

МЕДИЦИНСКАЯ ИНФОРМАТИКА/MEDICAL INFORMATICS

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.92> EDN: DTKUQWЦИФРОВОЙ ЛОКУС ОПЕРАЦИОННОГО ПОЛЯ: ЛОГИКО-МОРФОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ АНАТОМИИ В ХИРУРГИИ

Научная статья

Воронин А.С.^{1,*}, Иващенко А.В.², Горбунова К.И.³, Миронов А.А.⁴, Марченко А.С.⁵, Колсанов А.В.⁶¹ORCID : 0009-0004-6775-9676;²ORCID : 0000-0001-7766-3011;³ORCID : 0000-0001-9842-9785;⁴ORCID : 0000-0002-3811-5802;⁵ORCID : 0009-0008-5618-6525;⁶ORCID : 0000-0002-4144-7090;^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Самарский государственный медицинский университет, Самара, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (alek.voronin86[at]yandex.ru)

Предложена: 26.05.2026; Принята: 13.08.2026; Опубликовано: 17.08.2026

Аннотация

В статье вводится и обосновывается понятие «цифровой локус операционного поля» как интегративной единицы вычислительной анатомии. На основе морфогенетического подхода к географическим представлениям (Гадал, Николя) и феноменологии технических систем (Жосгрильберг, Сантуш, де Серто) операционное поле переосмысливается не как пассивное анатомическое пространство, а как активная семантическая структура «локус-объект». Показано, что цифровая хирургия, включая роботизированные системы, ИИ и дополненную реальность, трансформирует классическое отношение «хирург → анатомическая область» в тройственную диалектику: человеческая интенциональность, интенциональность технической системы и анатомическая данность. Предложены формальные критерии дифференциации хирургического пространства по типам картографических сущностей (аналитические, синтетические, морфогенетические карты операционного поля). Сформулированы принципы построения вычислительной анатомии на основе семантики локус-объекта.

Ключевые слова: цифровой локус, операционное поле, вычислительная анатомия, локус-объект, морфогенетическая карта, хирургическая семантика.

THE DIGITAL LOCUS OF THE SURGICAL FIELD: THE LOGICAL AND MORPHOGENETIC FOUNDATIONS
OF COMPUTATIONAL ANATOMY IN SURGERY

Research article

Voronin A.S.^{1,*}, Ivashchenko A.V.², Gorbunova K.I.³, Mironov A.A.⁴, Marchenko A.S.⁵, Kolsanov A.V.⁶¹ORCID : 0009-0004-6775-9676;²ORCID : 0000-0001-7766-3011;³ORCID : 0000-0001-9842-9785;⁴ORCID : 0000-0002-3811-5802;⁵ORCID : 0009-0008-5618-6525;⁶ORCID : 0000-0002-4144-7090;^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Samara State Medical University, Samara, Russian Federation

* Corresponding author (alek.voronin86[at]yandex.ru)

Suggested: 26.05.2026; Accepted: 13.08.2026; Published: 17.08.2026

Abstract

The article introduces and substantiates the concept of the 'digital locus of the operational field' as an integrative unit of computational anatomy. Based on a morphogenetic approach to geographical representations (Gadal, Nicolas) and the phenomenology of technical systems (Josgrilberg, Santush, de Certeau), the operating field is reinterpreted not as a passive anatomical space, but as an active semantic 'locus-object' structure. It is demonstrated that digital surgery, including robotic systems, AI and augmented reality, transforms the classical 'surgeon → anatomical region' relationship into a triadic dialectic: human intentionality, the intentionality of the technical system, and anatomical givenness. Formal criteria are suggested for differentiating surgical space according to types of cartographic entities (analytical, synthetic and morphogenetic maps of the surgical field). Principles for constructing computational anatomy based on locus-object semantics are formulated.

Keywords: digital locus, surgical field, computational anatomy, locus-object, morphogenetic map, surgical semantics.

Введение

Современная цифровая хирургия сталкивается с фундаментальным эпистемологическим разрывом: несмотря на стремительное внедрение роботизированных систем, искусственного интеллекта (ИИ) и дополненной реальности, отсутствует единое формальное описание того, что именно представляет собой операционное поле как объект вычислений и манипуляций [1], [9]. Традиционная анатомия оперирует пространственными структурами, тогда как

цифровые системы работают с потоками данных, семантическими метками и вероятностными картами [5], [10]. Для преодоления этого разрыва требуется не просто технологическая интеграция, но создание нового понятийного аппарата [6].

