

# АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ИЗНОСА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПУТЕЙ

Дубицкий И.С., Енин А.В., Владова А. Ю.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,*

*Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная д.65*

avladova@ipu.ru

*Аннотация: Проведенный анализ распределения дефектов железнодорожного пути по времени и координате позволил выделить величины, которые могут быть использованы в качестве целевых переменных в моделях машинного обучения, прогнозирующих быстроту износа пути. Предложены характеристики дороги, которые могут быть рассмотрены в качестве признаков.*

Ключевые слова: временные ряды, мониторинг инфраструктуры железной дороги, отступления пути

## Введение

Существенный прогресс, достигнутый в последние годы в области машинного обучения (МО) и анализа больших данных, позволил распространить методы, использующиеся в данных дисциплинах, на широкий круг задач [1]. В частности, активно проводятся исследования, связанные с анализом больших транспортных систем. Особый интерес представляют железнодорожные системы ввиду важнейшей роли, которую играет железнодорожный транспорт в экономике [2]. В свою очередь, железнодорожный путь является основной компонентой железнодорожной системы. Однако постоянное увеличение массы поездов, их скорости и частоты прохождения приводит к повышенной скорости износа путей.

Наличие даже небольшого дефекта на путях может быстро привести к появлению более серьезных дефектов и неисправностей и увеличить расходы на техническое содержание путей, а также снизить надежность и доступность системы. Таким образом, тщательный контроль и регулярное обслуживание железнодорожных путей является абсолютно необходимым условием для безопасной и эффективной работы всей системы [3]. Следует отметить, что содержание железнодорожных путей требует существенных финансовых вложений [4]. В связи с этим, становится ясна необходимость оптимизации плана поддерживающих и капитальных ремонтов пути на основании оценки скорости деградации железнодорожного полотна. В тоже время износ путей представляет собой нелинейный процесс, зависящий от большого числа факторов [5].

Для построения адекватной модели процесса деградации путей необходимо определить динамику отклонения параметров пути с течением времени. Данная статья посвящена выявлению особенностей изменения качества путей на одном из участков протяженностью в 1000 километров. Проанализированы накопленные данные за три года измерений.

## 1 Подходы к оценке качества железнодорожного пути

Основной целью моделирования износа железнодорожного пути является получение прогноза будущего состояния пути с учетом важнейших параметров, влияющих на его качество, а также текущих измерений. Можно выделить два основных подхода к моделированию износа пути – инженерный и статистический [6].

Инженерный подход заключается в выявлении механических свойств всех элементов, составляющих железнодорожный путь, при помощи теоретического моделирования и экспериментов. При этом необходимо также учитывать особенности не только непосредственно железнодорожного пути, но и подвижного состава. Несомненное преимущество данного подхода состоит в построении физической картины происходящих в железнодорожном полотне процессов и возможность создания аналитических моделей. Однако механические свойства путей и локомотивов в значительной степени изменчивы и трудно поддаются количественной оценке. Следовательно, и количественные предсказания износа путей часто бывают затруднены.

Статистический подход заключается в анализе большого числа наблюдений за состоянием пути и построении предсказательной модели, основанной на статистическом анализе и методах машинного обучения. Преимуществом данного метода является возможность получения количественных оценок, так как статистические данные основаны на фактической информации о появлении тех или иных неисправностей. Тем не менее, следует с осторожностью выбирать предсказательную модель, так как отсутствие глубокого понимания физических процессов, происходящих в железнодорожном полотне, может привести к некорректным результатам. Первый шаг на пути создания адекватной модели машинного обучения состоит в анализе возможных признаков и целевых переменных. Данная работа

посвящена изучению динамики износа пути, которая может рассматриваться в качестве целевой переменной.

