

Научная статья
УДК 621.876.32
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-172-183>
EDN: CJDDZO



ВИЗУАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ДЕГРАДАЦИИ ПРИ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЯХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЭСКАЛАТОРОВ

В.Н. Дятлов¹ ✉, **В.А. Попов²**

¹Инженерно-экономический лицей имени Академика И.М. Виноградова,
г. Великие Луки, Россия

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
г. Санкт-Петербург, Россия

✉ ответственный автор
w.dyatlov@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Несущая металлоконструкция является основой эскалатора: на неё монтируются приводные агрегаты, тяговые системы, ограждающие устройства и другие узлы, обеспечивающие собственно его работу. Один из наиболее типичных видов коррозионного разрушения металлоконструкций эскалаторов – сплошная равномерная коррозия по всей поверхности. Данный процесс характеризуется поступательным проникновением коррозионных изменений от наружных слоёв материала к его внутренней структуре, что приводит к уменьшению эффективного поперечного сечения и снижению прочностных характеристик и, при практически неизменных эксплуатационных нагрузках, к росту значений возникающих механических напряжений.

Основная цель настоящего исследования заключается в снижении трудовых и финансовых затрат комплексных обследований металлоконструкций эскалаторов за счёт внедрения дистанционных методов контроля, которые обеспечивают непрерывный мониторинг за их состоянием и позволяют автоматизировать расчётные процедуры, повышая тем самым свою эффективность без снижения качества оценок технического состояния.

Материалы и методы. При написании статьи были использованы данные комплексного обследования эскалаторов ГУП «Петербургский метрополитен», реализованного совместно экспертной организацией ООО «СТЭК» и специалистами кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), использовались конструкторская документация, статистические методы и методы математического моделирования.

Результаты. Функциональный принцип предлагаемого визуально-оптического метода диагностики предполагает использовать как составной элемент комплексной системы наблюдения за коррозией, ориентированной на непрерывную оценку эксплуатационного состояния несущих металлоконструкций эскалаторов и на заблаговременное выявление возможных отказов, связанных с развитием коррозионного повреждения.

Заключение. Предлагаемый метод обеспечивает комплексную количественную оценку коррозионных повреждений по трём параметрам: по глубине проникновения, по локальным (очаговым) дефектам и по изменению механических свойств металла. Расширение спектра одновременно оцениваемых характеристик приводит как минимум к 30-процентному росту информативности результатов, что даёт возможность в полтора раза повысить корректность прогноза остаточного ресурса металлоконструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метрополитен, эскалатор, металлоконструкция, визуально-оптический метод, коррозия, математическое моделирование

Статья поступила в редакцию 08.02.2026; одобрена после рецензирования 12.03.2026; принята к публикации 17.04.2026.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

© Дятлов В.Н., Попов В.А., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Дятлов В.Н., Попов В.А. Визуально-оптический метод определения глубины деградации при коррозионных повреждениях металлоконструкций эскалаторов // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 2. С. 172-183. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-172-183>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-172-183>

EDN: CJDDZO

VISUAL AND OPTICAL METHOD FOR CORROSION DEPTH ASSESSMENT OF ESCALATOR METAL STRUCTURES

Vyacheslav N. Dyatlov¹ ✉, Valery A. Popov²

¹Engineering and Economics Lyceum named after Academician I.M. Vinogradov
Velikiye Luki, Russia

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

✉ corresponding author

w.dyatlov@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. Supporting metal structure is the basis of escalator: drive units, track systems, guard devices, and other components that ensure the escalator operation are mounted on it. One of the most common types of corrosion damage on escalator metal structures is uniform corrosion over the entire surface. This process is characterized by progressive penetration of corrosion from the material outer layers to its internal structure, resulting in a decreased effective cross-section and reduced strength characteristics. As operating loads remain relatively constant, this leads to increased strain.

The implications of this study refer to reduced labor and financial costs of comprehensive inspections of escalator metal structures through introducing remote control methods that provide continuous monitoring of their condition and allow for the automation of calculation procedures, thereby increasing their efficiency without compromising the quality of technical condition assessments.

Materials and methods. Data from a comprehensive survey of escalators of St. Petersburg Metro State Unitary Enterprise have been used, the study being completed by STEK LLC expert organization and specialists from Land Transport and Technological Complexes Department of St. Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I (PSUTS). Analysis of design documentation, statistical methods and mathematical modeling has been used in the study.

Results. The functional principle of the proposed visual-optical diagnostics method is to be used as an integral part of a comprehensive corrosion monitoring system aimed at continuous assessment of the operational condition of escalator load-bearing metal structures and early identification of potential failures associated with the development of corrosion damage.

Conclusion. The proposed method provides a comprehensive quantitative assessment of corrosion damage based on three parameters: penetration depth, local (focal) defects, and changes in the mechanical properties of the metal. Expanding the range of characteristics leads to at least a 30% increase in informative value of the results, which allows for a 1.5-fold improvement in the accuracy of predicting the residual life of metal structures.

KEYWORDS: subway, escalator, metal structure, visual-optical method, corrosion, mathematical modeling

The article was submitted: February 08, 2025; approved after reviewing: March 12, 2026; accepted for publication: April 17, 2026.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Dyatlov V.N., Popov V.A. Visual and optical method for corrosion depth assessment of escalator metal structures. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (2): 172-183. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-172-183>

© Dyatlov Vyacheslav N., Popov Valery A., 2026



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Ежегодная утрата металла из-за процессов коррозии в мировом масштабе достигает примерно десяти части от общего фонда^{1, 2}. Эта тенденция оказывает существенное влияние на машиностроительное производство, вынуждая отрасль искать эффективные способы диагностики и превентивного выявления коррозионных разрушений.