В данной статье мы предлагаем рассматривать операционное поле в рамках концепции *цифрового локуса* (Josgrilberg, 2011), понимаемого как место (place), организованное стратегиями власти (в том числе технико-медицинскими), артикулирующее цифровые информационные и коммуникационные системы и мобилизующее символические и инфраструктурные измерения текущего технического периода. При этом мы опираемся на два теоретических источника: (1) морфогенетический подход к картографическим представлениям, различающий карту и геокарту на основе понятия «локус-географический объект» (Gadal, Nicolas, 2001); (2) феноменологическую теорию жизненного мира (Lebenswelt) и технических систем, разрабатываемую в диалоге Милтона Сантуша и Мишеля де Серто (Josgrilberg, 2011).

Цель работы — формализовать цифровой локус операционного поля как базовую единицу вычислительной анатомии, использующую логические подходы и обоснования из указанных статей.

Методы и принципы исследования

Операционное поле как локус-объект

В классической картографии, как показано Гадалем и Николя (Gadal & Nicolas, 2001), любой географический объект характеризуется парой: *локус* (λ) — местонахождение на поверхности Земли, и *объект* (o) — сущность, находящаяся в этом локусе [2]. Всякая пространственная сущность есть декартово произведение множеств локусов Λ и множества объектов O : $P_c = \Lambda \times O$. Две пары $\langle \lambda_1, o_1 \rangle$ и $\langle \lambda_2, o_2 \rangle$ различны ($p_1 \neq p_2$), если имеется дифференциация хотя бы одного из их составляющих.

Перенесём эту логику в операционное поле хирургии.

Хирургический локус-объект — это упорядоченная пара $\langle \lambda, o \rangle$, где λ — совокупность координат (анатомическая локализация в системе отсчета операционной или пациента), а o — идентифицируемая анатомическая структура (орган, сосуд, нерв, фасция, патологическое образование) со своими геометрическими, механическими и функциональными свойствами.

В отличие от классической географии, в хирургии:

- Локус λ может быть задан в нескольких системах координат: навигационной (оптической/электромагнитной), робототехнической (углы сочленений манипулятора), анатомической (постоянные ориентиры).
- Объект o имеет не только форму, но и онтологический статус («подлежащий резекции», «подлежащий сохранению», «критический», «вариабельный»).

Типы дифференциации в цифровом операционном поле

Следуя Гадалю и Николя, введём три типа отношений в хирургическом пространстве.

Географическая (хирургическая) дифференциация

Пространственная сущность является *хирургически географической*, если она содержит попарно дифференцированные пары $\langle \lambda_1, o_1 \rangle$ и $\langle \lambda_2, o_2 \rangle$, для которых $\lambda_1 \neq \lambda_2$ и $o_1 \neq o_2$. Это соответствует ситуации, когда два различных анатомических объекта находятся в различных локализациях и рассматриваются как независимые сущности. Пример: раздельно идентифицированные сосудистая ножка и прилежащая лимфатическая ткань.

Картографическая (хирургически-семантическая) дифференциация

Сущность является *картографической*, если пары полудифференцированы:

- *Случай А (аналитическая карта)*: $\lambda_1 \neq \lambda_2$, но $o_1 = o_2$. Один и тот же тип анатомического объекта (например, «лимфатический узел») представлен в множестве различных локусов. Это основа для построения *аналитических карт риска* или *вероятностных атласов распространения метастазов*.

