при этом частично поляризованным) с использованием фотоприемного устройства, снабженного поляризационным фильтром. Для описания поляризованного света был выбран вектор Стокса, так как с его помощью легче анализировать прохождение лучей света через оптические системы. Показано, что последующая алгоритмическая обработка полученных изображений позволяет повысить контраст дефектов по сравнению с контрастом при обычной видеорегистрации. Были проведены эксперименты для проверки возможности визуализации дефектов непосредственно на железнодорожных путях, которые подтвердили эффективность метода. Метод является новым, поэтому необходимы дополнительные исследования по определению оптимальных характеристик поляризационной съемки с учетом разнообразия встречающихся дефектов.*

**Ключевые слова:** диагностика железнодорожных путей, бесконтактная диагностика рельсов, эффект поляризации отраженного света, безопасность движения.

## USING EFFECT OF POLARIZATION OF REFLECTED LIGHT FOR REMOTE DETECTION OF RAIL DEFECTS

A.S. Bugaev<sup>1</sup>, A.I. Ivashov<sup>2</sup>, S.I. Ivashov<sup>2</sup>,  
B.A. Levin<sup>3</sup>, B.L. Nedorchuk<sup>3</sup>, V.V. Razevig<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow Region,  
Dolgoprudny, Russian Federation  
e-mail: bugaev@cos.ru

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University,  
e-mail: sivashov@rslab.ru; ivashovai@mail.ru; vrazevig@rslab.ru

<sup>3</sup>Moscow State University of Railway Engineering, Moscow, Russian Federation  
e-mail: borisnedorchuk@mail.ru; tu@miit.ru

*A new method is proposed for contactless optical diagnostics of railroad bed, which makes it possible to reveal local defects of rails (waves, cracks, etc.) and can provide the immediacy of railway line inspection using the remotely-piloted flying vehicles*

*and other types of aircrafts. The fault-detection method consists in recording the light reflected from the rail's top surface (which becomes partially polarized in this case) using a photodetector equipped with a polarization filter. For description of polarized light, the Stokes vector is chosen because with its help it is easier to analyze the light beam transmission through optical systems. It is shown that the subsequent algorithmic processing of the obtained images makes it possible to enhance the defect contrast in comparison with the contrast during the typical video recording. A series of experiments for checking the possibility of defect visualization directly on railway tracks were carried out, which confirmed the method efficiency. The method is new, so it is necessary to perform additional investigations for determination of optimal parameters of polarization survey taking into account the diversity of defects occurred.*

**Keywords:** diagnostics of railway line, contactless diagnostics of rails, polarization of reflected light, traffic safety.

**Введение.** В настоящее время доля перевозок по железным дорогам составляет почти половину от всего пассажирооборота и грузооборота России. При этом, ввиду большой протяженности страны и объема перевозок, автомобильный и авиационный транспорт не могут конкурировать с железнодорожными перевозками. В связи с этим происходит сокращение интервалов движения между поездами и увеличение их скорости. Особые требования возникают при обеспечении безопасности движения высокоскоростных пассажирских составов при скоростях движения 250 км/ч и более. Сеть таких высокоскоростных маршрутов будет постоянно возрастать, особенно в Европейской части России.

Эти обстоятельства значительно увеличивают риски техногенных катастроф, последствия которых возрастают в некотором приближении пропорционально кинетической энергии состава, т.е. квадрату его скорости. Особенно опасны крушения пассажирских поездов и грузовых составов, перевозящих взрывоопасные, ядовитые и радиоактивные вещества. Очаг поражения может простираться на десятки квадратных километров. Во многих случаях подобные катастрофы приводили к эвакуации близлежащих населенных пунктов и блокировке железнодорожного движения в обоих направлениях на срок до недели. Существенным при железнодорожных катастрофах является и экологический ущерб, требующий значительных затрат средств и времени для его ликвидации.

Для повышения безопасности движения пассажирских поездов и грузовых составов необходим постоянный мониторинг железнодорожных путей, который осуществляется путевыми обходчиками как визуально, так и с помощью простейших технических средств, а также путевыми тележками и путеизмерительными вагонами, оснащенными разнообразными датчиками и путеизмерительной техникой.

