

doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-4-835-843

УДК 004.932

Метод фильтрации контуров трехмерных изображений в задачах геологического моделирования пласта

Павел Александрович Литвинов¹✉, Игорь Александрович Бессмертный²

^{1,2} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ p.litvinov7@gmail.com✉, <https://orcid.org/0009-0009-5246-3713>

² bessmertny@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6711-6399>

Аннотация

Введение. Исследованы методы фильтрации контуров трехмерных объектов в задачах геологического моделирования пласта с целью повышения эффективности анализа ресурсной базы. Решение поставленной задачи достигается путем применения математических аппаратов контурлет-преобразования, диффузии и контурного анализа для фильтрации контуров трехмерных изображений. Предлагаемый метод сочетает в себе преимущества многомасштабности и многонаправленности, учет локальной ориентации структур. **Метод.** Решение задачи фильтрации трехмерных изображений достигается путем комбинации математических методов для анализа трехмерного изображения. Сущность предлагаемого подхода состоит в применении непрореживающего контурлет-преобразования, анизотропной диффузии, управляемой структурным тензором и последующей локализации одновоскельных контуров за счет подавления немаксимумов и двойной пороговой фильтрации по гистерезису. Результатом фильтрации является отфильтрованное трехмерное изображение с толщиной контура в один воксел. **Основные результаты.** Предлагаемый метод показал удовлетворительные результаты работы на тестовых данных. Качество фильтрации контуров позволяет использовать предложенный метод для последующей идентификации контуров в трехмерных объектах. **Обсуждение.** Выполнено сравнение разработанного метода с трехмерными градиентными фильтрами, преобразованием Фурье и дискретным вейвлет-преобразованием. Метод применим в тех задачах, где создаваемая непрореживающим контурлет-преобразованием избыточность не оказывает существенного влияния на конечную цель. Областью развития метода видится учет специфики разных видов исследований, на основании которых создается трехмерная модель.

Ключевые слова

фильтрация контуров трехмерных изображений, непрореживающее контурлет-преобразование (NSCT), анизотропная диффузия, геологическое моделирование

Ссылка для цитирования: Литвинов П.А., Бессмертный И.А. Метод фильтрации контуров трехмерных изображений в задачах геологического моделирования пласта // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2026. Т. 26, № 4. С. 835–843. doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-4-835-843

Method of contours filtering for three-dimensional images in problems of reservoir geological modeling

Pavel A. Litvinov¹✉, Igor A. Bessmertny²

^{1,2} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ p.litvinov7@gmail.com✉, <https://orcid.org/0009-0009-5246-3713>

² bessmertny@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6711-6399>

Abstract

Filtering methods for three-dimensional object contours in reservoir geological modeling problems are investigated to improve the efficiency of resource base analysis. The problem is solved by applying the mathematical methods of the contourlet transform, diffusion, and contour analysis to filtering the contours of three-dimensional images. The proposed method combines the advantages of multi-scale and multi-directionality, taking into account the local orientation

of structures. The problem of three-dimensional images filtering is solved by combining mathematical methods for analyzing three-dimensional images. The essence of the proposed approach consists of using a non-subsampled contourlet transform, anisotropic diffusion controlled by a structural tensor, and subsequent localization of single-voxel contours by suppressing non-maxima and double threshold filtering based on hysteresis. The filtering result is a filtered three-dimensional image with a contour thickness of one voxel. The proposed method showed satisfactory results on test data. The quality of contour filtering allows using the proposed method for subsequent contour identification in three-dimensional objects. The proposed method was compared with three-dimensional gradient filters, the Fourier transform, and the discrete wavelet transform. The method is applicable to problems where the redundancy created by the non-subsampled contourlet transform does not significantly affect the final goal. Further development of the method is seen as taking into account the specifics of the various types of research on the basis of which a three-dimensional model is created.