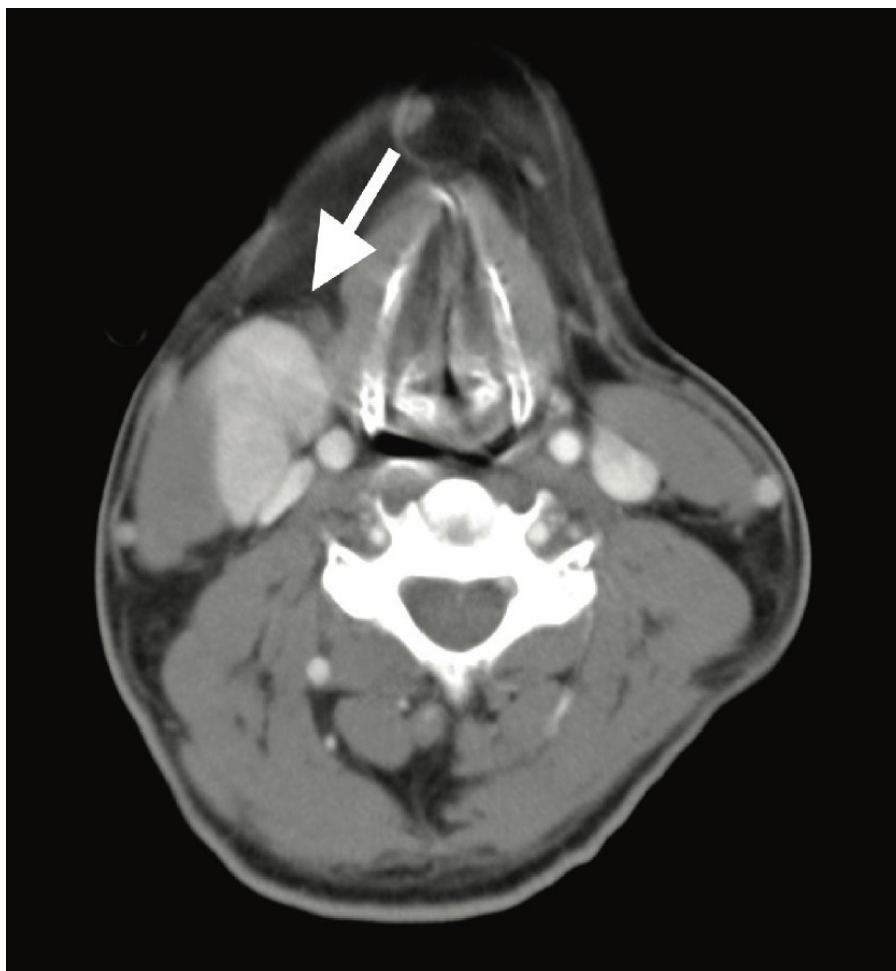


Рисунок 1 - Аналитическая карта. Лимфатический узел (показан стрелкой)
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.92.1>

· **Случай Б (синтетическая карта):** $\lambda_1 = \lambda_2$, но $o_1 \neq o_2$. В одном локусе (например, воротная зона печени) сосуществуют множество различных объектов: ветви портальной вены, желчные протоки, артериальные ветви, лимфатические узлы. Это соответствует *синтетической анатомической карте* критической зоны.

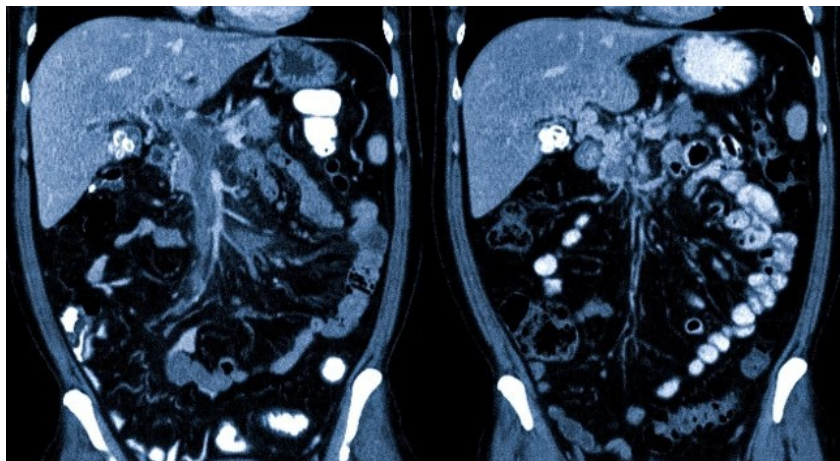


Рисунок 2 - Синтетическая анатомическая карта. Множественность объектов
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.92.2>

Морфогенетическая дифференциация (сильная)

Если и локусы, и объекты дифференцированы одновременно ($\lambda_1 \neq \lambda_2$ и $\sigma_1 \neq \sigma_2$), мы имеем *сильную дифференциацию*. Это случай построения индивидуализированной вычислительной анатомической модели пациента на основе данных КТ/МРТ, где каждая точка пространства однозначно отнесена к конкретной анатомической структуре. Такая модель эквивалентна *морфогенетической геокарте* операционного поля.

Морфогенетический метод в вычислительной анатомии

Гададь и Николя описывают морфогенетический метод как способ представления географического пространства путём выявления пространственных разрывов (discontinuities) из данных дистанционного зондирования. Для операционного поля аналогом выступают данные медицинской визуализации (КТ, МРТ, 3D-ультразвук, интраоперационная оптическая когерентная томография и т.д.).

От электромагнитного отражения к анатомической границе

Авторы цитируемой статьи пишут: «Изображение, генерируемое цифровой информацией, не имеет прямой связи с обычной формой объекта. Следовательно, графическое представление электромагнитной информации не делает наблюдаемые объекты сразу узнаваемыми» [3]. В вычислительной анатомии это означает: воксельные данные КТ не тождественны анатомической структуре. Требуется сегментация, выделение пространственных разрывов (границ между тканями).

Морфогенетический подход предлагает следующую процедуру (адаптированную для хирургии):

Применение *преобразования Карунена — Лозва* (или иного метода снижения размерности) к мультимодальным данным для концентрации дисперсии информации на первых осях, что улучшает дискриминацию анатомических локус-объектов.