В литературе описаны различные методы, применяемые для диагностики железнодорожных путей: ультразвуковые и механические,

измерения датчиками ускорений и угловых перемещений. В последнее время для диагностики балластного слоя стали использовать и поверхностные радиолокаторы [1–5]. Однако существующие технические средства не всегда удовлетворяют предъявляемым требованиям по оперативности и достоверности получаемых данных о состоянии железнодорожных путей.

Значительную угрозу для движения железнодорожных составов представляют террористические акты, особенностью которых является скрытность и быстрота их организации. Требуемую оперативность досмотра железнодорожных путей можно обеспечить с помощью дистанционно пилотируемых летательных аппаратов (ДПЛА) или других видов летательной техники, например вертолетов, обладающих необходимой скоростью и гибкостью применения [6]. Использование ДПЛА может быть весьма полезным и при выявлении традиционных дефектов рельсов, крепежных элементов, шпал, а также состояния балластного слоя. Основные дефекты, встречающиеся на железнодорожных путях и влияющие на безопасность движения, описаны в работах [1, 7].

Для решения задач повышения безопасности движения железнодорожного транспорта необходима разработка новых технических средств диагностики железнодорожных путей, в том числе допускающих установку на летательных аппаратах.

Цель работы — рассмотреть возможность использования поляризационного эффекта, который возникает при отражении электромагнитного излучения видимого диапазона от металлической поверхности головки рельса [5, 8]. При отражении излучения естественного дневного света от границы раздела двух сред воздух–металл происходит его частичная поляризация, которая зависит, с одной стороны, от угла визирования, с другой — от оптических свойств граничащих сред. Изменение поляризационных характеристик излучения, отраженного от изучаемой поверхности, содержит информацию о параметрах поверхности. Отслеживая изменения поляризации отраженного излучения, можно сделать вывод о свойствах поверхности. В рассматриваемом случае объект изучения — головки рельсов, которые для нормальной эксплуатации должны иметь практически идеально ровную верхнюю поверхность. Все дефекты и посторонние объекты, отличающиеся по поляризационным характеристикам от поляризационных характеристик гладкой поверхности рельсов, будут иметь повышенный контраст на изображениях после обработки описанным далее методом.

**Постановка задачи.** Изучение поляризационных характеристик отраженных электромагнитных волн достаточно часто используется для анализа структуры металлических поверхностей, в том числе и для

определения квантово-механических свойств электронного газа вблизи поверхности металла [4]. Однако для решения задач диагностики железнодорожных рельсов этот метод не нашел широкого применения.

Под воздействием значительных нагрузок, возникающих при прохождении железнодорожных составов, на поверхности головки рельсов образуются различные дефекты, а приповерхностный слой вследствие ударных нагрузок обода колеса может деформироваться. В связи с этим лучи, отраженные от элементарных площадок, будут иметь различные поляризационные характеристики [9]. Предполагается, что использование такого метода позволит выявлять локальные дефекты рельсов (сколы, трещины и др.), так как характеристики их поверхности будут отличаться от характеристик поверхности рельсов, не содержащих дефектов. Возможно определение такого дефекта, как волнистость рельс. Это обусловлено тем, что на участках с волнистостью в каждой точке изменяется угол падения (соответственно и угол отражения) света и это будет влиять на поляризацию и проявляться на получаемых изображениях.

Приведем некоторые пояснения, которые далее будут использованы при объяснении эффектов, возникающих при отражении света от головки рельса. Как следует из решений уравнений Максвелла, в электромагнитной волне, распространяющейся в свободном пространстве, вектор напряженности электрического поля  $\mathbf{E}$  перпендикулярен вектору напряженности магнитного поля  $\mathbf{H}$ , оба вектора перпендикулярны направлению распространения электромагнитной волны [10]. Отметим, что при описании распространения электромагнитных волн обычно рассматривают поведение вектора  $\mathbf{E}$ , подразумевая, что вектор  $\mathbf{H}$  магнитного поля связан с ним определенным образом. При этом, если колебания вектора  $\mathbf{E}$  фиксированы строго в одном направлении, то свет называется линейно поляризованным. Если конец вектора  $\mathbf{E}$  двигается по окружности, то такая поляризация называется круговой. Возможна эллиптическая поляризация электромагнитной волны, когда конец вектора  $\mathbf{E}$  описывает эллипс.