Дефекты железнодорожного пути можно разделить на геометрические и структурные отклонения [7]. Дефекты геометрии пути определяются нежелательными отклонениями геометрических параметров рельсов от проектных значений. Обычно их выявление проводится при помощи путеизмерительных вагонов в автоматическом режиме. В русскоязычной литературе дефекты данного типа называют отступлениями [8]. Структурные дефекты описывают структурную деградацию компонентов железнодорожного пути, таких как рельсы, балласт, скрепления и т.д. [9]. Данные типы дефектов часто выявляются во время визуальных осмотров. В русскоязычной литературе данные дефекты называют неисправностями [8]. Следует отметить, что визуальные осмотры часто проводятся по более субъективным критериям, чем автоматические измерения геометрических дефектов пути. Кроме того, именно геометрия пути оказывает определяющее влияние на комфорт пассажиров и безопасность движения. В связи с этим, в настоящей работе рассматриваются именно отступления.

## 2 Распределение отступлений по времени и координате

В работе рассматриваются отступления, зарегистрированные на участке длиной 1000 км в 2018–2020 годах. За это время было выявлено порядка  $10^5$  отступлений. Подавляющее большинство отступлений относилось к семи типам (Рис. 1): “Уш” – уширение рельсовой колеи, “Суж” – сужение рельсовой колеи, “У” – плавное отклонение по уровню от нулевой линии, “Пр.Л” – просадка левая, “П” – перекося, “Р” – отступление в плане по рихтовочной рельсовой нити, “Пр.П” – просадка правая. Можно видеть, что наиболее часто встречаются левые и правые просадки, а также плавные отклонения по уровню от нулевой линии. Данное обстоятельство связано с тем, что в большинстве случаев отступления данных типов имеют низкие степени, то есть не представляют опасность для функционирования пути. Тем не менее, отметим, что и для остальных типов отступлений были собраны обширные статистические данные.

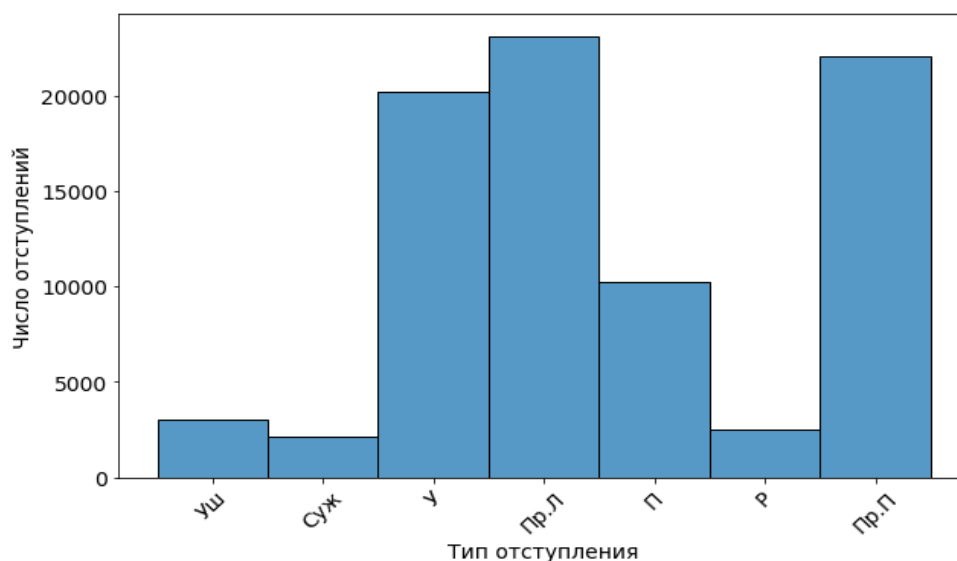


Рис. 1. Распределение типов отступлений на участке железной дороги. Данные были собраны за период 2018–2020 годов. Расшифровка названий отступлений приведена в основном тексте.

Распределение отступлений по километрам дистанции представлено на Рис. 2. Число отступлений возрастает при приближении к конечным станциям пути. Тем не менее, для большинства километров дистанции распределение отступлений близко к равномерному с наличием некоторых выбросов, по-видимому, соответствующих более загруженным участкам.