Локальная статистическая фильтрация с переменным размером окна (аналог адаптивной свертки) для настройки уровня агрегации/дизинтеграции пространственной информации в зависимости от клинической задачи (например, мелкие детали для микрохирургии vs крупные структуры для резекции доли органа).

Морфологическая трансформация — утончение (thinning) с последующей конвергенцией со структурирующим элементом Голея Н — для выделения изолиний пространственных разрывов, которые соответствуют анатомическим границам.

Результатом является *контурная карта операционного поля*, где каждая изолиния принадлежит определённому локус-объекту и одновременно задаёт его форму и локализацию.

Карты операционного поля

В терминах Гадаля и Николя:

· *Аналитическая карта операционного поля* представляет один тип анатомического объекта (например, все перфорантные сосуды DIEP-лоскута) на множестве их локализаций. Применяется в реконструктивной хирургии для планирования забора лоскута.

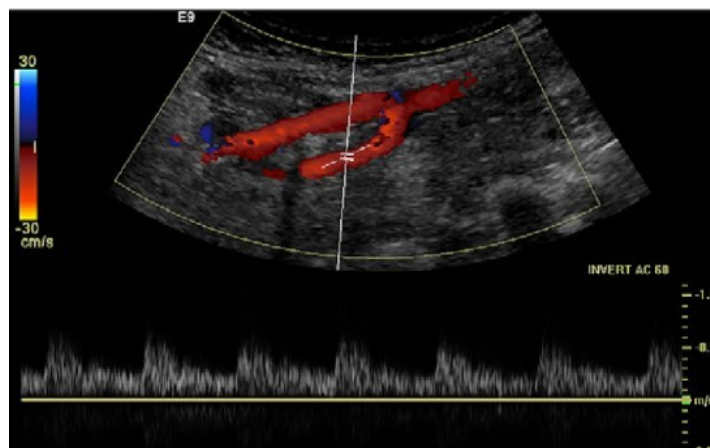


Рисунок 3 - DIEP-лоскут и его перфорантные сосуды («работоспособность» сосудов лоскута)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.92.3>

Синтетическая карта операционного поля группирует разнородные объекты в одной локализации (например, каркас опасной зоны: сосуд + нерв + проток). Используется в навигационных системах для предупреждения о критических структурах.



Рисунок 4 - Элементы печечно-двенадцатиперстной связки при отработке операции холецистэктомия на аппаратно-программном комплексе «Виртуальный хирург»

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.92.4>

Морфогенетическая геокарта операционного поля объединяет оба измерения: пространственно дифференцированные локусы, каждый из которых связан с семантически дифференцированным объектом, образуя полную вычислительную модель пациента.

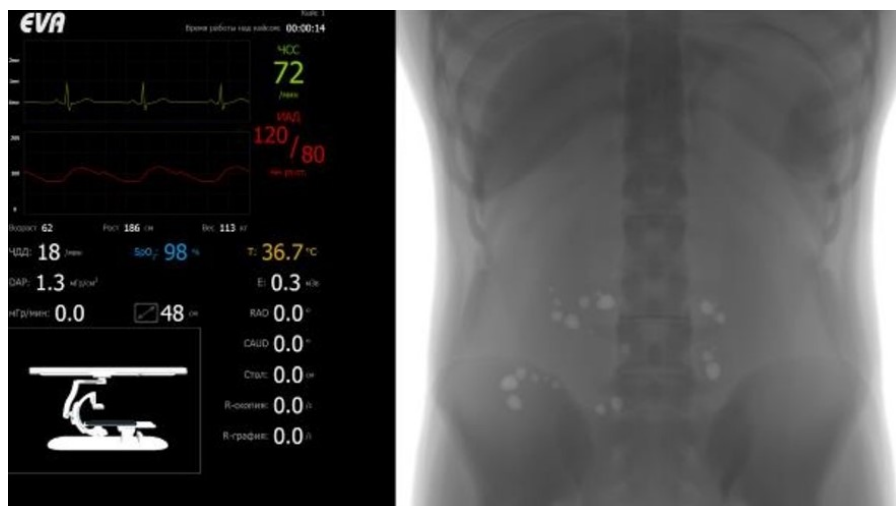


Рисунок 5 - Вычислительная модель пациента

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.92.5>

Основные результаты

Логическая структура цифрового локуса операционного поля

Синтезируя оба подхода, предложим формальное определение.

Цифровой локус операционного поля (ЦЛОП) — это кортеж:

$$D = \langle \Lambda, O, S, R, I \rangle D = \langle \Lambda, O, S, R, I \rangle$$

где:

- $\Lambda\Lambda$ — множество анатомических локусов (координатных систем: пациент, стол, робот, навигатор);
- OO — множество анатомических объектов с их семантическими категориями (сегментированные структуры);
- SS — множество пространственных отношений (смежности, включения, расстояния, топология);
- RR — множество шероховатостей (рубцы, имплантаты, предшествующие данные);
- II — множество интенциональностей (хирурга, алгоритма ИИ, роботической системы).