В естественном свете изменение вектора электромагнитного поля происходит хаотично, так как он представляет собой совокупность многих некогерентных между собой компонент. В этом случае все направления вектора  $\mathbf{E}$  равновероятны. Такой свет называется неполяризованным. Если некоторое направление вектора электрического поля предпочтительно, то волна называется частично поляризованной.

Для описания поляризованного света существуют различные методы (сфера Пуанкаре, вектор Стокса, вектор Джонса, квантово-механическое представление) [11]. В данной работе был выбран

вектор Стокса, поскольку с его помощью легче анализировать прохождения лучей света через оптические системы.

Вектор Стокса — совокупность четырех величин, называемых стоксовскими параметрами, которые характеризуют интенсивность и поляризацию света. Эти параметры имеют размерность интенсивности: каждый параметр соответствует не мгновенной интенсивности, а интенсивности, усредненной во времени, которое практически необходимо для измерения. Четыре параметра представляют собой столбец-вектор

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix},$$

где  $I$  — интенсивность;  $Q$ ,  $U$  и  $V$  — параметры преимущественной горизонтальной поляризации, преимущественной поляризации под углом  $45^\circ$  и преимущественной правополяризации соответственно.

Часто для экономии места вектор записывается в виде строки; при этом используются фигурные скобки, чтобы напомнить о том, что вектор в действительности является столбцом:  $\{I, Q, U, V\}$ . Если параметр имеет отрицательное значение, то преимущественной является ортогональная поляризация [11].

Предлагаемый метод заключается в регистрации отраженного от поверхности рельсов света с помощью фотоприемного устройства, снабженного поляризационным фильтром (например, зеркальной фотокамеры). Железнодорожный путь обрабатывается пофрагментно, размер каждого фрагмента определяется размером матрицы регистрирующего устройства, фокусным расстоянием объектива и расстоянием, с которого проводится съемка.

Пусть поляризационные характеристики отраженного от поверхности рельса света описываются вектором Стокса  $\{I, Q, U, V\}$ , причем в каждой точке обследуемого фрагмента поляризационные характеристики могут быть различными. Вследствие этого каждый параметр Стокса представляет собой прямоугольную матрицу, размер которой соответствует размеру матрицы регистрирующего устройства (в пикселях). Поляризацию светового луча на выходе фильтра будем описывать вектором  $\{I_C(\phi), Q_C(\phi), U_C(\phi), V_C(\phi)\}$ , зависящим от угла  $\phi$  между вертикальной плоскостью, проходящей через ось рельса, и осью пропускания поляризационного фильтра.

Для выявления связи поляризационных характеристик электромагнитной волны до и после фильтра воспользуемся методом Мюллера. Этот метод представляет собой матричное описание взаимодействия

светового луча и оптического устройства, через которое проходит свет, и позволяет вычислить результат этого взаимодействия [13]. Выражение, определяющее характеристики оптического устройства, называется матрицей Мюллера, которая состоит из четырех строк и четырех столбцов. Вектор Стокса световой волны на выходе оптического устройства определяется путем перемножения матрицы Мюллера и вектора Стокса входного луча.

Матрица Мюллера для используемого линейного поляризационного фильтра имеет вид [11]

$$\mathbf{M} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & C_2 & S_2 & 0 \\ C_2 & C_2^2 & C_2 S_2 & 0 \\ S_2 & C_2 S_2 & S_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

где  $C_2 = \cos 2\phi$ ;  $S_2 = \sin 2\phi$ .

