



Бесконтактная диагностика рельсов: эффект поляризации отраженного света



Александр БУГАЕВ
Alexander S. BUGAEV

Владимир ВОРОБЬЕВ
Vladimir V. VOROBIEV



Сергей ИВАШОВ
Sergey I. IVASHOV



Борис ЛЁВИН
Boris A. LIEVIN

Борис НЕДОРЧУК
Boris L. NEDORCHUK



Владимир РАЗЕВИГ
Vladimir V. RAZEVIG

Бугаев Александр Степанович – доктор физико-математических наук, академик РАН, профессор Московского физико-технического института (государственного университета).

Воробьев Владимир Борисович – советник президента ОАО «РЖД».

Ивашов Сергей Иванович – кандидат технических наук, начальник отдела Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана.

Лёвин Борис Алексеевич – доктор технических наук, профессор, ректор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).

Недорчук Борис Лаврентьевич – кандидат технических наук, доцент МИИТ.

Разевиг Владимир Всеволодович – старший научный сотрудник МГТУ имени Н. Э. Баумана.

Острая конкуренция на транспортном рынке, рост перевозочных скоростей, усложнение условий эксплуатации подвижного состава и инфраструктуры увеличивают техногенные риски, снижают безопасность движения. В ответ возникает естественная потребность в более строгих профилактических мерах. Железным дорогам, в частности, нужен надежный мониторинг стальных путей. Совместный научный поиск в этом направлении специалистов МИИТ, МГТУ им. Баумана и ОАО «РЖД» помог совершенствованию средств бесконтактной диагностики рельсов.

Ключевые слова: железная дорога, мониторинг путей, бесконтактная диагностика рельсов, эффект поляризации отраженного света, безопасность движения, снижение техногенных рисков.

Современные условия эксплуатации железных дорог и особенно увеличение доли высокоскоростных маршрутов значительно повышают риски техногенных катастроф, последствия которых растут в некотором приближении пропорционально кинетической энергии поезда, то есть квадрату его скорости. Самыми опасными, как показывает опыт, являются крушения пассажирских поездов, а также грузовых составов, перевозящих взрывоопасные, ядовитые и радиоактивные вещества. Во многих случаях подобные катастрофы приводили к эвакуации жителей близлежащих населенных пунктов

и блокировке железнодорожного движения в обоих направлениях на срок до недели. Существенным при этом бывает и экологический ущерб, требующий значительных затрат на ликвидацию последствий вреда природе, жизненной среде человека.

1.

Сохранение безопасности движения пассажирских поездов и грузовых составов было бы невозможно без постоянного мониторинга железнодорожных путей. Он осуществляется путевыми обходчиками как визуально, так и с помощью простейших технических средств, а также путевыми тележками и путеизмерительными вагонами, оснащенными разнообразными датчиками и контрольными приборами.

В литературе описаны различные методы, применяемые для диагностики железнодорожных путей: ультразвуковые [7], механические [8], датчики ускорений [10] и угловых перемещений [9], подповерхностные радиолокаторы [6]. Однако существующие технические средства не всегда удовлетворяют требованиям по оперативности и достоверности получаемых данных.

Значительную угрозу движению железнодорожных составов представляют террористические акты, характерной чертой которых остаются скрытность и скоротечность их осуществления. Требуемую оперативность досмотра железнодорожных путей со скрытыми угрозами можно обеспечить с помощью дистанционно-пилотируемых летательных аппаратов (ДПЛА) или других видов летательной техники, например вертолетов [1], обладающих достаточной скоростью и гибкостью применения. Использование ДПЛА может оказаться 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 [2, 3].

Разработка новых технических средств диагностики железнодорожных путей, в том числе допускающих их установку на летательных аппаратах, стала насущной необходимостью при решении задач, связанных с повышением безопасности дви-

жения железнодорожного транспорта. В этом ряду нами рассматривается возможность использования поляризационного эффекта, который возникает при отражении электромагнитного излучения видимого диапазона от металлической поверхности головки рельса [4, 5]. При отражении излучения естественного дневного света, в силу его природы не являющегося поляризованным, от границы раздела двух сред воздух-металл происходит его частичная поляризация, которая зависит, с одной стороны, от угла визирования, а с другой — от оптических свойств граничащих сред.