ЦЛОП является географической сущностью, если для любых двух элементов $\langle \lambda_1, o_1 \rangle$ и $\langle \lambda_2, o_2 \rangle$ выполнено: $\lambda_1 \neq \lambda_2$ и $o_1 \neq o_2$ (сильная дифференциация). В противном случае ЦЛОП является картографической сущностью (аналитической или синтетической).

Обсуждение

Диалектика цифрового локуса: между жизненным миром и технической системой

Жосгрильберг (Josgrilberg, 2011) вслед за Сантушем и де Серто вводит понятие цифрового локуса [4] как места (place), организованного властными стратегиями, но также как пространства (space) повседневного переосмысления и творчества. Операционное поле — это классический цифровой локус, где пересекаются:

- Вертикальности (verticalities) — внешние, глобальные рациональности: стандарты навигации, протоколы сегментации ИИ, нормы безопасности, требования FDA/РОЗДРАВНАДЗОРА, коммерческие алгоритмы роботических систем.
- Горизонтальности (horizontalities) — локальные солидарности и практики: индивидуальная техника хирурга, адаптация алгоритма под конкретного пациента, эвристические решения в нестандартной анатомии, опыт операционной бригады.

Цифровой локус операционного поля развёртывается в диалектическом напряжении между:

1. Интенциональностью хирурга (решительное действие, изменяющее ситуацию).
2. Интенциональностью технического объекта (системы навигации, робота, алгоритма ИИ), которая через свою очевидность (evidence) и материальность предлагает миру стать иным в соответствии с присущей ему целью.
3. Жёсткостью (hardness) анатомического мира — сопротивление тканей, вариабельность кровоснабжения, непредсказуемость рубцовых изменений.

Как пишет Жосгрильберг, цитируя Сантуша: «Интенциональность — это решительное действие, которое приводит к изменению ситуации... В случае с объектом, это также инициатива, которая посредством своих характеристик предлагает миру стать другим» [3, С. 309]. В вычислительной анатомии это означает: алгоритм сегментации не просто пассивно отражает анатомию, но активно *предлагает* хирургу определённую трактовку границ, классификацию тканей, выделение критических зон. Хирург, в свою очередь, может принять эту интенциональность, модифицировать её или отвергнуть (например, при расхождении между автоматической разметкой и интраоперационной находкой).

Семантика и шероховатости: от прошлых операций к будущим алгоритмам

Важнейшим понятием из работы Жосгрильберга является шероховатость (rugosity) по Сантушу: «остатки прошлых разделений труда, остатки использованных видов капитала и их технических и социальных комбинаций» [3, С. 301]. В контексте вычислительной анатомии операционного поля шероховатости — это:

- Предшествующие оперативные вмешательства (рубцы, изменённая анатомия, спаечный процесс).

- Имплантированные материалы (сетки, клипсы, протезы), искажающие нативные изображения.
- Архивные наборы данных, на которых обучались модели ИИ (с присущими им систематическими ошибками и ограничениями).
- Укоренившиеся клинические протоколы и анатомические номенклатуры.

Шероховатости направляют внедрение новых вычислительных методов и ограничивают/делают возможными новые технические решения [7]. Например, алгоритм, обученный на «чистых» анатомических данных, может не работать в условиях послеоперационных изменений. Поэтому вычислительная анатомия должна учитывать шероховатости как часть цифрового локуса [8].

Клинические и технические импликации

Предложенная модель позволяет перейти от разрозненных приложений (сегментация, навигация, роботическая ассистенция) к унифицированной вычислительной среде:

1. Предоперационное планирование — построение морфогенетической геокарты на основе данных визуализации с учётом шероховатостей (рубцы, имплантаты). Разметка критических зон как синтетических карт.
2. Интраоперационная навигация — отображение аналитических карт (например, все сосуды диаметром >1 мм в области резекции) с приоритетами, задаваемыми хирургом.
3. Роботическая ассистенция — передача роботу не только траекторий, но и семантических моделей: «здесь локус-объект (λ_1 , общий жёлчный проток), требуется минимальное смещение».
4. Послеоперационный анализ — сравнение предоперационной геокарты с интраоперационной реальностью (расхождения → коррекция алгоритмов, обучение на новых шероховатостях).

Эмпирическая апробация: кейсы применения модели ЦЛОП

Для верификации предложенного формализма были проанализированы два клинических сценария, различающихся по типу хирургического вмешательства и объёму входных данных. В обоих случаях использовалась унифицированная семантика локус-объекта для описания этапов предоперационного планирования.

