

УДК 617.586:004.8

DOI: 10.22213/2410-9304-2026-3-17-22

Технология автоматизированного проектирования индивидуальных ортопедических стелек на основе плантограммы

В. В. Михайлишин, кандидат медицинских наук, Федеральный научно-образовательный центр медико-социальной экспертизы и реабилитации им. Г. А. Альбрехта, Санкт-Петербург, Россия

С. Г. Амелькин, Красноярск, Россия

Л. М. Смирнова, доктор технических наук, доцент, Федеральный научно-образовательный центр медико-социальной экспертизы и реабилитации им. Г. А. Альбрехта, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

М. В. Пантелеев, Федеральный научно-образовательный центр

медико-социальной экспертизы и реабилитации им. Г. А. Альбрехта, Санкт-Петербург, Россия

Г. Н. Пономаренко, доктор медицинских наук, профессор, Федеральный научно-образовательный центр медико-социальной экспертизы и реабилитации им. Г. А. Альбрехта, Северо-Западный государственный медицинский университет им. И. И. Мечникова, Санкт-Петербург, Россия

К. К. Щербина, доктор медицинских наук, доцент, Федеральный научно-образовательный центр медико-социальной экспертизы и реабилитации им. Г. А. Альбрехта, Санкт-Петербург, Россия

В статье представлена технология автоматизированного проектирования индивидуальных ортопедических стелек на основе электронной плантограммы. Цель работы состояла в разработке последовательности преобразования результатов плантографического исследования в параметры трехмерной модели изделия, подготовленной для аддитивного изготовления. Исходными данными служили электронные изображения подошвенной поверхности стоп, нормативно-правовые акты и стандарты по изготовлению вкладных корригирующих элементов для ортопедической обуви. Технология включает получение и унификацию изображения, классификацию правой и левой стопы, автоматизированную разметку анатомических ориентиров средствами искусственного интеллекта, расчет плантографических и подометрических показателей, прогнозирование высоты продольного свода и проверку результатов оператором. После подтверждения исходных параметров выполняется параметрическое CAD-моделирование каркаса. Геометрия изделия определяется длиной стопы, высотой продольного свода, толщиной каркаса и положением анатомических ориентиров. Место центра метатарзального пелота рассчитывается по проекциям головок II и III плюсневых костей со смещением к пятке на 7 мм. Для заднего отдела формируется отдельная амортизирующая вставка и соответствующее посадочное место. Наружная форма каркаса согласуется с метрической системой определения размеров обуви по ГОСТ Р 58149–2018. Разработанная технология состоит из девяти взаимосвязанных этапов и завершается созданием отдельных STL-моделей каркаса, метатарзального пелота и пяточного амортизатора. Разделение моделей позволяет использовать материалы с различными механическими свойствами, в том числе PA12 для каркаса и TPU для мягких элементов. Предложенная последовательность связывает данные плантографического исследования, автоматизированную разметку и расчет показателей, цифровое проектирование и изготовление индивидуального ортопедического изделия.

Ключевые слова: электронная плантограмма, ортопедическая стелька, CAD-моделирование, искусственный интеллект, аддитивное изготовление.

Введение

Компьютерная плантография формирует количественное описание опорной поверхности стопы, распределения плантарной нагрузки и признаков деформации продольного свода [1]. Для изготовления индивидуальных ортопедических стелек эти данные служат диагностической характеристикой и метрической основой задания геометрии, высоты свода, зон разгрузки и локальной жесткости индивидуальной стельки [2].

Переход от визуальной интерпретации отпечатка стопы к цифровой обработке повышает воспроизводимость измерений, так как линейные, угловые показатели рассчитываются по унифицированным анатомическим ориентирам [1]. Современные модели глубокого обучения выполняют классификацию типа стопы и оценку свода по изображениям плантарного давления, что создает предпосылки для автоматизированной разметки плантограмм [3]. Регрессионное прогнозирование высоты продольного свода по плантографическим и подометрическим параметрам снижает потребность в лучевых методах при первичном параметрическом проектировании ортопедического изделия [4].