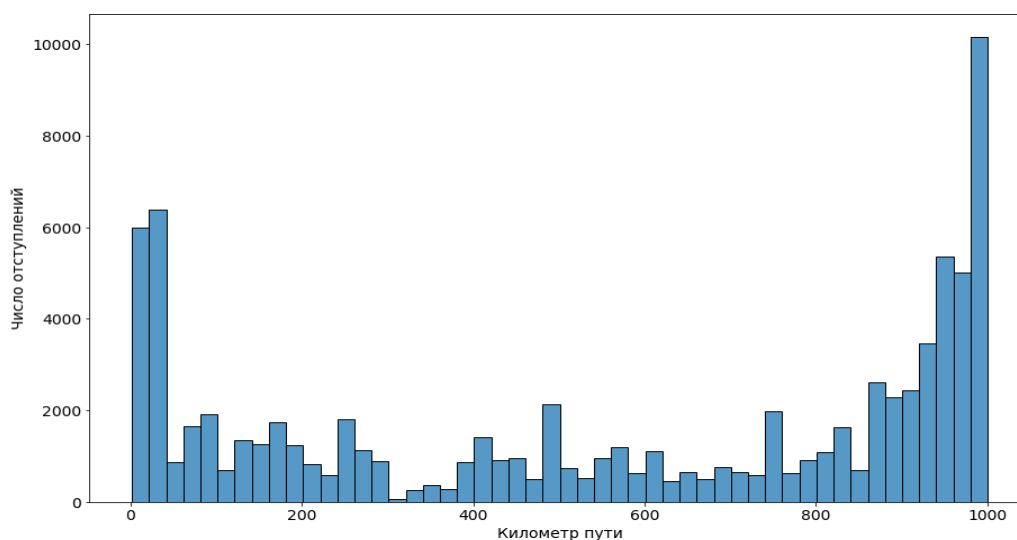


Рис. 2. Распределение отступлений по километрам дистанции.

Наконец распределение отступлений по дате регистрации показано на Рис. 3. Можно видеть, что в 2020 году произошел скачок регистрации отступлений. Дальнейший анализ показал, что данный скачок связан с увеличением регистрации отступлений первой степени в 2020 году. Отметим, что по степени тяжести отступления можно разделить на четыре класса [8]. Отступления четвертой степени угрожают безопасности движения и требуют ограничения скорости движения или закрытия участка пути для движения. Они должны устраняться незамедлительно. Отступления третьей степени близки к величинам, требующим ограничения скорости движения и должны устраняться в трехдневный срок. Отступления второй степени устраняются в плановом порядке. Но отступления первой степени не требуют незамедлительного устранения, их ликвидация производится в плановом порядке. Таким образом, отступления первой степени представляют собой некоторую обособленную группу. На Рис. 4 представлено распределение отступлений всех степеней, кроме первой. Отметим, что распределение является более равномерным. Таким образом, значительного колебания регистрации отступлений всех степеней, кроме первой, не наблюдалось. В дальнейшем мы будем учитывать отступления первой степени отдельно там, где это необходимо.