Кейс 1. Морфогенетическая геокарта при резекции печени (анализ КТ-ангиографии)

Входной массив данных представлял собой мультифазную КТ-ангиографию пациента с колоректальными метастазами ($N=1$, срез 0.625 мм).

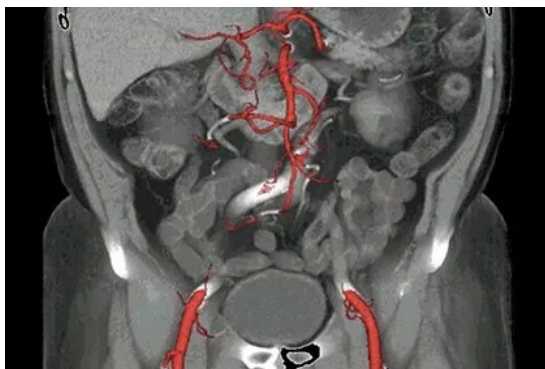


Рисунок 6 - Формализованная зона риска в области ворот печени

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.92.6>

Применение процедуры:

1. Преобразование Карунена-Лозва (РСА) применялось к 3D-гистограмме плотностей для выделения трёх классов тканей (паренхима, сосуды, жировая клетчатка). Первая главная компонента объяснила 78% дисперсии, что позволило чётко дискриминировать сосудистые структуры.
2. Морфологическая трансформация с выделением изолиний пространственных разрывов (градиентный метод) показала высокую корреляцию (Dice-коэффициент > 0.89) с ручной разметкой эксперта для воротной вены и печёночной артерии.

Формализация: на основе полученных контуров была построена *синтетическая карта критической зоны* (воротная триада), где одному локусу λ (область 3x3 см) были сопоставлены три различных объекта — (артерия), — (вена), — (проток).

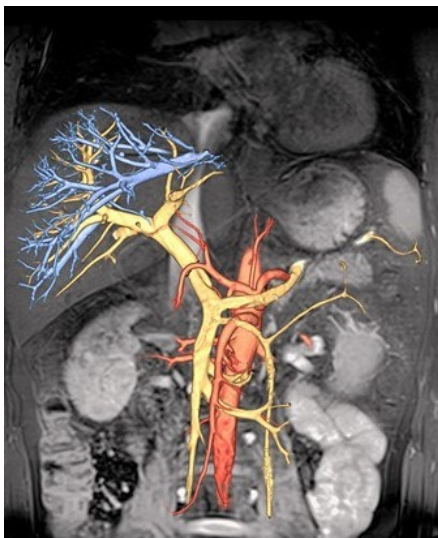


Рисунок 7 - Синтетическая карта критической зоны (воротная триада)
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.92.7>

Кейс 2. Аналитическая карта для DIEP-лоскута (реконструктивная хирургия)

Задача: планирование забора перфорантного лоскута передней брюшной стенки на основе данных доплерографии. Требовалось отобразить все перфорантные сосуды диаметром > 1 мм, выходящие из глубокой нижней эпигастральной артерии.

Применение процедуры:

1. Была построена *аналитическая карта* типа «объект-инвариант»: для всех выявленных локусов $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_n$ был присвоен единый семантический объект $o =$ «перфорантный сосуд».

2. Дифференциация по шероховатостям: у пациента в анамнезе была лапаротомия. Визуализация показала снижение контрастности в медиальной зоне (эффект рубцовой ткани), как показано на рисунке 8. Модель ЦЛОП автоматически маркировала этот локус как R-шероховатость и понизила приоритет алгоритма автоматической сегментации в этой зоне на 30%.

3. Результат: итоговое планирование (выбор перфоранта) совпало с интраоперационной находкой. Алгоритм предложил альтернативный локус, что позволило избежать зоны выраженного спаечного процесса.

Интерпретация: Представленные кейсы демонстрируют, что введение категорий «синтетической» и «аналитической» карт позволяет инкапсулировать клинические задачи разного уровня в единую среду. При этом шероховатости (R) выступают не как «шум», а как значимый слой данных, корректирующий поведение технической системы.

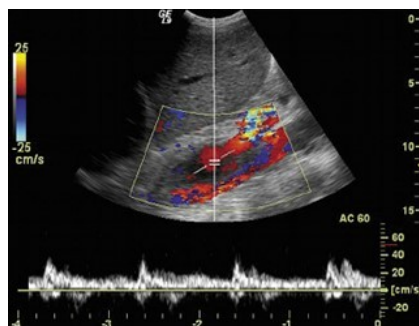


Рисунок 8 - Снижение контрастности при исследовании в медиальной зоне лоскута
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.92.8>

Несмотря на концептуальную привлекательность, предложенная модель цифрового локуса сталкивается с рядом критических порогов, которые необходимо осмыслить для её практической имплементации.