Клиническая эффективность ортопедической стельки связана с перераспределением давления в переднем отделе, области продольного свода и пяточном отделе [5, 6]. Для

пациентов с деформациями переднего отдела стопы индивидуальные полно-контактные стельки уменьшают локальные перегрузки и изменяют временно-пространственные характеристики ходьбы [2]. При кавусной стопе персонализированные стельки с поддержкой свода и коррекцией переднего отдела снижают зону контакта в медиальном отделе переднего отдела и в пяточной области во время бега [5]. При плоской стопе эффективность изделия определяется сочетанием высоты поддержки свода, медиального клина, чашеобразного элемента пятки и жесткости материала.

Аддитивное изготовление стало технологической базой для перевода индивидуальной CAD-модели в изделие с заданной наружной формой, переменной толщиной и регионально регулируемой жесткостью [7].

Систематические обзоры и клинические исследования показывают, что 3D-печатные стельки могут перераспределять плантарное давление, снижать боль и улучшать комфорт при плоской стопе, подошвенном болевом синдроме и диабетической стопе [7]. Персонализированные решетчатые структуры и зоны с заданной упругостью создают возможность адресной разгрузки областей высокого давления без ручной доводки формы после изготовления [8].

Для заднего отдела стопы амортизирующая зона имеет клиническое значение, поскольку пиковые нагрузки в пяточной области участвуют в формировании болевого синдрома и риска трофических повреждений у пациентов с диабетом [9].

Для переднего отдела клинически значима разгрузка проекций плюсневых головок, так как эта зона часто формирует участки повышенного давления при деформациях стопы и нарушениях опорной функции [6]. Поэтому проектирование стельки должно учитывать точки анатомической разметки, расчетные показатели плантограммы для построения CAD-модели [8].

В литературе достаточно подробно освещены методы анализа плантограмм, машинного обучения и 3D-печати, однако недостаточно представлены технологические схемы, где электронная плантограмма непосредственно преобразуется в параметры каркаса стельки, положения метатарзального пелота и пяточного амортизатора [1].

Цель исследования – описать технологию персонализированного синтеза индивидуальной ортопедической стельки.

Материалы и методы

Материалом для разработки технологии служили электронные плантограммы стоп, документация и стандарты по изготовлению вкладных корректирующих элементов для ортопедической обуви. Обработка изображения включала унификацию (выделение, выравнивание по длине и центрирование изображений стоп, их разделение на отдельные снимки).

Для аннотирования изображений использовались методы компьютерного зрения и искусственного интеллекта [10]. Дополнительно моделями искусственного интеллекта производится прогнозирование положения точек, соответствующих проекции головок II и III плюсневых костей. Они необходимы для построения элементов для расчета положения метатарзального пелота. Верификация разметки проводилась экспертами (врачами-травматологами).

Для расчета показателей, используемых в диагностике и проектировании изделия, использовалась методика, по

которой на основе анатомических ориентиров выполняется построение прямых и отрезков, определяются длины отрезков, углы между прямыми и в последующем рассчитываются пантографические и подометрические показатели [11]. Высота продольного свода была получена посредством ее прогнозирования ранее обученной моделью искусственного интеллекта на основе пантографических и подометрических показателей [12].

Линейные размеры анатомических структур на плантограммах определяли после перевода координат изображения из пикселей в миллиметры по коэффициенту масштабирования, рассчитываемому исходя из известных физических размеров поля сканирования:

$$K = \frac{L_\alpha}{L_\beta},$$

где K – коэффициент масштабирования (мм/пикс); L_α – длина поля снимка в мм; L_β – длина поля снимка в пикселях;

$$L_{mm} = L_{px} \cdot K, \quad (1)$$

где L_{mm} – длина объекта в мм; L_{px} – длина объекта в пикселях.

Построение каркаса стельки выполнялось средствами параметрического CAD-моделирования. Для сопоставления снимка компьютерной пантографии изделия предварительно на первом этапе за общую точку расчета расстояний была взята точка, соответствующая наиболее дистальной точке заднего отдела стопы. Параметрическое проектирование индивидуальных ортопедических стелек выполняли в САПР SOLIDWORKS 2025, а автоматизацию построения и экспорта моделей реализовали на Python 3.10 с использованием SOLIDWORKS COM API, библиотек pywin32 и NumPy.

Результаты

Разработана технология синтеза индивидуальной ортопедической стельки, состоящая из 9 взаимосвязанных этапов. Общая схема технологии представлена на рис. 1.