Многообразие форм коррозионных повреждений предполагает использование различных критериев оценки^{3, 4}, в качестве которых выступают потеря массы, уменьшение геометрических параметров сечений элементов, изменение механических характеристик и т.д. Перечень необходимых оценочных параметров в первую очередь зависит от природы развивающегося коррозионного процесса.

Один из наиболее типичных видов коррозионного разрушения металлоконструкций эскалаторов – сплошная равномерная коррозия по всей поверхности [1, 5, 13]. Данный процесс характеризуется последовательным проникновением коррозионных изменений от наружных слоёв материала к его внутренней структуре, что приводит к значительному уменьшению прочностных и, соответственно, их несущих свойств. С уменьшением площади поперечного сечения возрастает уровень механических напряжений под действием внешних практически неизменяемых эксплуатационных нагрузок.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Параметром, используемым для оценки интенсивности коррозионного разрушения, служит глубина деградации δ [1, 2, 8], определяемая по отношению к фиксированному сроку экспозиции изделия τ по формуле

$$\delta = v \cdot \tau, \quad (1)$$

где v – усредненное значение скорости коррозии, мм/год;

Современные методики предоставляют широкий арсенал технологий для оценки кор-

розийного состояния элементов металлоконструкций эскалаторов [6, 7]. При этом процедуры обследования и диагностики выполняются в соответствии с программой экспертизы с применением неразрушающих методов контроля, а также в соответствии с «СТО 9701105632-003–2021. Инструкция по визуальному и измерительному контролю, регламентирующему порядок визуальной и инструментальной проверки». Охарактеризуем некоторые из них (таблица 1).

Вышеуказанные способы диагностирования сплошной коррозии нашли наиболее широкое применение. Для более точного количественного определения глубины деградации δ чаще всего применяют ультразвуковую толщинометрию – данная технология обеспечивает высокий уровень достоверности результатов, в то же время область её использования существенно ограничена рядом факторов:

- локальность измерений – при проведении измерений с использованием данной технологии толщина элемента металлоконструкции определяется лишь в одной конкретной точке. Чтобы получить представление о размерах зоны, затронутой коррозией, требуется существенно увеличить количество точек измерения, что, в свою очередь, приводит к росту трудозатрат оператора и усложнению процесса диагностики;

- недоступность ряда участков контролируемой поверхности исследуемых объектов – для определения глубинного параметра δ требуется прямой контакт пьезоэлектрического преобразователя с исследуемой зоной, опыт же практической эксплуатации металлоконструкций [3, 5, 11, 16] показывает, что наиболее интенсивному коррозионному износу зачастую подвергаются области, расположенные в местах с затруднённым доступом или его полным отсутствием;

- подготовка поверхности перед проведением контроля – данный этап предполагает зачистку участков с очагами коррозии до появления чистого металлического слоя и обработку зоны контроля контактной жидкостью для повышения качества сигналов [4, 18, 19].

¹ Schweitzer P.A. Fundamentals of Metallic Corrosion: Atmospheric and Media Corrosion of Metals. Boca Raton, CRC Press, 2006, 752 p.

² Розенфельд И.Л. Коррозия и защита металлов. М.: Металлургия, 1969. 448 с.

³ Сероштан В.И. Диагностика грузоподъемных машин. М.: Машиностроение, 1992. 192 с.

⁴ Поминов И.Н. Эскалаторы метрополитена. Устройство, обслуживание и ремонт. М.: Транспорт. 1994. 320 с.

Таблица 1

Характеристика способов диагностирования сплошной поверхностной коррозии металлоконструкций
Источник: составлено авторами.

Table 1

Characteristics of methods for diagnosing continuous surface corrosion of metal structures

Source: compiled by the authors.

Метод диагностики	Принцип работы	Принцип определения показателя коррозии	Преимущества	Недостатки
Визуальная оценка	Качественное сравнение реальных очагов коррозии и фотоматериалов, описание процессов и текущего состояния объекта	Дедукция – заключение делается по общему состоянию очага коррозии	Низкая трудоемкость, доступность оборудования, отсутствует необходимость в предварительной обработке поверхности	Высокая субъективность и низкая точность количественной оценки
Ультразвуковая толщинометрия	Измерение толщины конструктивного элемента прямым способом: на заранее подготовленную (очищенную и выровненную) поверхность устанавливается измерительный датчик	Индукция – заключение экспертизы производится по частным замерам	Точная количественная оценка	Высокая трудоемкость, требует наличия специального оборудования и соответствующей подготовки персонала

Учитывая рассмотренные ограничения и особенности существующих методов, представляется целесообразным выделить ряд условий, выполнение которых значительно повысит эффективность оценки степени коррозионного износа металлических конструкций:

– дедуктивность оценки – определение δ по общему состоянию очага коррозии при общем сокращении числа обязательных замеров без ущерба для достоверности;

– простота и устойчивость выбранного метода – уменьшение трудозатрат при выполнении контроля непосредственно связано с оптимизацией финансовых ресурсов [9, 10, 16];

– доступность применяемого оборудования – чем больше оно унифицировано и шире распространено, тем быстрее проходит обучение специалистов и тем выше оперативность и экономичность обследований;

– дистанцирование и автоматизация процесса диагностирования – дистанционный мониторинг способствует не только расширению возможностей автоматизации, но и снижению риска для сотрудников, задействованных в обследовании объектов.