Изменение поляризационных характеристик отраженного излучения несет информацию о параметрах поверхности. Отслеживая эти изменения, можно судить о свойствах поверхностного слоя металла. В нашем случае объектом изучения являются головки рельсов, которые для нормальной эксплуатации должны иметь почти идеально ровную верхнюю поверхность. Все дефекты и посторонние элементы, отличные по поляризационным характеристикам от гладкой поверхности рельсов, очевидным образом контрастируют на изображениях после обработки описанным далее методом.

2.

Учитывая значительные нагрузки, возникающие при прохождении железнодорожных составов, на поверхности головок рельсов возникают разного рода дефекты, а сам приповерхностный слой из-за ударных нагрузок обода колеса может деформироваться. Вследствие этого лучи, отраженные от элементарных площадок, будут иметь различные поляризационные характеристики [14]. Предполагается, что использование предлагаемого метода позволит выявлять на рельсах локальные дефекты (сколы, трещины и пр.), поскольку характеристики их поверхности будут отличны от поверхности рельсов, не содержащих дефектов. Кроме того, возможно и определение такого дефекта, как волнистость рельсов. Это обусловлено тем, что на участках с волнистостью в каждой точке меняется угол падения (и соответственно — отражения) света, а значит, и оказывается влияние на поляризацию, которое фиксируется аппаратурой.





Дадим некоторые комментарии, важные при объяснении эффектов, возникающих при отражении света от головки рельса.

В электромагнитной волне, распространяющейся в свободном пространстве, как следует из решений уравнений Максвелла, вектор напряженности электрического поля E перпендикулярен по своему направлению вектору магнитного поля H и оба они перпендикулярны направлению распространения электромагнитной волны [11]. При описании распространения электромагнитных волн обычно принято говорить о поведении вектора E , подразумевая, что вектор магнитного поля H связан с ним определенным способом. При этом, если колебания вектора E фиксированы строго в одном направлении, то свет называется линейно поляризованным. Если конец вектора E двигается по окружности, то такая поляризация называется круговой. Возможна также эллиптическая поляризация электромагнитной волны, когда конец вектора описывает эллипс.

В естественном свете изменение вектора электромагнитного поля происходит хаотично, ибо он представляет собой совокупность многих некогерентных между собой компонент. В этом случае все направления вектора E равновероятны. Такой свет называется неполяризованным. Если какое-то направление вектора электрического поля является предпочтительным, то такая волна называется частично поляризованной.

Для описания поляризованного света существуют различные методы (сфера Пуанкаре, вектор Стокса, вектор Джонса, квантовомеханическое представление) [15]. Нами был выбран вектор Стокса, так как с его помощью легче анализировать прохождение лучей света через оптические системы.

Вектор Стокса является совокупностью 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, необходимом для измерения. Четыре параметра представляют собой столбец-вектор

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

Часто для экономии места вектор записывается в виде строки; при этом используются фигурные скобки, чтобы напомнить о том, что вектор в действительности остается столбцом: $\{I, Q, U, V\}$.

Первый параметр I называется интенсивностью. Параметры Q , U и V соответственно – параметром преимущественной горизонтальной поляризации, параметром преимущественной поляризации под углом $+45^\circ$ и параметром преимущественной правополяризованной поляризации. Когда параметр имеет отрицательное значение, это означает, что преимущественной является ортогональная форма поляризации [15].

3.

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. В силу этого каждый из параметров 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 ϕ 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, который представляет собой

матричное описание взаимодействия светового луча и оптического устройства, через которое проходит свет, и позволяет вычислить результат этого взаимодействия. Выражение, описывающее характеристики оптического устройства, называется матрицей Мюллера. Она состоит из четырех строк и четырех столбцов. Вектор Стокса световой волны на выходе оптического устройства вычисляется путем перемножения матрицы Мюллера и вектора Стокса входного луча.

Используемый линейный поляризационный фильтр описывается следующей матрицей Мюллера [15]:

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

где $C_2 = \cos(2\phi)$, $S_2 = \sin(2\phi)$, ϕ – угол между вертикальной осью и осью пропускания поляризационного фильтра.