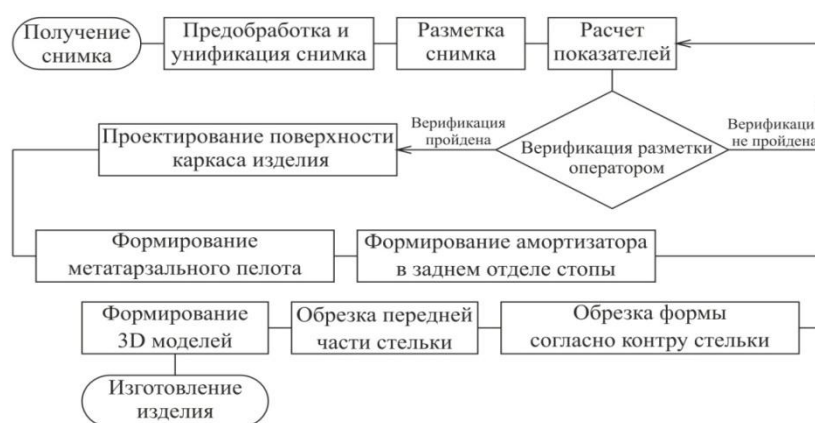


Рис. 1. Схема цифрового синтеза индивидуальной ортопедической стельки

Fig. 1. Digital workflow from plantogram to CAD model

Этап 1. Производится получение электронной плантограммы посредством оптического планшетного сканирования плантарной поверхности стопы.

Для снимка задаются физические размеры поля регистрации, которые используются для перевода координат анатомических ориентиров из пикселей в миллиметры по формуле (1).

Далее на этом этапе оператором проверяются исходный снимок, полнота отображения стоп, выполнение правил проведения исследования.

Этап 2. Производится унификация снимка, классификация левой и правой стопы, разметка снимков средствами искусственного интеллекта согласно используемой методике. Пример разметки снимка представлен на рис. 2.

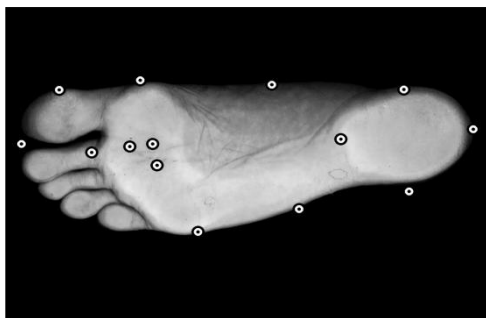


Рис. 2. Разметка снимка стопы

Fig. 2. Markup of a photograph of a leg

Таблица 1. Параметры, контролируемые оператором перед построением изделия

Table 1. Parameters verified by the operator before product modeling

Параметр	Единица изм.	Назначение
Длина стопы	мм	Определение продольного размера каркаса и построение контура каркаса стельки
Высота продольного свода	мм	Перестроение рабочей поверхности
Толщина каркаса	мм	Определение расстояния между верхней и нижней поверхностями
Передний опорный ориентир от пятки	мм	Расчет переднего среза
Проекция головок II и III плюсневых костей	мм	Размещение ориентира и расчет положения пелота
Положение амортизирующей вставки пяточного отдела	мм или доля длины стопы	Размещение посадочного места и отдельной детали
Размер обуви	по ГОСТ Р 58149–2018	Формирование контура каркаса стельки
Статус проверки оператором	Подтверждено или отклонено	Разрешение построения и выгрузки моделей

Этап 5. Формируется каркас изделия и выкладка продольного свода стопы посредством построения параметрической пространственной поверхности, геометрия которой задается системой уравнений, связывающих длину стопы, высоту продольного свода и толщину каркаса с положением анатомически ориентированных продольных и поперечных сечений. Верхняя рабочая поверхность строится по семейству согласованных кривых, проходящих через пяточный отдел, область продольного свода, передний отдел и носочную часть, что обеспечивает плавное распределение высоты вдоль стопы и сохранение пропорций при изменении длины изделия. Нижняя поверхность или нижняя плоскость задается ниже рабочей поверхности и определяет толщину каркаса: она может располагаться на постоянном расстоянии от верхней поверхности либо изменяться по зонам, если требуется различная жесткость в разных отделах стопы. После перестроения уравнений обе поверхности образуют замкнутую B-Rep-геометрию каркаса. Пример поверхности каркаса изделия представлен на рис. 3.