Keywords

3D image edge filtering, non-subsampled contourlet transform (NSCT), anisotropic diffusion, geological modeling

For citation: Litvinov P.A., Bessmertny I.A. Method of contours filtering for three-dimensional images in problems of reservoir geological modeling. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2026, vol. 26, no. 4, pp. 835–843 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-4-835-843

Введение

Современные разведка и добыча углеводородов сопровождаются работой в цифровых инструментах на каждом этапе жизненного цикла актива. Информационные технологии обеспечивают возможность моделировать физические объекты, обеспечить качественную и количественные оценки их характеристик перед проведением капитальных работ. В ходе проведения геологоразведочных работ и мероприятий по управлению ресурсной базой обращаются к интегрированным моделям, включающим в себя комплекс результатов работ, например: сейсморазведки, магниторазведки, геофизических исследований, результаты разведочного бурения и др. Качество, полнота и типы данных отличаются от модели к модели в зависимости от проведенных исследований. Модель развивается и дополняется непрерывно, обогащаясь результатами исследований и данными операций по факту их появления. За счет создания модели возможно осуществить переход от качественного понимания моделируемого объекта к количественному представлению. Например, можно оценить потенциальный дебит, нефтегазонасыщенность, проницаемость. Зная фактические показатели при применении заданного набора средств и технологий для актива, можно прогнозировать результативность применения аналогичных средств при разработке актива со схожими характеристиками. Кроме того, при разработке зрелого актива часто обращаются к накопленной базе данных для поиска объектов, похожих на разрабатываемые. Так, при строительстве новых скважин обращаются к данным по соседним скважинам, например, для валидации данных, полученных в ходе геофизических исследований скважин. Также компании с большой ресурсной базой имеют значительный фонд законсервированных скважин по причине низкой рентабельности на момент консервации. Современные технологии позволяют работать с запасами, которые ранее считались нерентабельными и являются трудноизвлекаемыми. В перечисленных примерах инженеры осуществляют поиск объекта по образцу. Это рутинная процедура, осуществляемая вручную, и применяемая повсеместно.

Поиск трехмерного объекта по образцу технически можно разделить на три этапа: фильтрация контуров, идентификация контуров и сравнение контуров. Идентификация и сравнение контуров выходят за рамки данного исследования, однако эти задачи имеют решения. Так, в работе [1] представлена реализация одного из методов сравнения контуров.

Цель работы — повышение эффективности анализа ресурсной базы за счет автоматизации фильтрации контуров геологических объектов в модели пласта. Для достижения поставленной цели необходимо решить задачу обработки трехмерного изображения таким образом, чтобы конечным ее результатом являлось отфильтрованное бинарное трехмерное изображение, содержащее контуры начального, с толщиной контура в один воксел. Выполнены обзор и анализ существующих методов, применяемых для решения задачи: градиентные фильтры, преобразования Фурье и вейвлет-преобразования.

Научная новизна предлагаемого подхода заключается в объединении непрореживающего контурлет-преобразования (Non-Subsampled Contourlet Transform, NSCT) с анизотропной диффузией, управляемой структурным тензором, для фильтрации контуров в трехмерных воксельных данных, что позволяет одновременно осуществлять многомасштабный многонаправленный анализ, направленное сглаживание вдоль геологических структур и сохранение границ разломов с последующей локализацией однопиксельных контуров. Представленный метод отличается от существующих аналогов, основанных на классических градиентных операторах, частотной фильтрации Фурье или дискретном вейвлет-преобразовании. Метод обеспечивает сдвиговую инвариантность, произвольную направленную селективность на каждом масштабе и адаптивное управление диффузией с использованием меры достоверности разлома, что позволяет выделять тонкие связные границы в условиях сильного шума и сложной геометрии объектов без потери топологической целостности. Разработанный метод применим для автоматизации геологического анализа и может быть интегрирован в промышленные программные средства.