Значительная часть из предъявляемых выше требований может быть реализована с помощью визуально-оптического подхода, для чего в практической деятельности предла-

гается использовать цифровые фотокамеры совместно с портативными вычислительными устройствами.

Для корректной фиксации цветностных характеристик коррозионных повреждений фотокамеры должны обладать:

– возможностью съёмки в RAW-формате с глубиной не менее 12 бит;

– широким динамическим диапазоном и нейтральной цветопередачей матрицы;

– ручной установкой баланса белого и выбором нейтрального цветового профиля;

– оптикой, обеспечивающей макросъёмку без существенных геометрических и цветовых искажений.

При проведении съёмки в кадр обязательно вводится цветовой или серый эталон, а условия освещения и настройки камеры фиксируются и воспроизводятся при всех повторных измерениях.

Выделяя ключевые преимущества такого метода, важно отметить, что фотосъёмка корродированных участков позволяет выполнять дедуктивность оценки степени коррозионного разрушения посредством максимального использования функций разрешения объективов, снижая тем самым затраты времени и материальных ресурсов, а также минимизируя физическое участие персонала в обследовании. Оборудование, представленное фотока-

мерами и портативными вычислительными устройствами, отличается широкой доступностью и распространенностью, что дополнительно способствует упрощению организации контроля.

Анализ показал, что главные условия для эффективной оптимизации в достаточной степени могут быть реализованы, но вместе с тем, как и при использовании простого метода визуальной оценки, основной проблемой здесь остается значительный уровень субъективности восприятия и ограниченная точность количественной интерпретации величины δ .

Это обстоятельство приводит к необходимости разработки подходов, способных повысить достоверность и объективность определения глубинного показателя коррозии методом визуально-оптического диагностирования.

Для повышения точности количественной диагностики коррозии требуется детальный анализ хемосорбционных явлений, происходящих на поверхности материалов, подвергающихся коррозионному износу.

Образование ржавчины связано с протеканием на поверхности железа и созданных на его основе сплавов ряда окислительно-восстановительных процессов в присутствии электролитсодержащей среды, то есть представляет собой типичный случай электрохимической коррозии. Образующийся слой ржавчины не является однородным⁵ – в его составе выделяют три отдельных подслоя, причем адгезионные свойства возрастают по мере приближения к основному металлу.

Особое внимание заслуживает механизм образования ржавчины, связанный с атмосферным воздействием, когда влага из воздуха конденсируется на поверхности или попадает на неё напрямую по ряду различных причин⁶. Слой ржавчины, возникающий в подобных условиях, имеет сложную фазовую структуру и включает сочетания гидроокислов гетита (α -FeOOH), лепидокрокита (γ -FeOOH) и окисла магнетита (Fe_3O_4)⁷.

Для отдельно взятого подслоя соотношение этих соединений заметно различается. В приповерхностной зоне преобладают гетит и лепидокрокит при незначительном присутствии магнетита; в промежуточном подслое основными фазами становятся гетит и магнетит, тогда как лепидокрокит присутствует в сравнительно меньшем объёме; внутренний подслой практически полностью состоит из магнетита и феррита с небольшими вкраплениями гетита [1, 4, 11, 14, 15].

При диагностировании коррозионных повреждений оценивается прежде всего состояние поверхности очага коррозии, исходя из того, что в процессе развития атмосферной коррозии именно поверхностный подслой со временем отслаивается и постепенно осыпается, открывая доступ агрессивной среде и способствуя развитию коррозионных процессов вглубь материала.

Так как при диагностике фактически оценивается главным образом состояние наружной поверхности очагов коррозионных поражений, ключевым направлением исследования становится анализ параметров именно внешнего подслоя коррозионных продуктов (ржавчины)⁸.

В этом слое формируются основные продукты окисления – гидроокислы гетита и лепидокрокита, при наличии морской атмосферы или повышенного содержания хлорид-ионов возможно также формирование акаганеита. На начальных этапах развития коррозии преобладание лепидокрокита определяется ограниченной доступностью кислорода, за счёт чего ржавчина принимает темно-зеленый оттенок⁹. По мере экспозиции, в результате последующего окисления, содержание лепидокрокита постепенно снижается, и уже через два года компонент может полностью отсутствовать, уступая место более насыщенному кислородом гетиту с характерной темно-красной окраской. Сам факт формирования гетита сопровождается практически полным исчезновением лепидокрокита [2, 4, 20].

⁵ Продукты атмосферной коррозии железа и окраска по ржавчине / О. Кукурс, А. Упите, И. Хонзак [и др.]. Рига: Зинатне, 1980. 163 с.

⁶ Физико-химические свойства окислов: справочник / Г.В. Самсонов, А.Л. Борисова, Т.Г. Жидкова [и др.]; под общ. ред. Г.В. Самсонова. М.: Металлургия, 1987. 472 с.

⁷ Сухотин А.М. Физическая химия пассивирующих пленок на железе. Л.: Химия, 1989. 320 с.

⁸ Продукты атмосферной коррозии железа и окраска по ржавчине / О. Кукурс, А. Упите, И. Хонзак [и др.]. 163 с.

⁹ Физико-химические свойства окислов: справочник / Г.В. Самсонов, А.Л. Борисова, Т.Г. Жидкова [и др.]; под общ. ред. Г.В. Самсонова. 472 с.