С учетом этого для вектора Стокса световой волны на выходе фильтра справедливо следующее выражение:

$$\begin{bmatrix} I_C(\phi) \\ Q_C(\phi) \\ U_C(\phi) \\ V_C(\phi) \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} I + QC_2 + US_2 \\ IC_2 + QC_2^2 + UC_2 S_2 \\ IS_2 + QC_2 S_2 + US_2^2 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Матрица фотокамеры нечувствительна к поляризации света и реагирует только на его интенсивность, следовательно, из полученного вектора Стокса выбираем первый параметр и записываем выражение для модели регистрируемого сигнала

$$I_C(\phi) = \frac{1}{2}[I + Q \cos 2\phi + U \sin 2\phi]. \quad (1)$$

Для реализации предлагаемого метода необходимо вычислить параметры Стокса для света, отраженного от поверхности рельса. В работе [11] предложено поместить на пути луча детектор и с использованием линейного поляризационного фильтра провести три измерения интенсивности: без фильтра  $I_1$ ; с горизонтальным расположением оси пропускания фильтра  $I_2$ ; с расположением оси фильтра под углом  $45^\circ$   $I_3$ . Затем находятся оценки параметров поляризации

$$\tilde{I} = I_1; \quad \tilde{Q} = I_2 - I_1; \quad \tilde{U} = I_3 - I_1.$$

Параметр  $V$ , определяющий циркулярную поляризацию, не может быть измерен с помощью только линейного поляризационного фильтра, поэтому в предлагаемом методе не применяется.

В связи с тем что снятие (установка) фильтра может вызвать перемещение фотокамеры и нарушить кадрирование, а также для повышения точности измерений была использована усовершенствованная

методика, предложенная в работе [12]. Согласно этой методике для каждого фрагмента пути выполнялась серия кадров с различной ориентацией фильтра. По серии кадров с учетом модели (1) можно вычислить оценки трех параметров Стокса  $\tilde{I}$ ,  $\tilde{Q}$ ,  $\tilde{U}$  и ошибку модели  $err^2$  по формулам

$$\tilde{I} = \frac{2}{N} \sum_{j=1}^N I_C(\phi_j); \quad (2)$$

$$\tilde{Q} = \frac{4}{N} \sum_{j=1}^N I_C(\phi_j) \cos 2\phi_j; \quad (3)$$

$$\tilde{U} = \frac{4}{N} \sum_{j=1}^N I_C(\phi_j) \sin 2\phi_j; \quad (4)$$

$$err^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\tilde{I} + \tilde{Q} \cos 2\phi_j + \tilde{U} \sin 2\phi_j - I_C(\phi_j))^2, \quad (5)$$

где  $N$  — число кадров;  $\phi_j = (2\pi j)/N$  — угол поворота поляризационного фильтра для  $j$ -го кадра.

Любые пространственные вариации значений любого из параметров в (2)–(5) свидетельствуют о присутствии в данном месте некоторой особенности поверхности, которая потенциально может быть дефектом рельса.

**Результаты экспериментов.** В целях проверки возможности визуализации дефектов были проведены эксперименты на участке железнодорожных путей Октябрьской железной дороги в районе Крестовского моста (Москва). Для съемки использовали профессиональную зеркальную камеру Canon 40D с установленным объективом Canon EF-S 17-55 f/2.8 IS USM. Съемку осуществляли через поляризационный фильтр Marumi DHG LENS CIRCULAR P.L.D. Фокусное расстояние 55 мм.

На одном из рельсов было обнаружено смятие головки рельса длиной около 30 см и глубиной около 3 мм (рис. 1). Поверхность вмятины была гладкой, практически полированной, и не отличалась на глаз от других участков рельса.

Проводилась съемка поверхности дефекта, при которой поляризационный фильтр поворачивался с шагом  $6^\circ$  или  $12^\circ$  до полного поворота на  $360^\circ$ , т.е. в каждом случае получалась серия снимков из 60 и 30 кадров соответственно.

Изображение рельса с вмятиной головки при оценке параметров Стокса и ошибки модели, вычисленных по (2)–(5), приведены на рис. 2.