Использование градиентных алгоритмов, преобразования Фурье и вейвлетов для решения обозначенной задачи

Исторически задачу фильтрации контуров в двумерных изображениях решали путем применения различных градиентных фильтров, которые в англоязычных публикациях также называют операторами. Содержательно фильтры представляют собой аппроксимацию поданного на вход изображения путем применения к пикселям изображения ядер свертки. Одним из первых фильтров, получившим известность и широкое распространение был фильтр Робертса [2]. Оператор Робертса наиболее чувствителен к шумам анализируемого изображения. Затем появились фильтры Превитта [3] и Собеля [4], и оператор Лапласа. Особенно часто применяется фильтр Кэнни [5], который к операции свертки добавляет пороговые значения. Впоследствии было разработано множество различных модификаций градиентных фильтров, а также способов адаптивной настройки пороговых значений, например, фильтр Ротуэлла [6]. Существует достаточно хороший перевод книги [4] на русский язык, в котором подробно описана реализация ряда упомянутых фильтров [7]. Все перечисленные фильтры решают поставленную задачу, но для двумерных изображений. Оригинальные фильтры применяются до сих пор несмотря на свой возраст, однако в настоящей работе фильтруемые данные трехмерны в силу физической природы анализируемых объектов. Для фильтрации контуров трехмерных объектов многими исследователями были созданы как расширения оригинальных фильтров с двумерного пространства до трехмерного, так и собственные фильтры. Кроме расширения фильтра с двумерного до трехмерного, научные работы также направлены на повышение помехоустойчивости алгоритмов. Пример работы с фильтрами Собеля, Кэнни и оператором Лапласа в трехмерном пространстве представлен в работе [8], а развития фильтра Кэнни в [9]. В работе [10] предложен фильтр, работоспособность которого проверялась на сейсмических данных. Описанные методы применимы для фильтрации контуров в трехмерных изображениях. При этом, в силу чувствительности к шуму, качество работы градиентных фильтров зависит от поданного на вход изображения. Степень предварительного сглаживания изображения подбирается эмпирически. Наилучшие результаты традиционно показывает фильтр Кэнни.

Другим классическим инструментом для анализа изображений является преобразование Фурье. В контексте фильтрации контуров он позволяет выделить высокочастотные компоненты, соответствующие резким перепадам интенсивности. Для рассматриваемой задачи можно выделить две фундаментальные работы. В работе [11] изложена теория преобразования Фурье и его приложений, в том числе обработка изображений, а в [12] рассмотрен метод фазового контраста, основанный на пространственной фильтрации в частотной области. Областью работы была оптика, но разработанный математический аппарат применим и к поставленной задаче в настоящей работе. Современные исследования

направлены на развитие классических методов для повышения эффективности работы в условиях зашумленности изображений. Например, в [13] предложен метод выделения контуров на основе двумерного дискретного преобразования Фурье со скользящим окном (2D SDFT/HDFT). Работа [14] является одной из первых, где систематизированы подходы по обобщению двумерных подходов на трехмерное пространство. В том числе, в ней представлено обобщение преобразования Фурье на три измерения. В настоящий момент чистое преобразование Фурье практически не используется в задачах фильтрации контуров трехмерных изображений, однако оно применяется совместно с другими методами для предобработки и шумоподавления. В качестве примера можно привести предложенный в работе [15] комбинированный метод F-X-фильтрации с анизотропной диффузией на основе структурного тензора. Метод не осуществляет фильтрации контуров, но выполняет предварительную обработку для последующего анализа. Решается задача подавления случайного шума в трехмерных сейсмических данных при сохранении границ неоднородностей. В гибридном подходе анизотропная диффузия применяется для сглаживания вдоль структур, а F-X-фильтрация, основанная на преобразовании Фурье, используется локально, в окнах, ориентированных по геологической структуре.

Для анализа изображений также применяют вейвлет-преобразования. Впервые термин был введен в 80-х годах XX века, в рамках обработки сейсмических сигналов. Достаточно комплексное описание основ работы вейвлет-анализа на русском языке представлено в [16]. В отличие от преобразования Фурье, вейвлет-преобразование оперирует и частотной, и пространственной компонентами сигнала как независимыми. Частотно-временное окно вейвлет-преобразования динамическое, оно широкое на больших масштабах и узкое на малых. Систематический обзор методов фильтрации контуров изображений с применением математического аппарата вейвлет-анализа представлен в работе [17]. Применение технологии вейвлет-преобразования для фильтрации контуров двумерного изображения, а также его сравнения с классическими градиентными фильтрами приведены в исследованиях [18–20]. В трехмерном пространстве вейвлет-преобразование также применяется для сглаживания и фильтрации шумов изображений. Примером применения вейвлет-преобразования для идентификации трехмерных структур в исследованиях в области геофизики является работа [21]. За счет своих и частотной, и пространственной компонент вейвлет-преобразование нашло применение не только для подавления шума, но и для фильтрации контуров в трехмерном пространстве. В [22] введены два вейвлета типа «cake» для трехмерного пространства и предложена методика поиска трубчатых структур в медицинских данных, при этом этот же математический аппарат также применим и для других трубчатых структур. Как и с преобразованием Фурье, математический аппарат вейвлет-преобразований применяется вместе с дополнительными фильтрами и ограничениями для обеспечения точности выделения контуров.