Существенную роль в свойствах наружного подслоя также играет магнетит, концентрация которого напрямую определяется условиями внешней среды, в частности уровнем загрязненности атмосферы смесями, включающими в свой состав хлорид-ионы, и газами типа SO_2 .

На основании проведенного анализа фазового состава продуктов коррозии можно сделать вывод, что концентрацию одного из окислов, входящих в состав внешнего подслоя ржавчины, целесообразно использовать в качестве значимого диагностического показателя.

В частности, усредненное значение скорости коррозионного разрушения v может быть оценено по доле магнетита, зафиксированной во внешнем подслое ржавчины, поскольку именно этот показатель непосредственно репрезентирует воздействие степени агрессивности окружающей эксплуатационной среды на протекание коррозионного процесса.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Согласно данным рисунка 1 получаем следующую зависимость:

$$v = 0,0086 + 0,0054 \cdot e^{0,1263 \cdot M}, \quad (2)$$

где M – площадь, занимаемая магнетитом, в % от общей площади очага коррозии.

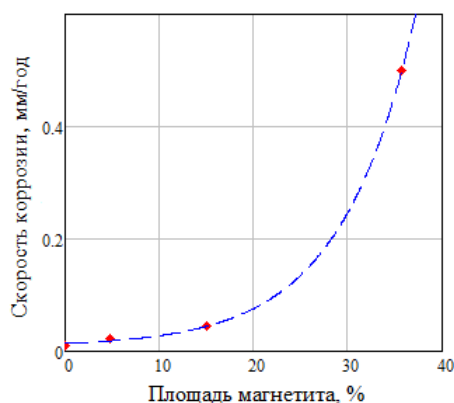


Рисунок 1 – Средняя скорость коррозии при содержании магнетита в слое ржавчины:

◆◆◆ – экспериментальные точки;
— — установленная зависимость
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Average corrosion rate with magnetite content in the rust layer:

◆◆◆ – experimental points;
— — established dependence
Source: compiled by the authors.

По мере эксплуатации объекта удельное количество магнетита во внешнем подслое ржавчины не остаётся постоянным. На основании результатов исследований [1, 3, 12, 20] были установлены характерные интервалы колебаний его доли, соответствующие тем или иным условиям окружающей среды. В частности, в условиях слабоагрессивной среды M обычно изменяется в пределах от 5 до 15%, тогда как в среднеагрессивной среде этот показатель варьируется в пределах от 15 до 35%.

Ещё одним параметром, поддающимся контролю при использовании оптического метода, является продолжительность воздействия среды τ . Как было показано ранее, по мере увеличения срока экспонирования происходит трансформация лепидокрокита в гетит, в результате чего изменяется соотношение площадей, занятых различными гидроокислами на поверхности зоны коррозионного поражения. В качестве информативного диагностического показателя целесообразно рассматривать площадь, занимаемую гетитом, поскольку лепидокрокит со временем полностью исчезает.

Проведенный на основе данных [1, 6, 7, 8] анализ позволил установить, что удельная доля гетита зависит от степени агрессивности окружающей среды. Дополнительно были выведены три аналитические функции, позволяющие количественно описать долю гетита в подслое ржавчины при различных вариантах аэрохимического воздействия среды (рисунки 2, 3, 4).

Для неагрессивной среды:

$$\tau = -0,0759 + 0,3570 \cdot e^{0,0487 \cdot \alpha}, \quad (3)$$

где α – площадь, занимаемая гетитом, в % от общей площади очага коррозии;

для слабоагрессивной среды:

$$\tau = 0,0933 + \frac{0,0277 \cdot (e^{0,0191 \cdot \alpha} - 1)}{0,0191} \quad (4)$$

и для среднеагрессивной среды:

$$\tau = -0,1465 + 0,0045\alpha + 0,0011\alpha^2. \quad (5)$$

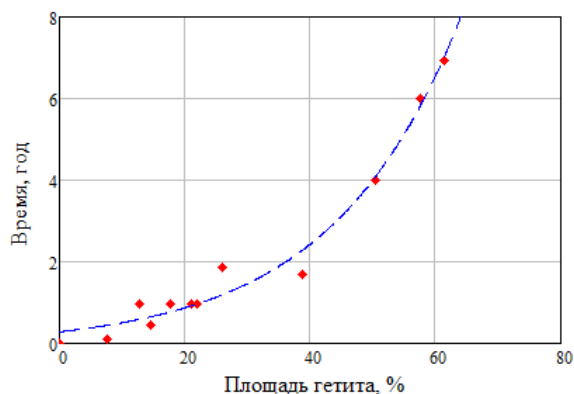


Рисунок 2 – Содержание гетита в наружном подслое ржавчины (неагрессивная среда):
♦♦♦ – экспериментальные точки; — — установленная зависимость
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Content of goethite in the outer rust sublayer (non-aggressive environment):
♦♦♦ – experimental points; — — established dependence
Source: compiled by the authors.