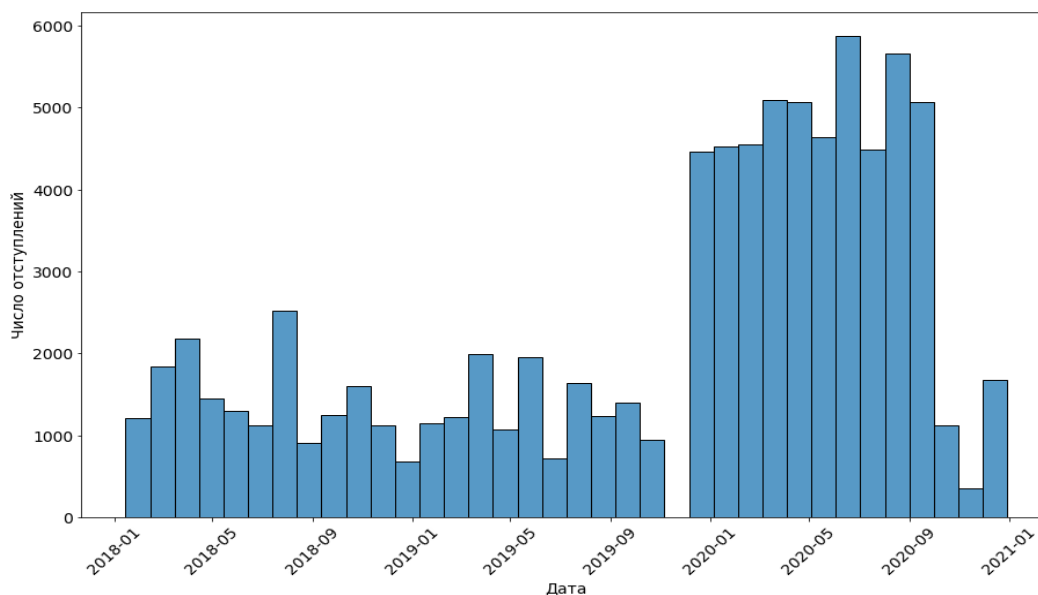


Рис. 3. Распределение отступлений всех степеней по дате регистрации

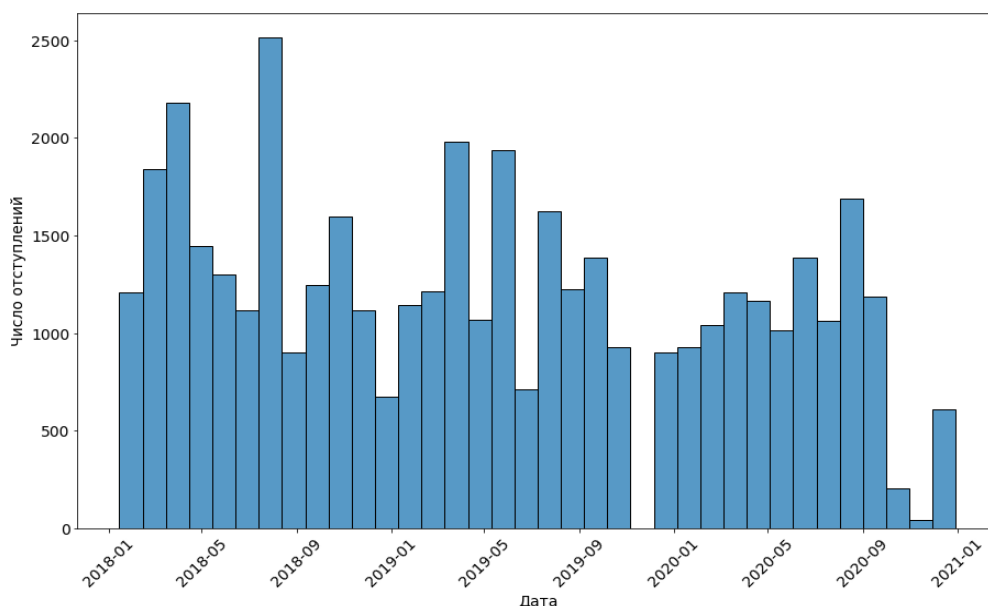


Рис. 4. Распределение отступлений второй, третьей и четвертой степени по дате регистрации

### 3 Динамика регистрации отступлений

Большинство железнодорожных компаний использует агрегированные показатели для оценки качества каждого километра пути [9]. Обычно они представляют собой некоторые общие оценки километра пути, сделанные на основании данных об отступлениях (track geometry index) или о неисправностях (track structure index). Однако конкретные выражения для данных показателей могут сильно отличаться в различных странах. Например, можно использовать данные о дисперсии геометрических параметров данного километра пути или рассматривать общее число дефектов [6].

Путеизмерительные средства в России фиксируют не геометрические параметры пути, но непосредственно сами отступления, их длины и амплитуды [8]. Каждому отступлению соответствует свое характерное распределение длин, например, перекосы, по определению не могут превышать 20 метров. В тоже время длины сужений в принципе могут быть неограниченны. На Рис. 5 и Рис. 6 в качестве примера приведены распределения длин этих типов отступлений. Таким образом, из-за резко отличающихся распределений различных типов отступлений по длине отступления, данный параметр не совсем подходит для использования в качестве агрегирующего показателя качества пути. В свою очередь, амплитуда отступления непосредственно связана со степенью дефекта. Общее число отступлений на километр пути также используется для оценки качества километра. Таким образом, можно рассмотреть данные параметры в качестве агрегирующих показателей.