*a*

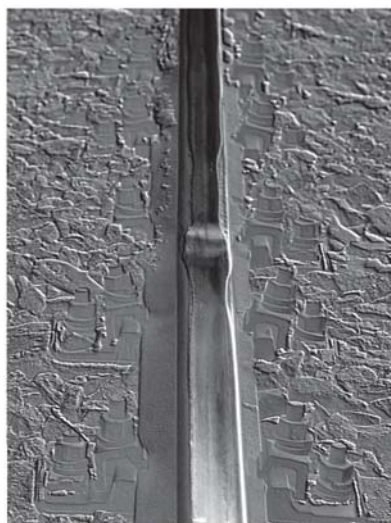


*б*

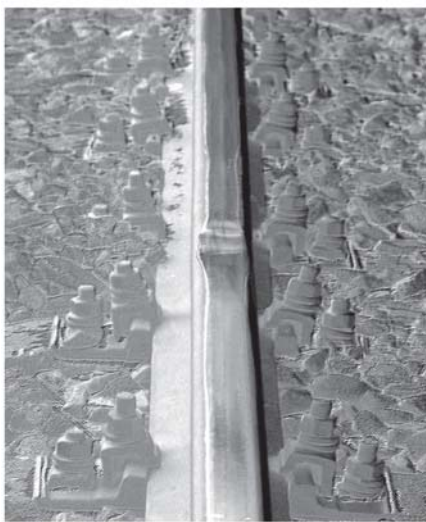
Рис. 1. Измерение параметров смятия головки рельса (длина 30 см, глубина около 3 мм) (*a*) и вид поверхности вмятины головки рельса (*б*)



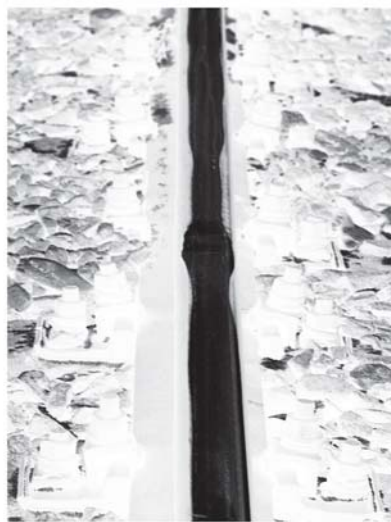
*a*



*б*



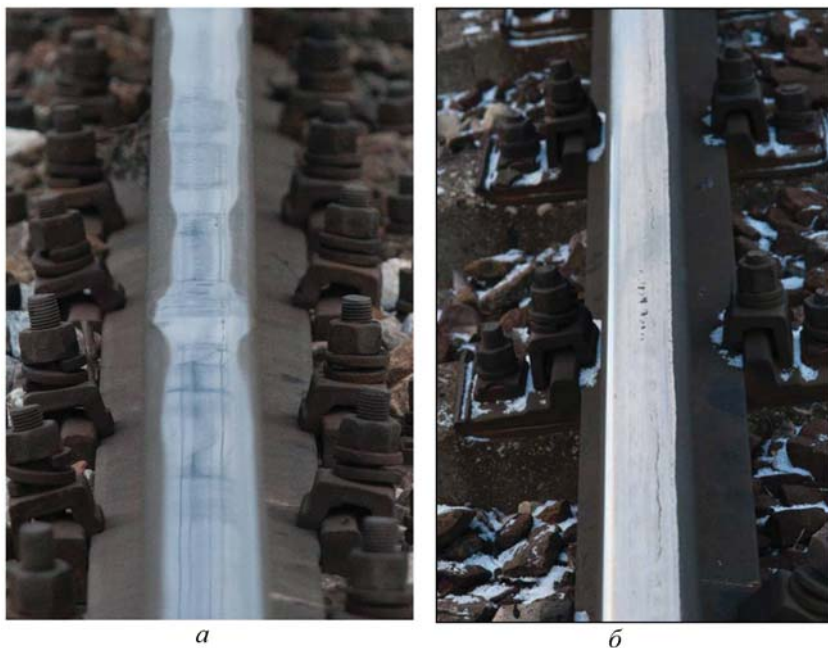
*в*



*г*

Рис. 2. Изображение рельса с вмятиной головки при оценке параметров Стокса  $\bar{I}$  (*a*),  $\bar{Q}$  (*б*),  $\bar{U}$  (*в*) и ошибки модели (*г*)





*а*

*б*

**Рис. 3.** Вид вмятины головки рельса при больших углах визирования (*а*) и рельс с поверхностными дефектами (*б*)

Вмятина головки рельса сильнее всего проявилась при оценке параметра  $\tilde{Q}$  (см. рис. 2, *б*). Визуально вмятина на головке рельса представляет собой некоторую выпуклость, полученную после поляризационной обработки сигнала. Такое изображение пригодно для несложной автоматической обработки в целях выявления дефектов.