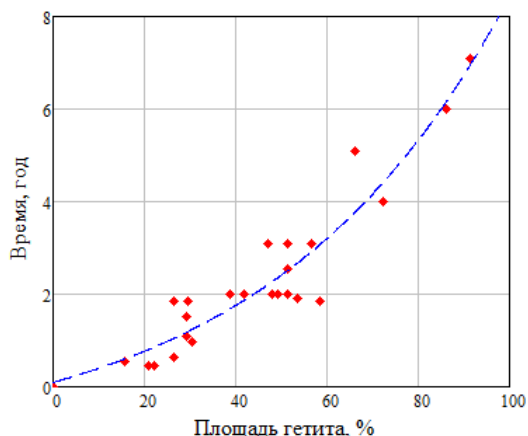


Рисунок 3 – Содержание гетита в наружном подслое ржавчины (слабоагрессивная среда):
♦♦♦ – экспериментальные точки; — — установленная зависимость
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Content of goethite in the outer rust sublayer (weakly aggressive environment):
♦♦♦ – experimental points; — — established dependence
Source: compiled by the authors.

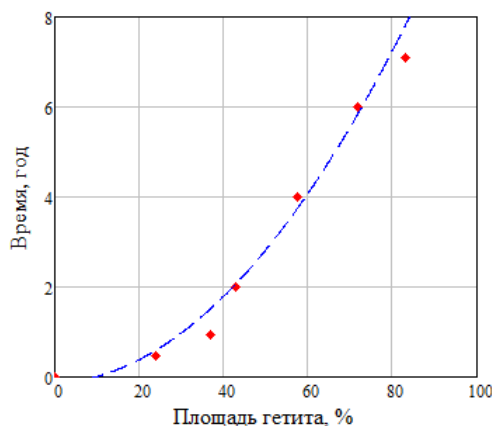


Рисунок 4 – Содержание гетита в наружном подслое ржавчины (среднеагрессивная среда):
♦♦♦ – экспериментальные точки; — — установленная зависимость
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Content of goethite in the outer rust sublayer (medium-aggressive environment):
♦♦♦ – experimental points; — — established dependence
Source: compiled by the authors.

Определив значения параметров ν и τ , можно рассчитать величину глубины деградации, опираясь на соотношение (1) либо на расчетную модель, представленную в работе [3]. Тем самым обеспечивается возможность количественной оценки рассматриваемого диагностического показателя на базе визуально-оптического метода контроля.

Особого внимания требует вопрос количественной фиксации площади поврежденной коррозией зоны, на которой локализован конкретный вид продуктов ржавления.

Для её решения применимо измерение цветовых координат поврежденной зоны по шкале RGB, поскольку визуальные характеристики ржавчины зависят от состава и фазового состояния оксидов. Согласно источникам^{10, 11}, со временем цветовые параметры наружного слоя изменяются по последовательности: темно-зеленый, затем темно-коричневый, позже переходят в темно-красные тона и, наконец, в желто-бурый оттенок.

¹⁰ Сухотин А.М. Физическая химия пассивирующих пленок на железе. 320 с.

¹¹ Физико-химические свойства окислов: справочник / Г.В. Самсонов, А.Л. Борисова, Т.Г. Жидкова [и др.]; под общ. ред. Г.В. Самсонова. 472 с.

Таблица 2

Колориметрические параметры продуктов ржавчины
Источник: составлено авторами.

Table 2

Colorimetric parameters of rust products
Source: compiled by the authors.

Продукт ржавчины	Цвет	Характеристика координат RGB
Лепидокрокит	В диапазоне оттенков от насыщенного тёмно-зеленого до глубокого тёмно-коричневого	Доминирование зелёной составляющей (координата G) при уровне красного канала (R) в пределах 80–120
Гётит	В диапазоне от насыщенного тёмно-красного до выраженного желтовато-бурого	Доминирование красного канала R , при этом его числовое значение лежит в диапазоне 120–160
Магнетит	Интенсивно чёрный, с железисто-чёрным оттенком	Практически равные значения всех цветовых каналов (R , G и B), формирующие тёмные серые тона при уровне каждой компоненты ниже 110

Для оценки цветовых параметров слоя ржавчины использовался графический редактор Paint, с помощью которого фиксировались цифровые значения цветовых координат анализируемого слоя.

В ходе исследования было выявлено, что поверхность элемента конструкции, не подвергшаяся влиянию коррозионных процессов, демонстрирует серую цветовую тональность, для которой характерно приблизительное совпадение компонент R , G и B в интервале значений от 130 до 180. Обобщённые экспериментальные данные по цветовым координатам представлены в таблице 2.

Таким образом, доминирующий цветовой компонент может быть использован для определения величин ν и τ на рассматриваемом участке.

ОБСУЖДЕНИЕ

Функциональный принцип предлагаемого визуально-оптического метода диагностики заключается в интеграции его в систему мониторинга коррозии, предназначенную для постоянного наблюдения за техническим состоянием несущих металлоконструкций эскалаторов, а также для прогноза возникновения потенциальных отказов вследствие коррозионных процессов. Такая методика позволяет не только своевременно выявлять появление дефектов, но и способствует оценке остаточ-

ного ресурса данных сооружений с учетом фактической деградации их элементов.

Основной целью данного подхода становится повышение точности в определении степени повреждения, при этом расширяется возможность фиксировать начальные этапы коррозионного разрушения. Для реализации этого принципа на определённом участке конструкции, где предположительно развивается коррозия, осуществляется установка бесконтактного датчика, который регистрирует динамику коррозионных изменений посредством анализа оптических характеристик зоны поражения. Мониторинг изменений этих свойств позволяет оценить время развития очага, а также степень агрессивности окружающей среды, способствующей протеканию коррозионных реакций.