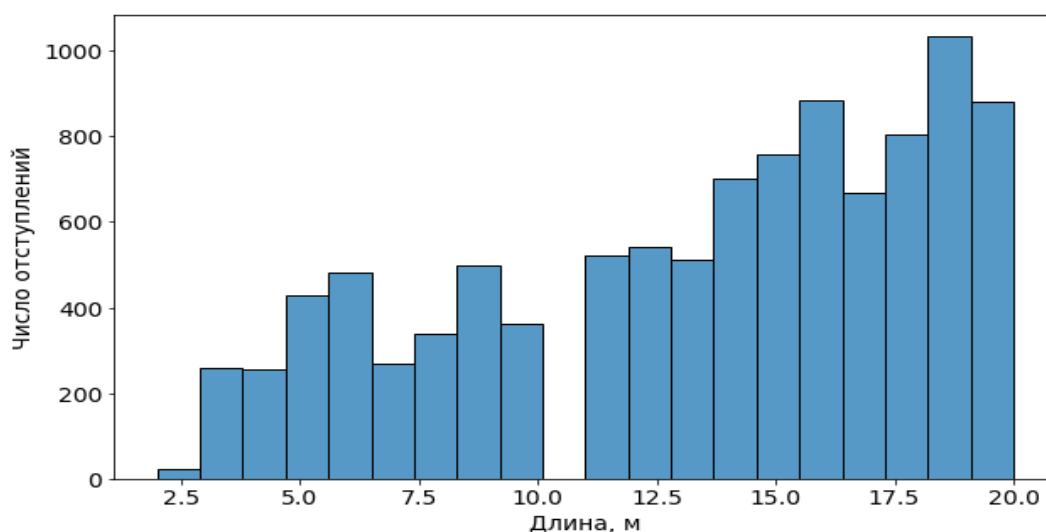


Рис. 5. Распределение отступлений типа “перекос” по длинам

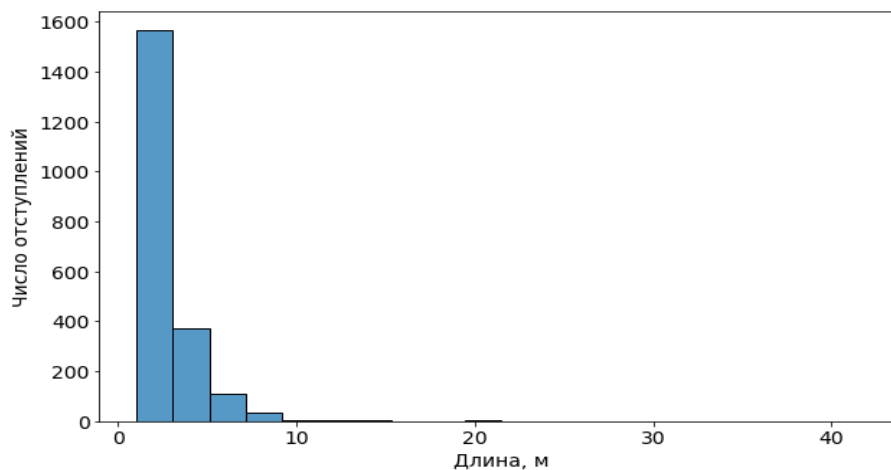


Рис. 6. Распределение отступлений типа “сужение” по длинам

Типичная зависимость общего числа отступлений для данного километра дистанции от времени приведена на Рис. 7. Скачок регистрации числа отступлений после 600-го дня связан с увеличением регистрации отступлений первой степени в 2020 году, которое обсуждалось выше. Как было отмечено отступления первой степени не требуют проведения неотложных ремонтных работ, поэтому более репрезентативная картина может быть получена при учете только отступлений второй, третьей и четвертой степени (Рис. 8).