При увеличении угла визирования до  $82^\circ$  в месте вмятины головки образовались дефекты, которые не совпадают с ее рельефом (рис. 3, *а*). В этом случае изменения поляризационных характеристик связаны с деформацией кристаллической решетки материала поверхности рельса в результате ударных нагрузок, возникающих при движении колеса по неровной поверхности. Дальнейшее развитие деформации может привести к формированию трещин и даже излому рельса. Тогда для отслеживания динамики развития дефекта совместно с поляризационными измерениями желательно использовать ультразвуковую дефектоскопию.

В качестве еще одного тестового объекта был выбран рельс с локальными поверхностными дефектами, которые представляли собой выщербины на поверхности его головки (рис. 3, *б*). Хотя такие дефекты визуально легко обнаружить, была рассмотрена задача повышения их контраста для последующей автоматизированной обработки алгоритмами распознавания образов. Результаты обработки изображений этого фрагмента рельса предложенным методом приведены на

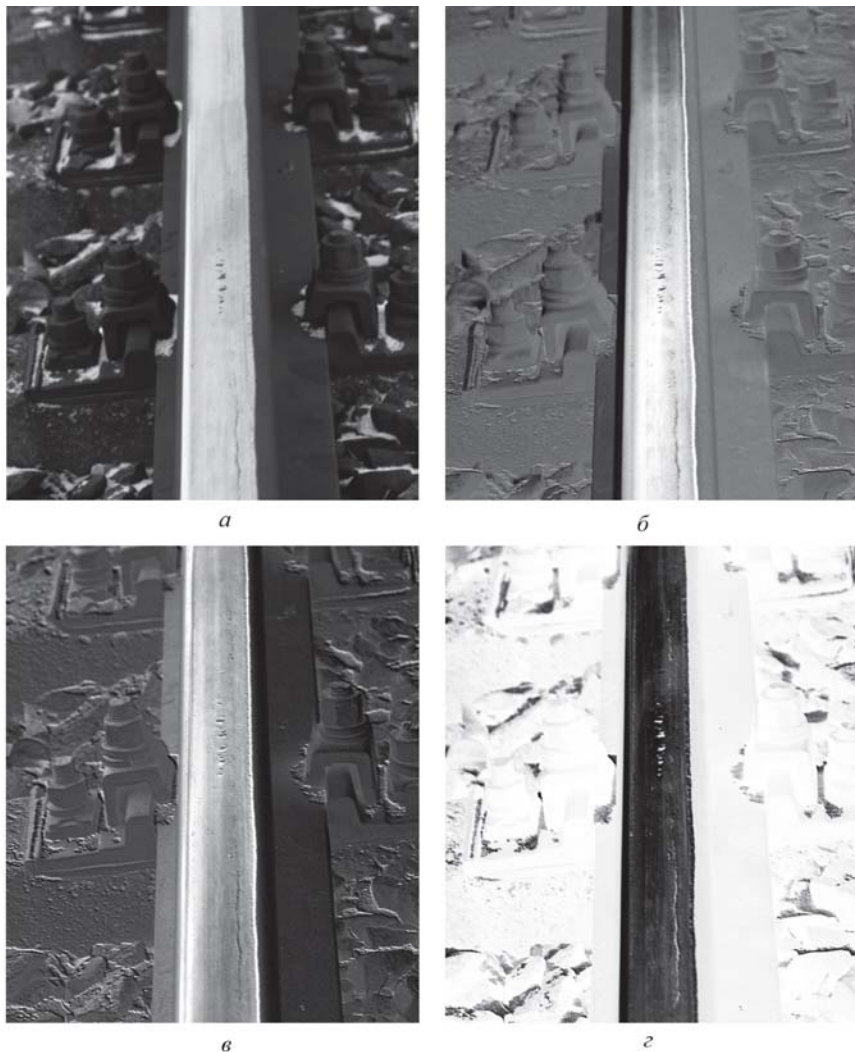


Рис. 4. Изображение рельса с поверхностными дефектами при оценке параметров Стокса  $\tilde{I}$  (а),  $\tilde{Q}$  (б),  $\tilde{U}$  (в) и ошибки модели (г)

рис. 4. Дефекты лучше всего проявляются на изображении, отражающем ошибку модели поляризованного сигнала (рис. 4, г).