Продолжительность развития коррозионного очага устанавливается посредством количественного анализа сдвигов цветовых координат главенствующего типа окислов железа (гетита, лепидокрокита или магнетита) с использованием RGB -шкалы (рисунок 5). Зафиксировав площадь поверхности, обладающей определёнными цветовыми параметрами, характерными для каждого из указанных окислов, становится возможным установить время формирования и развития очага, а также оценить характер окружающей среды с точки зрения коррозионной активности.

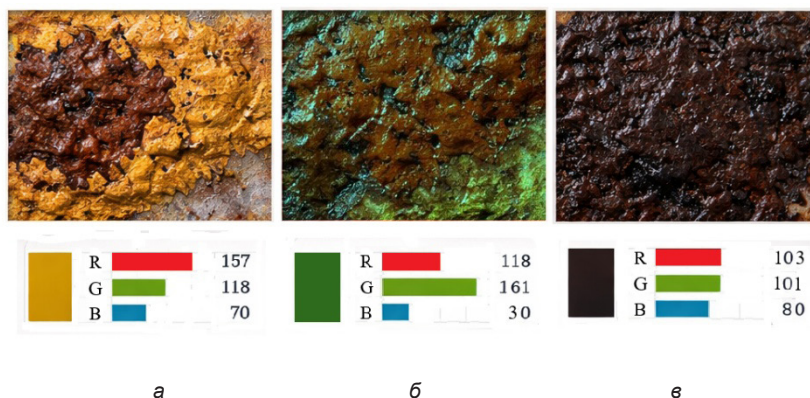


Рисунок 5 – Примеры цветowych координат (RGB-шкала) для преобладающих типов окислов железа: а – гетита, б – лепидокрокита, в – магнетита. Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Examples of color coordinates (RGB scale) for the predominant types of iron oxides: a – goethite, b – lepidocrocite, c – magnetite. Source: compiled by the authors.

Детализация методики измерения глубины деградации посредством визуально-оптического метода осуществляется следующим образом. Прежде всего, исследуемая зона фотографируется с помощью цифрового фотоаппарата, после чего полученные изображения подвергаются компьютерной обработке.

На этапе обработки фотоизображений первоначально оценивается площадь коррозионного очага S_K , а затем вычисляется параметр M :

$$M = \frac{S_M}{S_K} \cdot 100\% , \quad (6)$$

где S_M – площадь очага коррозии, занятая магнетитом.

После определения величины M , используя выражение (2), вычисляется значение v и при соотношении полученного результата с данными таблицы 3 [3] устанавливается степень агрессивности окружающей среды.

После этого определяем величину α :

$$\alpha = \frac{S_\alpha}{S_K} \cdot 100\% , \quad (7)$$

где S_α – площадь очага коррозии, занятая гетитом.

На основании предварительно установленной степени агрессивности среды производится расчёт параметра τ с применением формул (3)–(5), после чего становится возможным вычисление глубины деградации δ .

Показатель δ рассматривается как информативный параметр, характеризующий степень разрушения вследствие коррозии. Величина v позволяет определять степень агрессивности среды, а следовательно, и адсорбционное понижение прочности материала и концентрацию агрессивных компонентов в окружающей атмосфере.

Таблица 3
Классификация агрессивности сред
Источник: составлено авторами.

Table 3
Classification of media aggressiveness
Source: compiled by the authors.

Агрессивность среды	Скорость коррозии низкоуглеродистой стали, мм/год	Снижение прочности, %
Неагрессивная	До 0,01	0
Слабоагрессивная	0,01–0,05	до 5
Среднеагрессивная	0,05–0,5	до 10
Сильноагрессивная	Более 0,5	15