Предлагаемый метод решения задачи

Описанные в разделе «Использование градиентных алгоритмов, преобразования Фурье и вейвлетов для решения обозначенной задачи» методы работоспособны и хорошо себя зарекомендовали в традиционных для себя областях применения. При этом специфика обрабатываемых данных накладывает дополнительные требования. Предлагаемый метод решения задачи должен подавлять шум, и при этом сохранять резкие перепады, уметь выделять границы объектов разной ориентации и разного масштаба, а результатом работы метода должно быть отфильтрованное изображение с толщиной слоя в один воксел. С учетом специфики предлагается последовательное применение NSCT для многонаправленного и многомасштабного разложения [23]. Пример применения NSCT представлен в работе [24]. Метод использован для обработки медицинских изображений, но математический аппарат может быть применен и в настоящей работе. В дополнение к контурлет-преобразованию используем анизотропную диффузию, управляемую структурным тензором [25], для каждого поддиапазона. После преобразования проведем обратное преобразование, и обеспечим последующую локализацию одновоксельных контуров посредством вычисления величины градиента, подавления немаксимумов в трехмерном пространстве и пороговой обработки с гистерезисом. Предложенный подход совмещает преимущества применения вейвлет-преобразования и градиентных фильтров. Метод использует схожую с фильтром Кэнни математическую обработку для результирующей фильтрации контуров, но существенно отличается на этапе предобработки, предлагая подход, с учетом специфики обрабатываемых данных в виде локальной ориентации таких структур как разломы, слои, трубчатые объекты.

NSCT было предложено как многомасштабное и многонаправленное преобразование, способное эффективно аппроксимировать контуры произвольной ориентации. Преобразование состоит из двух независимых фильтров, выполняемых последовательно на каждом уровне разложения.

NSCT обладает тремя важными свойствами.

1) Многомасштабность. Обеспечивает иерархическое разложение крупных структур на больших масштабах и небольших деталей на малых масштабах.

2) Многонаправленность. В отличие от дискретного вейвлет-преобразования, которое позволяет задать направления по горизонтали, вертикали и диагонали, NSCT определяет произвольное число направлений для каждого масштаба для определения атомарных структур с произвольной ориентацией в пространстве.

3) Отсутствие сдвиговой зависимости за счет отсутствия понижения дискретизации в ходе преобразования. Смещение входного сигнала не приводит к искажению структуры коэффициентов.

Пусть имеем анализируемое изображение $f(x, y, z) \in \mathbb{R}^3$, к которому применяется базисная функция контурлета $\psi_{i,k}$ на масштабе (уровне разложения) $i = 1, 2, \dots, I$ и направлении $k = 1, 2, \dots, K$, где k — целое число. Каждая базисная функция $\psi_{i,k}$ строится с помо-

щью каскадной структуры, состоящей из пирамиды Лапласа и банка направленных фильтров. Подробное описание банка направленных фильтров для трехмерного случая представлено в работе [26]. Пирамида Лапласа обеспечивает многомасштабное разложение, выделяя детали разных масштабов, а банк направленных фильтров разделяет их по ориентациям, формируя направленные поддиапазоны $W_{i,k}$ на каждом масштабе i для каждого направления k . При этом в NSCT разложение фактически вычисляется через каскад фильтров.

Первым фильтром является трехмерная пирамида Лапласа. На каждом уровне разложения $i = 1, 2, \dots, I$ к исходному изображению f применяется разложение на низкочастотную аппроксимацию $A_i(f)$ с крупными структурами и высокочастотную аппроксимацию $D_i(f)$ с мелкими деталями.