Тогда для вектора Стокса световой волны на выходе фильтра справедливо 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, соответственно из полученного вектора Стокса выбираем первый параметр и фиксируем 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 света, отраженного от поверхности рельса. В литературе [15] для этого предлагается поместить на пути луча детектор и, используя линейный поляризационный фильтр, провести три измерения: I_1 – без фильтра, I_2 – с горизонтальным расположением оси пропускания фильтра, I_3 – с расположением оси фильтра под углом 45° . После чего оценки параметров поляризации вычисляются следующим образом:

$$\tilde{I} = I_1,$$

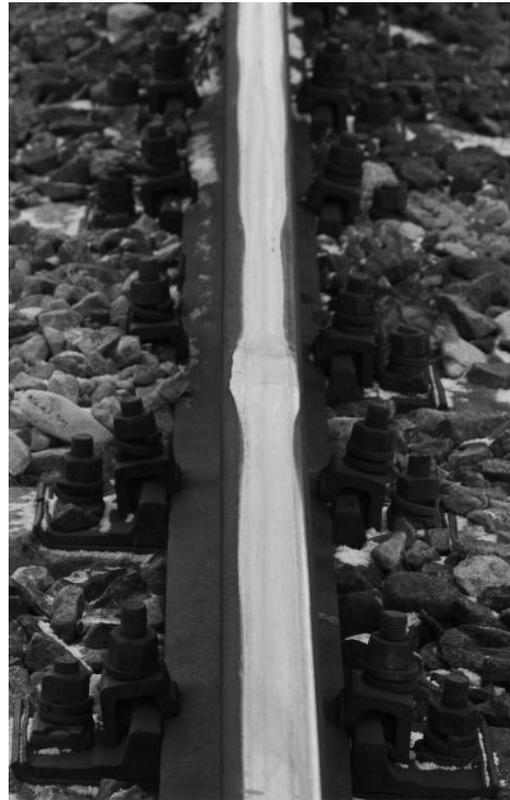


Рис. 1. Снятие головки рельса крупным планом.

$$\begin{aligned} \tilde{Q} &= I_2 - I_1, \\ \tilde{U} &= I_3 - I_1. \end{aligned}$$

Четвертый параметр V , определяющий циркулярную поляризацию, не может быть измерен с использованием только линейного поляризационного фильтра, поэтому в предлагаемом методе не используется.

Поскольку снятие/установка фильтра вызывали бы перемещение фотокамеры и нарушали кадрирование, а также для повышения точности измерений, применена усовершенствованная методика, предложенная в [16], согласно которой для каждого фрагмента пути делалась серия кадров с разной ориентацией фильтра. По полученной серии кадров, используя модель (1), оценки трех параметров Стокса \tilde{I} , \tilde{Q} , \tilde{U} и ошибку модели err^2 можно вычислить по следующим формулам:

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

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





Рис. 2. Изображение вмятины головки рельса при больших углах визирования.

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

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

где N – количество кадров; $\phi_j = 2\pi j/N$ – угол поворота поляризационного фильтра для j -го кадра.

Всякие пространственные вариации значений любого из параметров в (2–5) свидетельствуют о том, что в данном месте присутствует некоторая особенность поверхности, которая потенциально может быть дефектом рельса.

4.

Для проверки возможности визуализации дефектов был проведен ряд экспериментов непосредственно на железнодорожных путях. Исследования проводились на участке Октябрьской железной дороги у Крестовского моста в Москве. В процессе съемки использовалась профессиональная зеркальная камера Canon 40D с объективом Canon EF-S 17–55 f/2.8 IS USM



Рис. 3. Рельс с поверхностными дефектами.

и поляризационным фильтром Magumi 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.

Производилась съемка поверхности дефекта, при которой поляризационный фильтр поворачивался с шагом 6 или 12 градусов до полного поворота на 360° , т.е. в каждом случае получалась серия снимков из 60 или 30 кадров соответственно.

Визуально вмятина на головке рельса предстает в виде некоторой выпуклости, что является результатом поляризационной обработки сигнала. Такое изображение пригодно для несложной автоматической обработки по выявлению дефектов.