**Заключение.** В настоящей работе был рассмотрен метод бесконтактной диагностики железнодорожных рельсов с использованием поляризационных характеристик отраженного естественного света. Показано, что в результате частичной поляризации света, возникающей при его отражении от поверхности головки рельсов и последующей алгоритмической обработки полученных изображений, возможно повышение контраста дефектов. Поскольку такой метод является сравнительно новым, необходимо проведение дополнительных исследований по определению оптимальных характеристик поляризационной съемки с учетом разнообразия встречающихся дефектов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базулин Е.Г. Получение изображений дефектов в перьях подошвы рельсов методом SAFT с учетом многократного отражения ультразвукового импульса от границ объекта контроля // Дефектоскопия. 2010. № 2. С. 63–77.
2. Подгорная Л.Н. Разработка и исследование системы диагностики рельсового пути на микромеханических чувствительных элементах: автореф. дис. . . . канд. техн. наук, Санкт-Петербург, 2010. 15 с.
3. Боронахин А.М., Гупалов В.И., Мочалов А.В. Способ инерциальных измерений неровностей рельсового пути: пат. № 2242391 Российская Федерация. 2002.
4. Ходорковский Я.И., Анучин О.Н., Гусинский В.З., Емельянцеv Г.И. Способ и устройство контроля состояния рельсовой колени: а.с. 2123445. 1998.
5. Olhoeft G.R., Selig E.T. Ground penetrating radar evaluation of railway track substructure conditions // Proceedings of SPIE. 2002. Vol. 4758. P. 48.
6. Eyre-Walker R.E.A., Earp G.K. Application of aerial photography to obtain ideal data for condition based risk management of rail networks // The 4th IET International Conference on Railway Condition Monitoring 18–20 June 2008, Conference Centre, Derby, UK.
7. Техническая эксплуатация железных дорог и безопасность движения / под ред. Э.В. Воробьева, А.М. Никонова. М.: Маршрут, 2005. 531 с.
8. Соколов А.В. Оптические свойства металлов. М.: ГИФМЛ, 1961. 464 с.
9. Ивашов С.И., Разевиг В.В., Левин Б.А., Бугаев А.С., Воробьев В.Б., Недорчук Б.Л. Способ оптического определения неровностей и дефектов рельсового пути: пат. № 2489291 Российская Федерация. 2013.
10. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Физматлит, 1976. 926 с.
11. Шерклифф У. Поляризованный свет. М.: Мир, 1965. 264 с.
12. Cremer F., Jong W., Schutte K. Infrared polarization measurements and modeling applied to surface-laid antipersonnel landmines // Opt. Eng. 41, 1021; doi: 10.1117/1.1467362.

## REFERENCES

- [1] Bazulin E.G. SAFT imaging of flaws in the rail base blade with consideration of multiple reflections of an ultrasonic pulse from the boundaries of a test object. *Russ. J. Nondestr. Test.*, 2010, no. 2, pp. 125–136. doi 10.1134/S1061830910020075.
- [2] Podgornaya L.N. Razrabotka i issledovanie sistemy diagnostiki rel'sovogo puti na mikromekhanicheskikh chuvstvitel'nykh elementakh [Development and study of a system for the diagnosis of a rail track based on micromechanical sensor elements]. Avtoreferat diss. kand. tekhn. nauk [Cand. tehn. sci. diss. abstr.]. St. Petersburg. 15 p.
- [3] Boronakhin A.M., Gupalov V.I., Mochalov A.V. Sposob inertsial'nykh izmereniy nerovnostey rel'sovogo puti [The method of inertial measurements of rail track irregularities]. Patent RF, no. 2242391, 2002.
- [4] Khodorkovskiy Ya.I., Anuchin O.N., Gusinskiy V.Z., Emel'yantsev G.I. Sposob i ustroystvo kontrolya sostoyaniya rel'sovoy kolei [Method and equipment for monitoring rail tracks]. Inventor's Certificate RF, no. 2123445, 1998.
- [5] Olhoeft G.R., Selig E.T. Ground penetrating radar evaluation of railway track substructure conditions. *Proc. SPIE*, 2002, vol. 4758, p. 48.