Этап 6. Формирование метатарзальной разгрузки переднего отдела стопы производится на основе точек проекции головок II и III плюсневых костей. На основе этих точек на поверхности каркаса задается расположение метатарзального пелота либо ориентира для его установки. Центр пелота располагается между этими проекциями со смещением к пятке на 7 мм. Таким образом, положение корректирующего элемента напрямую связано с морфологией переднего отдела стопы.

Этап 3. Производится расчет плантографических и подометрических показателей, проводится прогноз высоты продольного свода. К расчетным параметрам относятся длина стопы, ширина в заданных отделах, расстояние от заднего края пятки до наиболее медиально выступающей точки в переднем отделе стопы.

Этап 4. Оператор проводит верификацию качества разметки снимков и анализирует полученные показатели. Если данные подтверждены, они переходят в CAD-построение. Если данные требуют исправления, оператор уточняет их до построения модели и производится повторный расчет показателей, согласно предыдущему этапу. Пример набора контролируемых оператором показателей представлен в табл. 1.



Рис. 3. Поверхность каркаса изделия

Fig. 3. Surface of the product frame

Этап 7. На этом этапе формируется элемент для амортизации нагрузки в заднем отделе стопы. Его положение определяется относительно заднего края пятки и может задаваться долей длины стопы. Вставка создается как отдельная деталь, а в каркасе формируется соответствующее посадочное место посредством вычета логической операцией. Толщина вставки принимается равной толщине каркаса или немного меньше с учетом технологического зазора.

Этап 8. На этом этапе производится формирование контура каркаса стельки и моделирование переднего среза. Контур каркаса стельки формируется по требованиям ГОСТ Р 58149–2018, задающим метрическую систему определения размеров обуви. Передний срез строится относительно заднего края пятки по кривой, соответствующей форме переднего отдела. После среза боковые ребра скругляются, что улучшает технологичность изделия и снижает риск образования острых участков. Пример готового к печати изделия модели представлен на рис. 4.

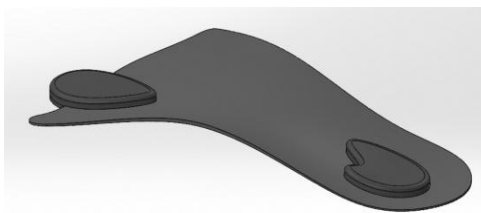


Рис. 4. Готовое к печати изделие

Fig. 4. Ready-to-print product

Этап 9. Подготовка моделей к аддитивному изготовлению. Каркас, метатарзальный пелот (при необходимости) и мягкая пяточная вставка сохраняются отдельными STL-моделями. Оператор получает контрольную карту изделия, где указаны подтвержденные размеры, высота свода, толщина каркаса, положение зон переднего отдела, положение пяточной вставки, контур каркаса стельки и статус построения.

После выгрузки каркас может изготавливаться из PA12, а мягкая пяточная вставка и пелот – из TPU. Далее каркас соединяется с верхним материалом с предварительно нанесенным термоклеевым слоем. Клеевой слой активируется нагревом, изделие прессуется, охлаждается и дорабатывается по контуру каркаса стельки.



Рис. 5. Маршрут изготовления индивидуальной ортопедической стельки

Fig. 5. Manufacturing route of the custom orthotic insole

В качестве экспериментальной апробации разработанной технологии был изготовлен опытный образец индивидуальной ортопедической стельки (ИОС) по параметрам электронной плантограммы. Его цифровое проектирование выполнялось по схеме, представленной на рис. 1, а аддитивное изготовление и сборка – по маршруту на рис. 5. Апробация охватывала построение каркаса и функциональных элементов, выгрузку отдельных STL-моделей, изготовление деталей и пробную сборку; при этом оценивали соответствие состава полученного изделия цифровой модели, сопряжение каркаса с мягкими элементами, отсутствие визуально выявляемых дефектов и возможность выполнения предусмотренных сборочно-клеевых операций. Получение опытного образца подтвердило принципиальную реализуемость полного технологического цикла – от электронной плантограммы до физического изделия. Изготовленный образец представлен на рис. 6.