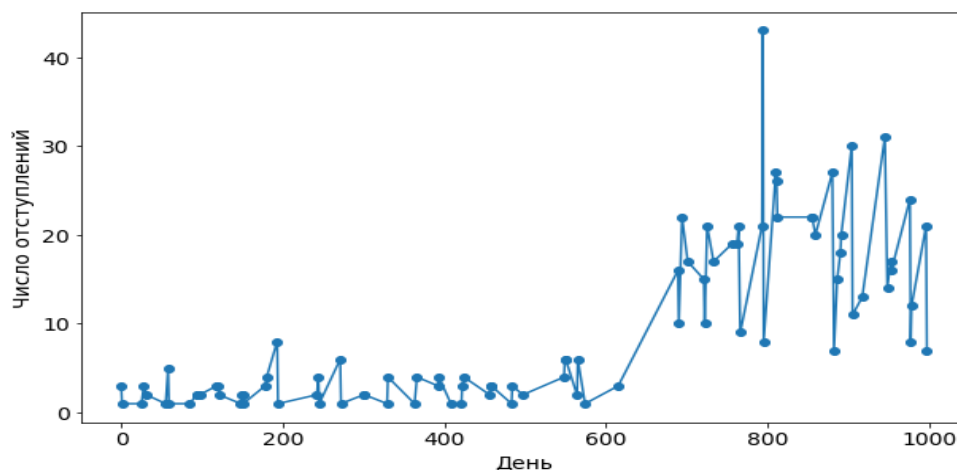


Рис. 7. Зависимость числа отступлений от времени для одного из километров пути. Учитывались отступления всех степеней.

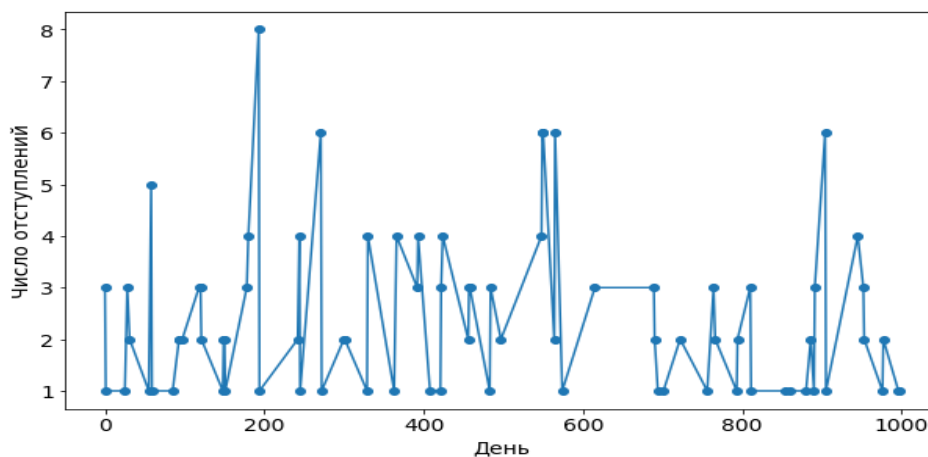


Рис. 8. Зависимость числа отступлений от времени для одного из километров пути. Учитывались отступления только второй, третьей и четвертой степени.

Можно видеть, что зависимость состоит из ярко выраженных колебаний числа отступлений. Данные колебания связаны с поддерживающими ремонтами, которые проводятся после выявления нескольких отступлений на участке. После проведения ремонтов число регистрируемых отступлений резко падает, но затем снова начинает возрастать.

Как было отмечено выше, качество пути можно определять не только с помощью фиксации числа отступлений, регистрируемых на данном километре пути, но также и посредством определения суммарной амплитуды всех отступлений. Так как амплитуды отступлений имеют различные диапазоны значений, то предварительно они были проведены к интервалу [1;2]. Оказалось, что зависимости суммарной амплитуды отступлений от времени практически совпадают с графиками общего числа отступлений (Рис. 9). Таким образом, данные меры качества пути являются взаимозаменяемыми.