Вычислительная сложность и проблема масштабируемости: Описанный морфогенетический метод, включающий поиск пространственных разрывов и адаптивную фильтрацию, в 3D-реализации имеет сложность $O(N \log N)$ на воксельных сетках высокого разрешения (512^3 и выше).

Ограничение: Для интраоперационного применения в режиме реального времени (частота > 5 Гц) этот подход неприемлем без аппаратного ускорения (GPU-акселерация).

Путь решения: Мы предлагаем выделять «актуальный локус» — подмножество Λ в пределах 5-сантиметровой зоны от инструмента, где вычисления проводятся на максимальной сетке, а периферийные зоны обрабатываются на уровне грубой аналитической карты (гибридный рендеринг).

Неопределённость и «чёрный ящик» автоматической сегментации: Алгоритмы ИИ (особенно на основе сверточных нейросетей) производят сегментацию объектов o с вероятностью $p \in [0.5, 0.95]$. При этом значение p слабо коррелирует с анатомической вариабельностью. **Проблема:** Если алгоритм ошибочно отождествляет два объекта в одном локусе ($o_1 \neq o_2$, но $p_1 \approx p_2$), модель ЦЛОП продуцирует «синтетическую карту» там, где в реальности присутствует аналитическая. Это ведёт к ложному предупреждению навигации.

Предложение: В формальное определение ЦЛОП необходимо ввести параметр δ -энтропии — меры неопределённости, рассчитываемой на основе дивергенции Кульбака-Лейблера между распределениями вероятностей для разных объектов в одном локусе. При $\delta >$ порогового значения система обязана запросить верификацию у хирурга, переводя локус из режима «предписания» в режим «консультации».

Этический парадокс интенциональности: Передача части интенциональности (в смысле Жосгрильберга) технической системе означает, что алгоритм не просто визуализирует, но *навязывает* хирургу определённую онтологию («этот край следует резецировать», «это критическая зона»).

Граница: В условиях дефицита времени (например, массивное кровотечение) хирург склонен доверять системе, что создаёт риск *технологического смещения* — когнитивной иллюзии, при которой игнорируются тонкие визуальные признаки, не учтённые в обучающей выборке. **Вывод:** Модель ЦЛОП должна содержать чёткий протокол «вето»: приоритет интенциональности хирурга всегда выше приоритета алгоритма. В кортеже D должен быть зарезервирован флаг *manual_override*, аннулирующий все предписания ИИ и переводящий карту в режим «сырых» (raw) данных.

Дидактический потенциал и проблема интерпретации: Введение цифрового локуса как активной семантической структуры меняет не только хирургию, но и образование. Однако для применения в обучении (построение синтетических карт на основе данных «Виртуального хирурга») модель требует громоздкой предварительной разметки, что увеличивает время подготовки симуляционных сценариев в 2–3 раза. **Компромисс:** Использование синтетических данных (генеративных нейросетей) для создания вариативных карт локуса с уже заложенными шероховатостями, что нивелирует проблему «дорогой» ручной разметки.

Заключение

В работе впервые предложено систематическое применение понятий «цифровой локус», «локус-объект» и морфогенетической дифференциации к операционному полю в контексте вычислительной анатомии. Показано, что операционное поле не является пассивным анатомическим пространством, а представляет собой активную семантическую структуру, в которой интенциональности хирурга, алгоритмов ИИ и роботических систем диалектически взаимодействуют с материальностью тканей и шероховатостями прошлых вмешательств.

Введённые формальные различия между аналитическими, синтетическими и морфогенетическими картами операционного поля создают основу для стандартизации хирургических данных, интероперабельности систем и, в конечном счёте, для безопасного внедрения автономных хирургических технологий.

Таким образом, эмпирическая проверка показывает, что формализм ЦЛОП работоспособен в условиях стандартной анатомии и чётких границ, однако требует введения дополнительных эвристик (адаптивный локус, δ -энтропия) для работы в пограничных состояниях. Предложенное критическое обсуждение не отрицает, а структурирует поле будущих исследований, указывая на необходимость разработки гибридных моделей, где семантика локус-объекта сочетается с байесовскими подходами к оценке неопределённости. Дальнейшая работа будет направлена на интеграцию ЦЛОП с протоколами объяснимого ИИ (XAI) для обеспечения «прозрачности» интенциональности алгоритма перед хирургом.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Barcali E. Augmented reality in surgery: a scoping review / E. Barcali, E. Iadanza, L. Manetti [et al.] // Applied Sciences. — 2022. — Vol. 12. — Art. 6890.