Анализ результатов

Предложенная технология переводит плантографическое исследование в геометрию изделия. В работах по плантографии основное внимание уделяется измерению отпечатка, оценке сводов и диагностической интерпретации полученных показателей [13; 14]. В отличие от таких подходов, представленная технология использует плантографические данные как исходные параметры для построения каркаса, коррекционных элементов и моделей для печати.

В работах по цифровой обработке плантограмм показана возможность автоматизации получения расчетных признаков и повышения воспроизводимости анализа [15]. Исследования цифровой трансформации протезно-ортопедической помощи подчеркивают необходимость перехода от отдельных цифровых операций к связанным технологическим схемам [16].



Рис. 6. Пример изготовленной по разработанной технологии полустельки

Fig. 6. An example of a semi-insole made using the developed technology

Преимущество предложенного решения состоит в том, что обработка снимка, прогноз высоты свода, проверка оператором и CAD-построение соединены в одну последовательность.

Методы искусственного интеллекта в медицинских изображениях обычно решают задачи детекции, сегментации и классификации [17; 18]. В данной работе эти методы используются не как самостоятельный диагностический блок, а как средство подготовки геометрических параметров изделия. За счет этого анатомические ориентиры сохраняют метрическое значение и непосредственно участвуют в построении выкладки продольного свода, метатарзальной разгрузки и пяточной вставки.

Отдельные работы по аддитивному изготовлению описывают возможности печати сложных изделий и сочетания материалов с различными свойствами [19; 20]. В предлагаемой технологии эти возможности привязаны к ортезированию: каркас и мягкая пяточная вставка формируются как разные модели, что позволяет сочетать жесткую опорную часть и эластичный амортизирующий элемент. Дополнительным преимуществом является возможность задавать толщину каркаса постоянной или изменяемой по зонам через построение нижней поверхности.

Формирование контура каркаса по ГОСТ Р 58149–2018 обеспечивает согласование наружной геометрии изделия с метрической системой определения размеров обуви. Это отличает предложенную схему от решений, где наружная форма задается только по усредненной заготовке или ручной доработке после печати.

Проекции головок II и III плюсневых костей имеют самостоятельное значение для проектирования. Они задают положение коррекционных элементов переднего отдела и позволяют связать метатарзальный пелот с индивидуальной анатомией. При использовании двух бобышек эти же ориентиры переносятся на поверхность каркаса как зоны опоры переднего отдела.

Проверка оператором повышает воспроизводимость результата. Специалист оценивает не внутреннюю работу алгоритма, а клинически и технологически значимые данные: качество снимка, анатомические ориентиры, длину стопы, высоту свода, положение коррекционных элементов и готовность моделей к печати. Таким образом, программный модуль автоматизирует расчеты, а решение о готовности данных к построению остается за оператором.

Результаты технологической апробации показали, что разработанная последовательность обеспечивает сквозной перенос индивидуальных параметров из электронной плантограммы в геометрию каркаса и отдельных коррекционных элементов и позволяет получить опытный образец без возврата к ручному формованию базовой поверхности. В отличие от традиционного изготовления по усредненной заготовке и последующей ручной доводки, предложенный подход сохраняет прослеживаемую связь между анатомическими ориентирами и положением функциональных зон изделия, а раздельное формирование STL-

моделей позволяет использовать материалы с различными механическими свойствами.

Выводы

1. Разработана технология персонализированного синтеза индивидуальной ортопедической стельки на основе электронной плантограммы, объединяющая обработку снимка, расчет плантографических показателей и подометрических показателей САД-построения.

2. Доказана технологическая состоятельность схемы, при которой каркас, метатарзальный пелот и пяточная вставка формируются как отдельные модели на основе плантографических и подометрических показателей пациента для последующего изготовления из материалов с различными механическими свойствами.