При увеличении угла визирования до 82° в месте вмятины головки проявились дефекты, которые не совпадают с ее рельефом (рис. 2). Изменения поляризационных характеристик в этом случае, по-видимому, связаны с деформацией кристаллической

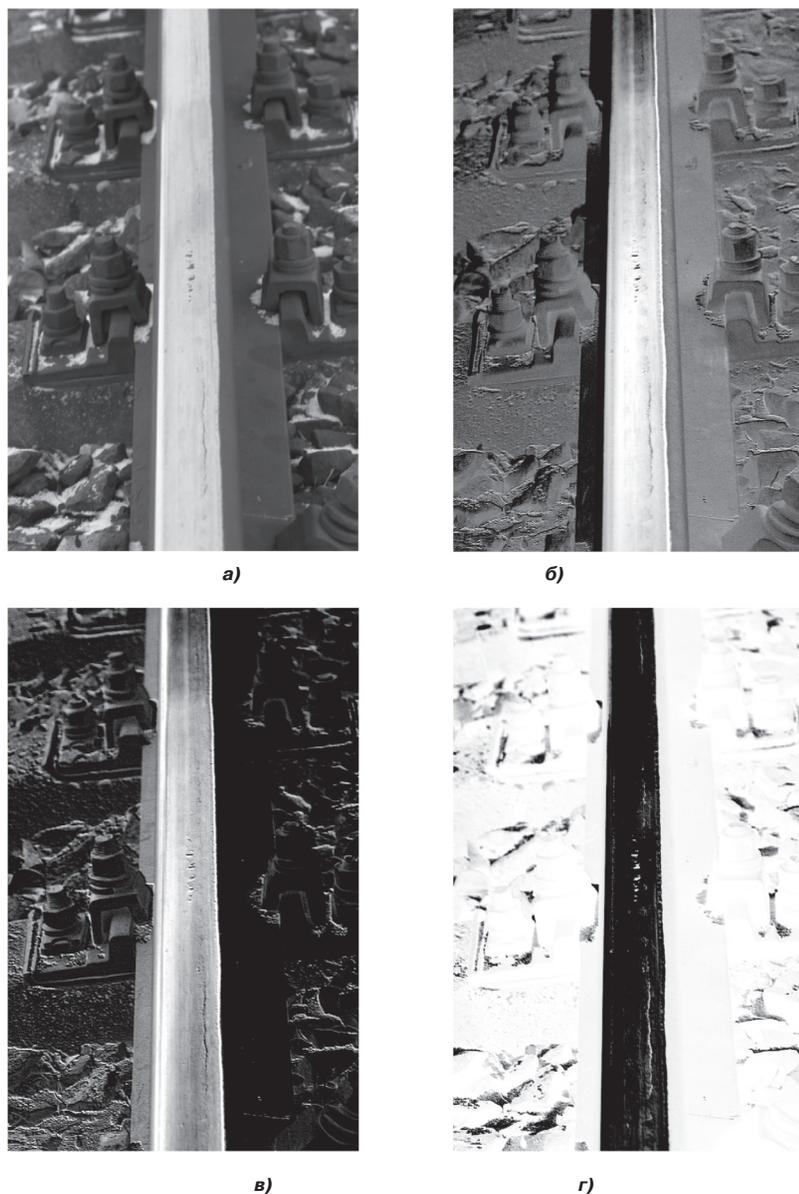


Рис. 4. Оценки параметров Стокса для рельса с поверхностными дефектами (а, б, в) и ошибкой модели (г).

решетки поверхности рельса из-за ударных нагрузок, возникающих при движении колеса по неровной плоскости. Дальнейшее развитие деформаций может привести к появлению трещин и даже излому самого рельса. Тогда уже желательным становится использование ультразвуковой дефектоскопии совместно с поляризационными измерениями для отслеживания динамики дефекта.

Вторым тестовым объектом был выбран рельс с локальными поверхностными дефектами, которые представляли собой выщербины на поверхности его головки (рис. 3). Хотя они легко обнаруживались

визуально, рассматривалась задача повышения их контраста для последующей автоматизированной обработки с применением алгоритмов распознавания образов.

Результаты обработки изображений этого фрагмента рельса с помощью предложенного метода приведены на рис. 4.

Видно, что дефекты такого рода лучше всего проявляются на изображении, отражающем ошибку модели поляризованного сигнала.