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования привели к совершенствованию технологии визуально-оптического диагностирования несущих металлоконструкций эскалаторов посредством достижения более точного количественного определения параметров, характеризующих коррозионное разрушение по глубинному, очаговому и механическому критериям. Кроме того, данный подход позволяет учитывать концентрацию агрессивных примесей, воздействующих на материал. От всех иных методов отличается комплексной количественной оценкой сразу трех показателей коррозии: глубинного, очагового и механического. Такое расширение набора регистрируемых характеристик – по сравнению с традиционными технологиями, включающими визуальную оценку и ультразвуковое измерение толщины – увеличивает информативность анализа минимум на треть, что обеспечивает полуторакратное повышение корректности оценки остаточного ресурса металлоконструкций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дятлов В.Н. Моделирование процесса коррозии несущих металлоконструкций эскалатора метрополитена // Вестник МАДИ. 2022. № 1 (68). С. 29–35.
2. Селиверстов Г.В., Данилов А.С. Исследование коррозионной усталости металлоконструкций грузоподъемных машин // Известия ТулГУ. Серия Технические науки. № 2-1 Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. С. 248–253.
3. Дятлов В.Н. Уточнение модели развития коррозионных дефектов несущих металлоконструкций эскалатора метрополитена // Вестник МАДИ. 2022. № 3 (70). С. 46–50.
4. Дятлов В.Н., Орлов С.В., Попов В.А. Совместное влияние циклических нагрузок и коррозии на техническое состояние металлоконструкций эскалаторов метрополитена // Мир транспорта. 2023. Т. 21, № 4 (107). С. 21–28. DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-4-3
5. Ватулин Я.С., Попов В.А., Дятлов В.Н. Техническое диагностирование закладных элементов крановых путей грузоподъемного оборудования в машинных залах тоннельных эскалаторов // Известия МГТУ «МАМИ». 2022. Т. 16, № 3. С. 241–250. DOI: 10.17816/2074-0530-106323
6. Тулин Д.Е., Соколов С.А., Грачев А.А. Влияние остаточных сварочных напряжений на сопротивление конструкций хрупкому разрушению // Вестник машиностроения. 2022. № 3. С. 24–30. DOI: 10.36652/0042-4633-2022-3-24-30
7. Попов В.А., Еланцев В.В. К вопросу повышения эффективности и безопасности эксплуатации тоннельных эскалаторов метрополитена. Управление рисками // Известия МГТУ «МАМИ». 2021. № 3 (49). С. 10–22. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-49-3-10-22
8. Еланцев В.В. К вопросу повышения эффективности и безопасности эксплуатации тоннельных эскалаторов метрополитена. Алгоритм прогнозирования технического состояния // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021. № 2. С. 32–41.
9. Ермилова А.В., Будрина Е.В. Инновационный вектор развития эффективной стратегии эксплуатации тоннельных эскалаторов // Экономика. Право. Инновации. 2020. № 1. С. 57–64.
10. Casals M., Gangolells M., Forcada N., Macarulla M., Giretti A., Vaccarini M. SEAM4US: An intelligent energy management system for underground stations. Applied energy, vol. 166, pp. 150-164. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.01.029
11. Харлов М.В., Попов В.А. Методика оценки технического состояния эскалатора // Интернет-журнал «Науковедение». 2017. Т.9, № 4. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/05TVN417.pdf> (дата обращения: 25.01.2026).
12. Kazarinov N., Smirnov A., Petrov Y., Gruzdkov A. Dynamic fracture effects observed in a one-dimensional discrete mechanical system (2020) E3S Web of Conferences, 157, статья № 01020, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85084111141&doi=10.1051%2fe3sconf%2f202015701020&partnerID=40&md5=ff349ae2159696f6435772713fca13e8> (дата обращения: 25.01.2026). DOI: 10.1051/e3sconf/202015701020
13. Uzdin A., Prokopovich S. Some principles of generating seismic input for calculating structures (2020) E3S Web of Conferences, 157, статья № 06021, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85084111517&doi=10.1051%2fe3sconf%2f202015706021&partnerID=40&md5=2c52657ac32615f175abb033915b52dc> (дата обращения: 25.01.2026). DOI: 10.1051/e3sconf/202015706021
14. Тимофеева Г.Ю., Мазлумян Г.С., Бустонов Д.А. Коррозия деталей технических систем, эксплуатирующихся в Арктике // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2025. № 10. С. 28–40. DOI: 10.31044/1684-2561-2025-0-10-28-40
15. Вагапов Р.К. Исследование особенностей формирования и состава продуктов углекислотной коррозии в водно-спиртовых средах // Коррозия: защита, материалы. Приложение к журналу «Технология металлов». 2025. № 17. С. 1–11. DOI: 10.31044/1684-2499-2025-0-17-1-11
16. Мензилова М.Г., Лебедев О.Ю. Исследование прочности лакокрасочных покрытий на отрыв // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2024. № 2. С. 21–24.
17. Байдюшев И.Г. Важность прогнозирования и моделирования процессов коррозии // Новая наука: от идеи к результату. 2024. № 5. С. 255–260.
18. Гладких Т.Д., Маркин А.Н. Оценка локальной коррозии по данным, получаемым с датчиков электрического сопротивления // Практика противокоррозионной защиты. 2024. Т. 29, № 1. С. 20–26. DOI: 10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-2

19. Маркин А.Н. Оценка локальной коррозии по данным, получаемым с датчиков электрического сопротивления (часть 2) // Практика противокоррозионной защиты. 2024. Т. 29, № 2. С. 21–26. DOI: 10.31615/j.corros.prot.2024.112.2-2

20. Елшина Л.И. Влияние марки и технологии производства арматурной стали на фазовый состав ее продуктов коррозии // Коррозия: защита, материалы. Приложение к журналу «Технология металлов». 2023. № 14. С. 1–11. DOI: 10.31044/1684-2499-2023-0-14-1-11

REFERENCES

1. Dyatlov V.N. Modeling of the corrosion process of bearing metal structures of the subway escalator. *Vestnik MADI*. 2022; no. 1(68), pp. 29-35. (In Russ.)

2. Seliverstov G.V., Danilov A.S. Research of Corrosion Fatigue of Metal Structures of Lifting Machines. *Izvestiya TulGU. Series Technical Sciences*. 2009; no. 2 -1, pp. 248-253. (In Russ.)

3. Dyatlov V.N. Clarification of the model of development of corrosion defects of bearing metal structures of metro escalators. *Vestnik MADI*. 2022; 3(70), pp.46-50. (In Russ.)

4. Dyatlov V.N., Orlov S.V., Popov V.A. Combined Influence of Cyclic Loads and Corrosion on the Technical Condition of Metal Structures of Metro Escalators. *World of Transport and Transportation*, 2023, Vol. 21, Iss. 4 (107), pp. 167–174. (In Russ.) DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-4-3

5. Vatulin Y.S., Popov V.A., Dyatlov V.N. Technical diagnostics of embedded elements of crane tracks of lifting equipment in the machine rooms of tunnel escalators. *Izvestiya MGTU «MAMI»*, 2022; no. 16 (3), pp. 241–250. (In Russ.) DOI: 10.17816/2074-0530-106323

6. Tulin D.E., Sokolov S.A., Grachev A.A. Influence of residual welding stresses on the resistance of structures to brittle failure. *Vestnik mashinostroeniya*. 2022; no. 3. pp. 24-30. DOI: 10.36652/0042-4633-2022-3-24-30

7. Popov V.A., Yelantsev V.V. Increasing the efficiency and safety of operation of underground tunnel escalators. Management of risks. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2021; no. 3 (49), pp. 10-22 (in Russ.) DOI: 10.31992/2074-0530-2021-49-3-10-22

8. Yelantsev V.V. On the issue of improving the efficiency and safety of operation of subway tunnel escalators. The algorithm for predicting the technical condition. *International journal of applied and fundamental research*. 2021; no. 2, pp. 32-41 (in Russ.)