Библиографические ссылки

1. Михайлишин В. В., Смирнова Л. М., Черкашин С. О. Цифровая обработка электронных плантограмм с применением технологий искусственного интеллекта как этап автоматизации плантографических исследований // Цифровая обработка сигналов. 2024. № 3. С. 19.
2. Chen H. Y. et al. Effects of customized full-contact insoles crafted with polyester fabric sheets on plantar pressure and gait in hallux valgus // Bioengineering. 2025. Т. 12, №. 2. С. 103. DOI: <https://doi.org/10.3390/bioengineering12020103>.
3. Liao H. R., Yu H. C., Li S. J. A Deep Learning-Based Plantar Pressure Measurement System for Accurate Foot Arch Index Estimation // Applied Sciences. 2025. Т. 15, № 18. С. 10156. DOI: <https://doi.org/10.3390/app151810156>.
4. Прогнозирование высоты продольного свода стопы на основе плантографических показателей средствами искусственного интеллекта / В. А. Хазов и др. // Системы анализа и обработки данных. 2025. № 3 (99). С. 149–159. DOI: <https://doi.org/10.17212/2782-2001-2025-3-149-159>.
5. Ma M., Song Q., Liu H. The effect of personalized orthopedic insoles on plantar pressure during running in subtle cavus foot // Frontiers in bioengineering and biotechnology. 2024. Т. 12. С. 1343001. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1343001>.
6. Shi Q. Q. et al. Effects of contoured insoles with different materials on plantar pressure offloading in diabetic elderly during gait // Scientific reports. 2022. Т. 12, № 1. С. 15395. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19814-0>.
7. Daryabor A. et al. Effect of 3D printed insoles for people with flatfeet: A systematic review // Assistive Technology. 2023. Т. 35, № 2. С. 169–179. DOI: <https://doi.org/10.1080/10400435.2022.2105438>.
8. Hudak Y. F. et al. A novel workflow to fabricate a patient-specific 3D printed accommodative foot orthosis with personalized latticed metamaterial // Medical engineering & physics. 2022. Т. 104, № 1. С. 103802. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2022.103802>.
9. Koprivnik M., A. Marquette C., Courtial E. J. Affordable 3D printing methodology for the fabrication of orthotic insoles aimed at reducing plantar pressure for diabetic patients // Rapid Prototyping Journal. 2025. Т. 31, №. 4. С. 872–882. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2024-0240>.
10. Михайлишин В. В., Смирнова Л. М., Хазов В. А. Детекция ключевых точек электронных плантограмм средствами искусственного интеллекта // Биомедицинская радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 3. С. 42–47. doi.org/10.18127/j15604136-202503-05. EDN ZXRKQS.
11. Иоффе Р. Я., Смирнова Л. М., Белянин О. Л. Комплексная оценка состояния стопы на системе «Скан» // Вестник всероссийской гильдии протезистов-ортопедов. 2004. № 2. С. 36–40.
12. Прогнозирование высоты продольного свода стопы на основе плантографических показателей средствами искусственного интеллекта / В. А. Хазов и др. // Системы анализа и обработки данных. 2025. № 3 (99). С. 149–159.
13. Скрининг функциональных нарушений стоп с помощью плантографии и подометрии / И. В. Веденина, Е. А. Ткачук, Л. М. Смирнова и др. // Медицинская техника. 2014. № 2. С. 21.
14. Pita-Fernández S. et al. Validity of footprint analysis to determine flatfoot using clinical diagnosis as the gold standard in a random sample aged 40 years and older // Journal of epidemiology. 2015. Т. 25, №. 2. С. 148–154.
15. Михайлишин В. В., Смирнова Л. М., Черкашин С. О. Цифровая обработка электронных плантограмм с применением технологий искусственного интеллекта как этап автоматизации плантографических исследований // Цифровая обработка сигналов. 2024. № 3. С. 19–24. EDN IDROCH.
16. Ponomarenko G. N., Smirnova L. M., Yuldashev Z. M. Digital transformation of prosthetics and orthotics // Biomedical Engineering. 2024. Т. 57, № 5. С. 305-310. doi.org/10.1007/s10527-023-10321-8.
17. Castiglioni I. et al. AI applications to medical images: From machine learning to deep learning // Physica medica. 2021. Т. 83. С. 9-24.
18. Rajpurkar P., Lungren M. P. The current and future state of AI interpretation of medical images // New England Journal of Medicine. 2023. Т. 388, № 21. С. 1981-1990.
19. Gibson I. et al. Additive manufacturing technologies. Cham, Switzerland: Springer, 2021. Т. 17. С. 160-186.
20. Ngo T. D. et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges // Composites Part B: Engineering. 2018. Т. 143. С. 172-196.