ВЫВОДЫ

Рассмотрен бесконтактный метод диагностики железнодорожных рельсов с ис-





пользованием 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 по сравнению с обычной видеосъемкой. Учитывая, что данный метод является сравнительно новым, целесообразно провести дополнительные исследования по определению оптимальных характеристик параметров поляризационной съемки с учетом разнообразия встречающихся дефектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Eyre-Walker R., Earp G. 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.
2. Верховец М. А., Лавров В. А. Сборник норм содержания железнодорожных путей. – Екатеринбург, 2005.
3. Техническая эксплуатация железных дорог и безопасность движения/Под ред. Э. В. Воробьева, А. М. Никонова. – М., 2005.
4. Соколов А. В. Оптические свойства металлов. – М., 1961.
5. Борн М., Вольф Э., Основы оптики: Пер. с англ. – 2 изд. – М., 1973.
6. Olhoeft G., Selig E. Ground Penetrating Radar Evaluation of Railway Track Substructure Conditions. Proceedings of SPIE, Vol. 4758. 2002. p.48.

7. Базулин Е. Г. Получение изображений дефектов в перьях подошвы рельсов методом SAFT с учётом многократного отражения ультразвукового импульса от границ объекта контроля//Дефектоскопия. – 2010. – № 2.

8. Подгорная Л. Н. Разработка и исследование системы диагностики рельсового пути на микромеханических чувствительных элементах/Автореф. дис... канд. техн. наук. – СПб., 2010.

9. Ходорковский Я. И., Анучин О. Н., Гусинский В. З., Емельянец Г. И., Способ и устройство контроля состояния рельсовой колеи. Патент № 2123445 от 20.12.1998.

10. Боронахин А. М., Гупалов В. И., Мочалов А. В. Способ инерциальных измерений неровностей рельсового пути. Патент № 2242391 от 30.12.2002.

11. Ландсберг Г. С. Оптика. – М., 1976.

12. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. – М.: Мир, 1981.

13. Леун Е. В., Загребельный В. Е., Шулепов А. В., Шевченко С. А., Серкова Ю. В. Заявка на изобретение № 2002100480 от 27.09.2003: Способ контроля шероховатости поверхности изделия.

14. Ивашов С. И., Разевиг В. В., Лёвин Б. А., Бугаев А. С., Воробьев В. Б., Недорчук Б. Л. Способ оптического определения неровностей и дефектов рельсового пути. Заявка на патент РФ, рег. № 2012103268 от 01.02.2012.

15. Шерклифф У. Поляризованный свет. – М.: Мир, 1965.

16. Cremer F., de Jong W., Schutte K. Infrared polarization measurements and modeling applied to surface-laid antipersonnel landmines. Opt. Eng. 41, 1021 (2002); doi:10.1117/1.1467362. ●

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 11-07-13112-офи-м-2011-РЖД).

CONTACTLESS DIAGNOSTICS OF THE RAILS: REFLECTED LIGHT POLARIZATION EFFECT

Bugaev, Alexander S. – D.Sc. (Phys.-Math.), Academician of the Russian Academy of Sciences, professor of Moscow Institute of Physics and Technology (State University).

Vorobiev, Vladimir B. – advisor to the president of JSC Russian Railways.

Ivashov, Sergey I. – Ph.D. (Tech), head of the department of Bauman Moscow State Technical University.

Lievin, Boris A. – D.Sc. (Tech), professor, rector of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

Nedorchuk, Boris L. – Ph.D. (Tech), associate professor, deputy director of the institute of transport safety and security of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

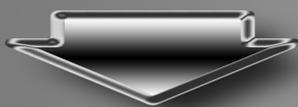
Razevig, Vladimir V. – senior researcher of Bauman Moscow State Technical University.

Competition at the transportation market, increased velocity of the traffic, complication of operation conditions for rolling stock and infrastructure cause new anthropogenic risks, reduce traffic safety. Railways need new methods to prevent risks, particularly to monitor the railway tracks. The joint researches conducted by Moscow State University of Railway Engineering, Bauman Moscow State Technical University and JSC Russian Railways have resulted in development of the tools of contactless diagnostics and troubleshooting of the rails using reflected light polarization effect.

Key words: railway, track monitoring, rail contactless diagnostics, reflected light polarization effect, traffic safety, antropogenic risks reduction.

The researches have been held with the support of Russian Foundation for Fundamental Researches (grant N 11-07-13112-ofi-m-2011-RZD).