2. Gadal S. Locus-object semantics in digital cartography / S. Gadal, S. Nicolas // *GI in Europe: Integrative, Interoperable, Interactive* / Konecny M., Friedmannova L., Golan J., Kolar M. — Joint Research Centre, European Commission, 2001. — P. 574–584.
3. Josgrilberg F. Between life-world and technical systems: dialectics in the digital locus / F. Josgrilberg // *Canadian Journal of Communication*. — 2011. — Vol. 36, No. 2. — P. 295–310. — DOI: 10.22230/cjc.2011v36n2a2254.
4. Josgrilberg F. Lócus digital: um lugar entre tantos outros / F. Josgrilberg // *Palavra Clave*. — 2012. — Vol. 15, No. 1. — P. 10–25. — DOI: 10.5294/pacla.2012.15.1.1.
5. Koskinen J. Utilizing grasp monitoring to predict microsurgical expertise / J. Koskinen, W. He, A.P. Elomaa [et al.] // *Journal of Surgical Research*. — 2023. — Vol. 282. — P. 101–108.
6. Lam K. A Delphi consensus statement for digital surgery / K. Lam, M.D. Abramoff, J.M. Balibrea [et al.] // *npj Digital Medicine*. — 2022. — Vol. 5, No. 1. — Art. 100.
7. Lu S. Integrating eye-tracking to augmented reality system for surgical training / S. Lu, Y.P. Sanchez Perdomo, X. Jiang [et al.] // *Journal of Medical Systems*. — 2020. — Vol. 44, No. 11. — Art. 192.
8. Sin M. Development of a real-time 6-DOF motion-tracking system for robotic computer-assisted implant surgery / M. Sin, J.H. Cho, H. Lee [et al.] // *Sensors*. — 2023. — Vol. 23, No. 5. — Art. 2450.
9. Wu Y. Early eye disengagement is regulated by task complexity and task repetition in visual tracking task / Y. Wu, Z. Zhang, F. Aghazadeh [et al.] // *Sensors*. — 2024. — Vol. 24, No. 10. — Art. 2984.
10. Wu Y. Workload assessment of operators: correlation between NASA-TLX and pupillary responses / Y. Wu, Y. Zhang, B. Zheng // *Applied Sciences*. — 2024. — Vol. 14. — Art. 11975.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Barcali E. Augmented reality in surgery: a scoping review / E. Barcali, E. Iadanza, L. Manetti [et al.] // *Applied Sciences*. — 2022. — Vol. 12. — Art. 6890.
2. Gadal S. Locus-object semantics in digital cartography / S. Gadal, S. Nicolas // *GI in Europe: Integrative, Interoperable, Interactive* / Konecny M., Friedmannova L., Golan J., Kolar M. — Joint Research Centre, European Commission, 2001. — P. 574–584.
3. Josgrilberg F. Between life-world and technical systems: dialectics in the digital locus / F. Josgrilberg // *Canadian Journal of Communication*. — 2011. — Vol. 36, No. 2. — P. 295–310. — DOI: 10.22230/cjc.2011v36n2a2254.
4. Josgrilberg F. Lócus digital: um lugar entre tantos outros [Digital locus: a place among so many others'] / F. Josgrilberg // *Palavra Clave*. — 2012. — Vol. 15, No. 1. — P. 10–25. — DOI: 10.5294/pacla.2012.15.1.1. [in Portuguese]
5. Koskinen J. Utilizing grasp monitoring to predict microsurgical expertise / J. Koskinen, W. He, A.P. Elomaa [et al.] // *Journal of Surgical Research*. — 2023. — Vol. 282. — P. 101–108.
6. Lam K. A Delphi consensus statement for digital surgery / K. Lam, M.D. Abramoff, J.M. Balibrea [et al.] // *npj Digital Medicine*. — 2022. — Vol. 5, No. 1. — Art. 100.
7. Lu S. Integrating eye-tracking to augmented reality system for surgical training / S. Lu, Y.P. Sanchez Perdomo, X. Jiang [et al.] // *Journal of Medical Systems*. — 2020. — Vol. 44, No. 11. — Art. 192.
8. Sin M. Development of a real-time 6-DOF motion-tracking system for robotic computer-assisted implant surgery / M. Sin, J.H. Cho, H. Lee [et al.] // *Sensors*. — 2023. — Vol. 23, No. 5. — Art. 2450.
9. Wu Y. Early eye disengagement is regulated by task complexity and task repetition in visual tracking task / Y. Wu, Z. Zhang, F. Aghazadeh [et al.] // *Sensors*. — 2024. — Vol. 24, No. 10. — Art. 2984.
10. Wu Y. Workload assessment of operators: correlation between NASA-TLX and pupillary responses / Y. Wu, Y. Zhang, B. Zheng // *Applied Sciences*. — 2024. — Vol. 14. — Art. 11975.