9. Yermilova A.V., Boudrina E.V. Innovative vector of development of effective strategy for tunnel escalator operating. *Ekonomika. Pravo. Innovacii*. 2020; no. 1, pp. 57–64 (In Russ.)

10. Casals M., Gangoells M., Forcada N., Macarulla M., Giretti A., Vaccarini M. SEAM4US: An intelligent energy management system for underground stations. *Applied energy*, vol. 166, pp. 150-164. (in Eng.). DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.01.029

11. Kharlov M.V., Popov V.A. *Internet-zhurnal Naukovedenie*, 2017, vol. 9, no. 4, available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/05TVN417.pdf> (25.07.2024). (In Russ.)

12. Kazarinov, N., Smirnov, A., Petrov, Y., Gruzdkov, A. Dynamic fracture effects observed in a one-dimensional discrete mechanical system (2020) *E3S Web of Conferences*, 157, 01020, (in Eng.) DOI: 10.1051/e3sconf/202015701020

13. Uzdin A., Prokopovich, S. Some principles of generating seismic input for calculating structures (2020) *E3S Web of Conferences*, 157, article № 06021, (in Eng.). DOI: 10.1051/e3sconf/202015706021

14. Timofeeva G.Yu., Mazlumyan G.S., Bustonov D.A. Corrosion of Technical System Parts Used in the Arctic. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*. 2025; no. 10, pp. 28–40. (In Russ.) DOI: 10.31044/1684-2561-2025-0-10-28-40

15. Vagapov R.K. Research on the Formation and Composition of Carbon Dioxide Corrosion Products in Water-Alcohol Media. *Corrosiya: Zashchita, Materiali. Supplement to the Journal «Metal Technology»*. 2025; no. 17, pp. 1–11. (In Russ.) DOI: 10.31044/1684-2499-2025-0-17-1-11

16. Menzilova M.G., Lebedev O.Yu. Research of the Tear Resistance of Paint and Varnish Coatings. *Nauchniye problemi transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2024; no. 2, pp. 21–24. (In Russ.)

17. Baidushev I.G. The Importance of Forecasting and Modeling Corrosion Processes. *Novaya nauka: ot idei k Resul'tatu*. 2024; no. 5, pp. 255–260. (In Russ.)

18. Gladkikh T.D., Markin A.N. Assessment of Local Corrosion Based on Data Obtained from Electrical Resistance Sensors. *Practica protivokorroziionnoi zashchiti*. 2024; vol. 29; no. 1, pp. 20–26. DOI: 10.31615/j.corros.prot.2024.111.1-2

19. Markin A.N. Assessment of Local Corrosion Based on Data Obtained from Electrical Resistance Sensors (Part 2). *Practica protivokorroziionnoi zashchiti*. 2024; vol. 29; no. 2, pp. 21–26. DOI: 10.31615/j.corros.prot.2024.112.2-2

20. Yelshina L.I. Influence of the grade and production technology of reinforcing steel on the phase composition of its corrosion products. *Corrosiya: Zashchita, Materiali. Supplement to the Journal «Metal Technology»*. 2023; no. 14, pp. 1–11. DOI: 10.31044/1684-2499-2023-0-14-1-11

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД СОАВТОРОВ

Дятлов В.Н. Определение цели научного исследования, выделение исходных данных при анализе результатов комплексного обследования металлоконструкций эскалаторов и построение математической модели, подготовка публикации.

Попов В.А. Координация выполнения исследовательской работы, постановка её целей и задач. Формирование и обоснование научной концепции исследования.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Dyatlov V.N. Determining the research goal, selecting initial data for the analysis of comprehensive survey results on escalator metal structures, building a mathematical model, writing the manuscript.

Popov V.A. Coordination of research, setting research goals and objectives, research concept design.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дятлов Вячеслав Николаевич – канд. техн. наук, учитель Инженерно-экономического лицея имени Академика И.М. Виноградова (182100, г. Великие Луки, ул. Заслонова, д. 70).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4864-7554>,

SPIN-код: 2978-6706,

e-mail: w.dyatlov@gmail.com

Попов Валерий Анатольевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (190031, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, д. 9).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2635-5427>,

SPIN-код: 2418-7152,

e-mail: vpopov_58@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dyatlov Vyacheslav N. – Cand. of Sci. (Engineering), Teacher at the Engineering and Economics Lyceum named after Academician I.M. Vinogradov (70, Zaslonoval Street, Velikiye Luki, Pskov Region, 182100).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4864-7554>,

SPIN-code: 2978-6706,

e-mail: w.dyatlov@gmail.com

Popov Valery A. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor at the Department of Land Transport and Technological Complexes of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

(9, Moskovsky Prospekt, St. Petersburg, 190031).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2635-5427>,

SPIN-code: 2418-7152,

e-mail: vpopov_58@mail.ru