References

1. Mikhailishin V.V., Smirnova L.M., Cherkashin S.O. [Digital processing of electronic plantograms using artificial intelligence technologies as a stage of automation of plantographic research]. Tsifrovaya obrabotka signalov. 2024. No. 3. P. 19 (in Russ.).
2. Chen H. Y. et al. The effect of individual full-contact insoles made of polyester fabric sheets on plantar pressure and gait during hallux valgus deformity // Bioengineering. 2025. Vol. 12, no. 2. P. 103. DOI: <https://doi.org/10.3390/bioengineering12020103>.
3. Liao H. R., Yu. K.K., Li S. J. A deep learning-based system for measuring plantar pressure for accurate assessment of the foot arch index // Applied Sciences. 2025. Vol. 15, no. 18. P. 10156. DOI: <https://doi.org/10.3390/app151810156>.
4. Khazov V.A., et al. [Prediction of the height of the longitudinal arch of the foot based on plantographic indicators using artificial intelligence tools]. Sistemy analiza i obrabotki dannykh. 2025. No. 3. Pp. 149-159 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17212/2782-2001-2025-3-149-159>.
5. M. Ma, K. Song, H. Liu. The effect of individual orthopedic insoles on plantar pressure during running in the thin hollow area of the foot // Frontiers of bioengineering and Biotechnology. 2024. Vol. 12. P. 1343001. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1343001>.
6. Shi K. K. and others. The effect of contoured insoles made of various materials on relieving plantar pressure when walking in elderly people with diabetes mellitus // Scientific reports. 2022. Vol. 12. No. 1. P. 15395. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19814-0>.
7. Daryabor A. et al. The impact of 3D-printed insoles on people with flat feet: a systematic review // Assistive technologies. 2023. Vol. 35. No. 2. Pp. 169-179. DOI: <https://doi.org/10.1080/10400435.2022.2105438>.
8. Khudak Yu. F. and others. A new technological process for manufacturing a 3D-printed accommodative foot orthosis for a specific patient from a personalized lattice metamaterial // Medical engineering and physics. 2022. Vol. 104. No. 1. P.

103802. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2022.103802>.

9. Koprivnik M., Marquette A., Courtial E. An affordable 3D printing technique for manufacturing orthopedic insoles aimed at reducing plantar pressure in patients with diabetes mellitus // *Journal of Rapid Prototyping*. 2025. Vol. 31. No. 4. Pp. 872-882. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2024-0240>.

10. Mikhailishin V.V., Smirnova L.M., Khazov V.A. [Detection of key points of electronic plantograms using artificial intelligence tools]. *Biomeditsinskaya radioelektronika*. 2025. Vol. 28, No. 3. Pp. 42-47. DOI: 10.18127/j15604136-202503-05. EDN: ZXRKQS (in Russ.).

11. Ioffe R.Ya., Smirnova L.M., Belyanin O.L. [Comprehensive assessment of the foot condition on the "Scan" system]. *Vestnik vserossiyskoy gildii protezistov-ortopedov*. 2004. No. 2. Pp. 36-40 (in Russ.).

12. Khazov V.A., et al. [Prediction of the height of the longitudinal arch of the foot based on plantographic indicators using artificial intelligence tools]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh*. 2025. No. 3 (99). Pp. 149-159 (in Russ.).

13. Vedenina I.V., Tkachuk E.A., Smirnova L.M., et al. [Screening of functional disorders of the feet using plantography and podometry]. *Meditsinskaya tekhnika*. 2014. No. 2. P. 21 (in Russ.).

14. Pita-Fernandez S. et al. The reliability of the analysis of foot prints for the determination of flat feet using clinical

diagnosis as the gold standard in a random sample aged 40 years and older // *Journal of Epidemiology*. 2015. Vol. 25. No. 2. Pp. 148-154.

15. Mikhailishin V.V., Smirnova L.M., Cherkashin S.O. [Digital processing of electronic plantograms using artificial intelligence technologies as a stage of automation of plantographic research]. *Tsifrovaya obrabotka signalov*. 2024. No. 3. Pp. 19-24. EDN: IDROCH (in Russ.).

16. Ponomarenko G. N., Smirnova L. M., Yuldashev Z. M. Digital transformation of prosthetics and orthopedic technology // *Biomedical engineering*. 2024. Vol. 57. No. 5. Pp. 305-310. doi.org/10.1007/s10527-023-10321-8.