Координаты авторов (contact information): Бугаев А. С. – bugaev@cos.ru, Ивашов С. И. – sivashov@rslab.ru, Лёвин Б. А. – tu@miit.ru, Недорчук Б. Л. – Alekseewiktor@niit-miit.ru, Разевиг В. В. – vr@aha.ru



ВОЗВРАЩЕНИЕ К ТЕМЕ

ЯПОНИЯ ПОСТРОИТ ЛИФТ В КОСМОС

Возможно, одна из фантазий Артура Кларка скоро станет явью, как когда-то стала реальностью подводная лодка Жюль Верна. Японская компания Obayashi Corp заявила о том, что намерена реализовать невероятно амбициозный проект – построить космический лифт.

Да-да, именно лифт, который будет поднимать грузы, а потом и людей с Земли на околоземную орбиту. Конструкция такого удивительного сооружения основана на специальном тросе, сделанном из тонких и сверхпрочных углеродных нанотрубок. Трос имеет длину 96 тысяч км.

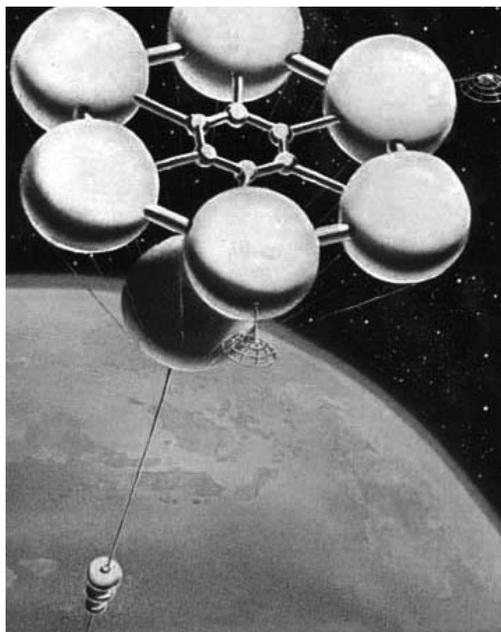
По законам физики центробежная сила вращения не даст упасть такому тросу, растягивая его по всей длине. В случае успеха подъемник сможет перемещаться со скоростью 200 км/ч, поднимая до 30 человек в кабине. На высоте 36 тысяч км, которой лифт будет достигать за неделю, планируется остановка. На такую высоту планируется поднимать туристов, а исследователи и специалисты смогут достичь самого верха.

Правда, чтобы увидеть это сооружение и покататься на нем, придется немного подождать, ведь окончательный срок его сдачи – 2050 год.

Идея космического лифта фигурировала еще в работах Константина Циолковского, хотя это был не совсем лифт, а скорее башня огромных размеров. Кроме того, расчеты относительно теоретической возможности построить такое «чудо» делал советский ученый Юрий Арцутанов. Именно к нему в свое время обращался знаменитый фантаст Артур Кларк, чтобы проконсультироваться относительно идеи космического лифта.

31 июля 1960 года в газете «Комсомольская правда» Юрий Арцутанов опубликовал статью «В космос – на электровозе», в которой изложил свои рассуждения о технической реализации подобного проекта.

А в 1979 году был издан роман «Фонтаны рая» Артура Кларка. В предисловии автор прямо указывает на Юрия Арцутанова как



идейного вдохновителя концепции космического лифта.

Интересно, что впервые Артур Кларк узнал о космическом лифте не от ученого, а от нашего космонавта Алексея Леонова. На венской конференции по мирному использованию космоса (1968 год) тот подарил фантасту альбом «Ждите нас, звёзды» со своими рисунками и работами художника Соколова. Одна из иллюстраций так и называлась «Лифт в космос» (на снимке).

Сергей и Марина Бондаренко
<http://www.3dnews.ru/news/625039>
«Российская газета» – www.rg.ru
/ИТАР-ТАСС

Журнал «МТ» давно ведет тему космических лифтов. См. публикации наших авторов: Поляков Г. Г. Смогут ли корабли грядущего справиться с перевозками в космос?; Козлова С. М. В ближний космос на... колесе-ленте. – 2003, № 4; Поляков Г. Г. Трассы к орбитальным городам. – 2005, № 2; Его же. В космос без ракет – на лифте. – 2006, № 2 и др.