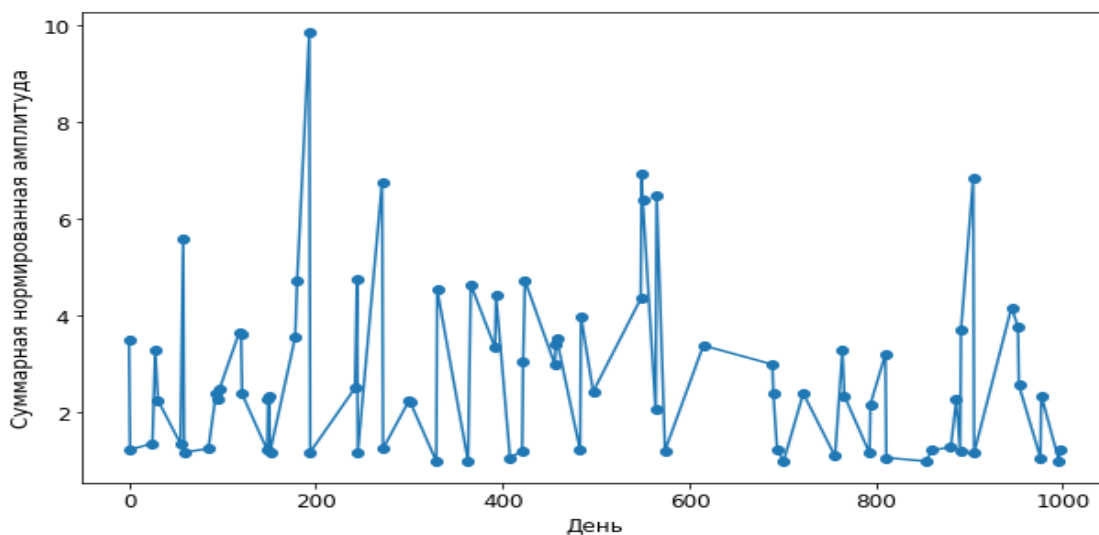


Рис. 9. Зависимость суммарной амплитуды отступлений от времени для одного из километров пути. Учитывались отступления только второй, третьей и четвертой степени.

Было установлено, что капитальные ремонты пути оказывают сильное влияние на характер зависимости числа отступлений от времени. На Рис. 10 приведена соответствующая зависимость для километра пути, на котором был проведен капитальный ремонт. После проведения ремонта (420 день) число отступлений резко сократилось и не возрастало в течение последующих 300 дней. Затем было зарегистрировано сразу несколько новых отступлений, но после проведения поддерживающего ремонта число отступлений вновь сократилось до минимума.

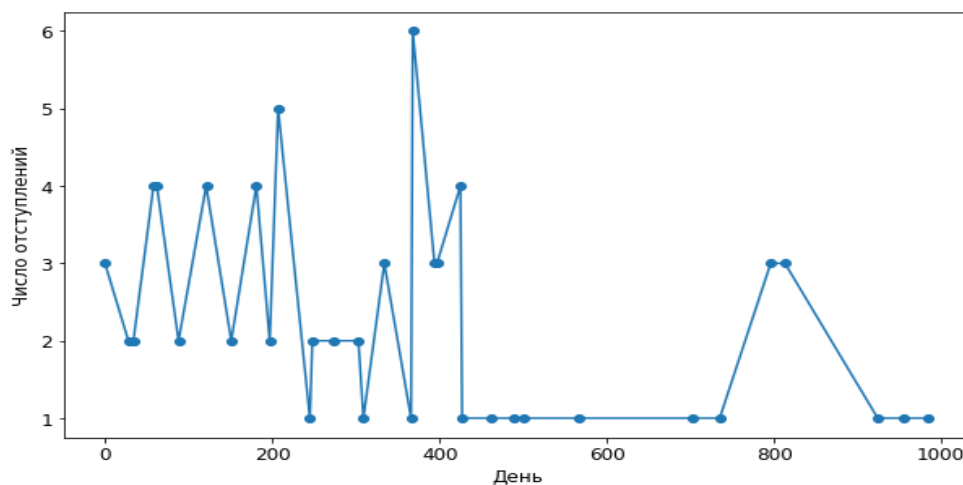


Рис. 10. Зависимость числа отступлений от времени для одного из километров пути, на котором был проведен капитальный ремонт. Учитывались отступления только второй, третьей и четвертой степени.