17. Castiglioni I. et al. The application of artificial intelligence to medical images: from machine learning to deep learning // *Physica medica*. 2021. Vol. 83. Pp. 9-24.

18. Rajpurkar P., Lungren M. P. The current and future state of AI interpretation of medical images // *New England Medical Journal*. 2023. Vol. 388. No. 21. Pp. 1981-1990.

19. Gibson I. et al. Additive manufacturing technologies. Cham, Switzerland: Springer, 2021. Vol. 17. Pp. 160-186. 20. Ngo, etc., etc. Additive manufacturing (3D printing): an overview of materials, methods, applications and problems // *Composites, part B: Engineering*. 2018. Vol. 143. Pp. 172-196.

20. Ngo, etc., etc. Additive manufacturing (3D printing): an overview of materials, methods, applications and problems // *Composites, part B: Engineering*. 2018. Vol. 143. Pp. 172-196.

Personalized Synthesis Technology of Custom Orthopaedic Insoles Based on Plantograms

V. V. Mikhailishin, PhD in Medicine, Federal Scientific and Educational Centre of Medial and Social Expertise and Rehabilitation named after G.A. Albreht, Saint-Petersburg, Russia

S. G. Amelkin, Krasnoyarsk, Russia

L. M. Smirnova, DSc in Engineering, Associate Professor, Federal Scientific and Educational Centre of Medial and Social Expertise and Rehabilitation named after G.A. Albreht; St. Petersburg State Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russian Federation

M. V. Panteleev, Federal Scientific and Educational Centre of Medial and Social Expertise and Rehabilitation named after G.A. Albreht, Saint-Petersburg, Russia

G. N. Ponomarenko, DSc in Medicine, Federal Scientific and Educational Centre of Medial and Social Expertise and Rehabilitation named after G.A. Albreht; North-Western State Medical University named after I. I. Mechnikov, Saint-Petersburg, Russia

K. K. Shcherbina, DSc in Medicine, Associate Professor, Federal Scientific and Educational Centre of Medial and Social Expertise and Rehabilitation named after G.A. Albreht, Saint-Petersburg, Russia

The article presents the technology of computer-aided design of individual orthopaedic insoles based on an electronic plantogram. The purpose of the work was to develop a sequence for converting the results of a plantographic study into the parameters of a three-dimensional product model prepared for additive manufacturing. The initial data were electronic images of the feet plantar surface, regulatory legal acts and manufacturing standards for the removable corrective elements for orthopaedic shoes. The technology includes image acquisition and unification, classification of the right and left foot, automated marking of anatomical landmarks using artificial intelligence, calculation of plantographic and podometric indicators, prediction of the longitudinal arch height and result verification by the operator. After confirming the initial parameters, parametric CAD modeling of the frame is performed. The product geometry is determined by the foot length, the longitudinal arch height, the frame thickness and the position of anatomical landmarks. The metrological service station is calculated by passing heads II and III flat together at the site for 7 mm. A separate shock-absorbing insert and a corresponding seat are formed for the rear section. The frame outer shape is consistent with the metric system for determining shoe sizes according to GOST R 58149-2018. The developed technology consists of nine interrelated stages and ends with making separate STL frame models metatarsal bandage and calcaneal absorber. The separation of models allows the use of materials with various mechanical properties, including PA12 for the frame and TPU for soft components. The proposed sequence combines plantographic research data, automated marking and calculation of indicators, digital design and manufacture of individual orthopaedic products.

Keywords: electronic plantogram, orthopaedic insole, CAD modeling, artificial intelligence, additive manufacturing

Получено: 03.08.26

Образец цитирования

Технология автоматизированного проектирования индивидуальных ортопедических стелек на основе плантограммы / В. В. Михайлишин, С. Г. Амелкин, Л. М. Смирнова, М. В. Пантелеев, Г. Н. Пономаренко, К. К. Щербина // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2026. Т. 24, № 3. С. 17–22. DOI: 10.22213/2410-9304-2026-3-17-22.

For Citation

Mikhailishin V.V., Amelkin S.G., Smirnova L.M., Panteleev M.V., Ponomarenko G.N., Shcherbina K.K. [Technology of computer-aided design of individual orthopedic insoles based on plantogram]. *Intellektualnye sistemy v proizvodstve*. 2026. Vol. 24, No. 3. Pp. 17-22 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2026-3-17-22.