- [6] Eyre-Walker R.E.A., Earp G.K. Application of aerial photography to obtain ideal data for condition based risk management of rail networks. *Proc. 4th IET Int. Conf. on Railway Condition Monitoring*, Derby, UK, 2008.
- [7] Vorob'ev E.V. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya zheleznikh dorog i bezopasnost' dvizheniya [Technical operation of railways and traffic safety]. Moscow, Marshrut Publ., 2005. 531 p.
- [8] Sokolov A.V. Opticheskie svoystva metallov [Optical properties of metals]. Moscow, GIFML Publ., 1961. 464 p.
- [9] Ivashov S.I., Razevig V.V., Levin B.A., Bugaev A.S., Vorob'ev V.B., Nedorchuk B.L. Sposob opticheskogo opredeleniya nerovnostey i defektov rel'sovogo puti [An optical method for determining irregularities and defects of a rail track]. Decision to grant Patent RF, no. 2012103268, 2013.
- [10] Landsberg G.S. Optika [Optics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1976. 926 p.
- [11] Shurcliff W.A. Polarized Light. Cambridge, Harvard Univ. Press, 1962. (Russ. ed.: Sherkliff U. Poliarizovannyi svet. Moscow, Mir Publ., 1965. 264 p.).
- [12] Cremer F., Jong W., Schutte K. Infrared polarization measurements and modeling applied to surface-laid antipersonnel landmines. *Opt. Eng.* 2002, vol. 41, no. 5, pp. 1021-1032. doi: 10.1117/1.1467362.

Статья поступила в редакцию 13.05.2013

Александр Степанович Бугаев — д-р физ.-мат. наук, академик РАН, профессор, заведующий кафедрой Московского физико-технического института (государственного университета). Автор около 250 научных работ в области радиоэлектроники. Московский физико-технический институт (государственный университет), Российская Федерация, 141700, Московская область, Долгопрудный, Институтский пер., д. 9.

A.S. Bugaev — member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Phys.-Math.), professor, head of department of the Moscow Institute of Physics and Technology (state university). Author of more than 250 publications in the field of radio-electronics. Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskii per., 9, Dolgoprudnyi, Moscow region, 141700 Russian Federation.

Александр Иванович Ивашов — старший научный сотрудник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 40 научных работ в области электродинамики. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

A.I. Ivashov — senior researcher of the Bauman Moscow State Technical University. Author of about 40 publications in the field of electrodynamics. Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya, 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Сергей Иванович Ивашов — канд. техн. наук, начальник Лаборатории дистанционного зондирования НИЧ НУК ФН МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных работ в области подповерхностной радиолокации и распознавания образов. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

S.I. Ivashov — Cand. Sci. (Eng.), head of Remote Sensing Laboratory of the Research Division of Scientific-Educational Complex "Fundamental Sciences" of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 250 publications in the field of subsurface radar and pattern recognition. Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya, 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Борис Алексеевич Левин — д-р техн. наук, профессор, ректор Московского государственного университета путей сообщения. Автор более 200 научных работ в области безопасности железнодорожного движения.

Московский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9.

V.A. Levin — Dr. Sci. (Eng.), professor, rector of the Moscow State University of Railway Engineering. Author of more than 200 publications in the field of railway traffic safety. Moscow State University of Railway Engineering, ul. Obraztsova, 9, stroenie 9, Moscow, 127994 Russian Federation.

Борис Лаврентьевич Недорчук — канд. техн. наук, доцент, заместитель директора ИКБ Московского государственного университета путей сообщения. Автор около 60 научных работ в области безопасности железнодорожного движения.

Московский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9.

B.L. Nedorchuk — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor, deputy director of Institute for Integrated Safety and Security of the Moscow State University of Railway Engineering. Author of about 60 publications in the field of railway traffic safety. Moscow State University of Railway Engineering, ul. Obraztsova, 9, stroenie 9, Moscow, 127994 Russian Federation.

Владимир Всеволодович Разевиг — старший научный сотрудник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области подповерхностной радиолокации, распознавания образов и обработки изображений.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

V.V. Razevig — senior researcher of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 50 publications in the field of subsurface radar, pattern recognition and image processing.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya, 5, Moscow, 105005 Russian Federation.