Можно предположить, что некоторые характерные интегральные характеристики зависимости числа отступлений от времени можно использовать в качестве целевых переменных для модели машинного обучения, предсказывающей степень износа рельсов. Например, в качестве таких характеристик можно рассмотреть углы наклоны участков роста числа отступлений или характерные периоды колебаний. При этом в качестве признаков можно использовать такие характеристики железнодорожного пути как угол наклона, радиус кривизны, средней пропущенный тоннаж, ограничения по скорости движения поездов, тип и возраст рельсов, глубину балластной призмы и типы креплений. В дальнейшем планируется построение модели, учитывающей данные характеристики.

## Заключение

Работа посвящена исследованию динамики износа железнодорожных путей одного из участков железной дороги. Установлено, что в качестве показателя, отражающего степень дефектности данного километра пути можно использовать общее количество отступлений, выявленных на данном километре или их суммарную амплитуду. Показано, что зависимость числа отступлений от времени имеет ярко выраженный осциллирующий характер, что связано с проведением поддерживающих ремонтов после выявления отступлений. Причем капитальные ремонты пути имеют определяющее влияние на быстроту износа железнодорожного полотна. Интегральные характеристики зависимостей числа отступлений от времени, такие как характерные частоты или средние углы наклона отдельных участков могут быть использованы в качестве целевых переменных в моделях машинного обучения, прогнозирующих износ рельсов. Данные характеристики могут быть индивидуальны для каждого километра дистанции и зависеть от кривизны путей, угла их наклона, пропущенного тоннажа, установленной скорости движения и т.д.. Таким образом, были определены возможные целевые переменные и признаки для модели машинного обучения, вычисляющей степень деградации путей.

## Литература

1. Bertolini, M., Mezzogori, D., Neroni, M. and Zammori, F. Machine Learning for industrial applications: a comprehensive literature review // *Expert Systems with Applications*, Vol. 175, p.114820, 2021
2. Sharma S, Cui Y, He Q, Mohammadi R, Li Z. Data-driven optimization of railway maintenance for track geometry // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 90, pp. 34-58, 2018
3. Durazo-Cardenas, I., Starr, A., Turner, C.J., Tiwari, A., Kirkwood, L., Bevilacqua, M., Tsourdos, A., Shehab, E., Baguley, P., Xu, Y. and Emmanouilidis, C. An autonomous system for maintenance scheduling data-rich complex infrastructure: Fusing the railways condition, planning and cost. // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 89, pp.234-253, 2018
4. Zoeteman, A., Dollevoet, R., Li, Z. Dutch research results on wheel/rail interface management: 2001–2013 and beyond. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol. 228, pp.642-651, 2014
5. Guler, H. Prediction of railway track geometry deterioration using artificial neural networks: a case study for Turkish state railways. // *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 10, pp.614-626, 2014
6. Sadeghi, J., Askarinejad, H. Development of improved railway track degradation models. // *Structure and infrastructure engineering*, Vol. 6, pp.675-688, 2010
7. Soleimanmeigouni, I., Ahmadi, A., Kumar, U. Track geometry degradation and maintenance modelling: A review. // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol. 232, pp.73-102, 2018
8. Инструкция по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов, РЖД от 28.02.2020 года // <https://rzd-puteetz.ru/instruktsiya-po-otsenke-sostoyaniya-relsovoj-kolei-puteizmeritelnymi-sredstvami/>
9. Ghofrani, F., He, Q., Goverde, R.M. and Liu, X. Recent applications of big data analytics in railway transportation systems: A survey. // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 90, pp.226-246, 2018