На втором этапе метода используется банк направленных фильтров к каждой D_i , таким образом выполняется многонаправленное разложение. В итоге из одной D_i получается множество направленных поддиапазонов $W_{i,k}$. По результатам применения классического NSCT исходное изображение $f(x, y, z)$ преобразовано в набор структур, описываемых уравнением:

$$f(x, y, z) \xrightarrow{NSCT} \{A_i(f)\} \cup \{W_{i,k}(f)\}_{i=1,\dots,I, k=1,\dots,K}.$$

Дополнительным этапом является применение анизотропной диффузии к каждому поддиапазону $W_{i,k}(f)$. Анизотропная диффузия была предложена [27] как метод подавления шума с сохранением границ. Его развитие представлено в работе [25]. Для выделения ориентированных структур в ходе анизотропной диффузии необходимо оценить не только величину изменения интенсивности, но и локальную ориентацию структур. Структурный тензор усредняет градиент его в окрестности и формирует симметричную матрицу, собственные значения и векторы которой несут информацию о локальной геометрии. Уравнение диффузии со структурным тензором имеет вид

$$\frac{\partial f(x, y, z, t)}{\partial t} = \text{div}(\varepsilon D(S_p) \nabla f(x, y, z, t)),$$

где (x, y, z) — координаты вокселя; div — дивергенция; ∇ — градиент; S_p — структурный тензор с масштабом p ; D — тензор диффузии; ε — коэффициент непрерывности диффузии. Для определения $D(x)$ необходимо вычислить структурный тензор по формуле

$$S_p = G_p * (\nabla f_\sigma \nabla f_\sigma^T),$$

где G_p — трехмерное гауссово ядро с масштабом p ; $*$ — операция свертки; $f_\sigma = G_\sigma * A_i(f)$. Масштаб p выбирается большим, чем масштаб шума σ . В гауссовом ядре параметр σ определяет масштаб усреднения. Малое значение p сохраняет мелкие детали, но делает тензор чувствительным к шуму и наоборот. После выполнения разложения на собственные значения $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq 0$ и собственные векторы $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3$ получим окончательное уравнение структурного тензора:

$$S_p = [v_1 \ v_2 \ v_3] \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} [v_1 \ v_2 \ v_3]^T.$$

В областях, где структура однородна, $\lambda_1 \approx \lambda_2 \approx \lambda_3 \approx 0$. Плоскоподобную структуру можно определить, если $\lambda_1 > \lambda_2 \approx \lambda_3 \approx 0$. Классифицировать разрыв можно при $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 \approx 0$. В случае, когда $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > 0$, можно говорить об отсутствии явной структуры. На основании этого вводятся три меры:

$$\begin{aligned} \text{— мера линейности — } M_{line} &= \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3}, \\ \text{— мера плоскости — } M_{plane} &= \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}, \\ \text{— мера разлома — } M_{fault} &= M_{line} (1 - M_{plane}) = \\ &= \frac{2\lambda_2(\lambda_2 - \lambda_3)}{(\lambda_1 + \lambda_2)(\lambda_2 + \lambda_3)}. \end{aligned}$$

При задании тензора диффузии учитываются ориентации структур, поэтому собственные векторы структурного тензора и тензора диффузии совпадают. Тогда σ диффузии D определяется как

$$D = [v_1 \ v_2 \ v_3] \begin{bmatrix} \mu_1 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_2 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_3 \end{bmatrix} [v_1 \ v_2 \ v_3]^T,$$

где μ_1, μ_2 и μ_3 — собственные значения тензора диффузии, которые имеют вид:

$$\begin{cases} \mu_1 = a \\ \mu_2 = \begin{cases} a & \text{если } k_{12} = 0 \\ a + (1-a)e^{\left(\frac{-1}{k_{12}}\right)} & \text{иначе} \end{cases} \\ \mu_3 = \begin{cases} \mu_2 & \text{если } k_{23} = 0 \\ \mu_2 + (M_{fault} - \mu_2)e^{\left(\frac{-1}{k_{23}}\right)} & \text{иначе} \end{cases} \end{cases},$$

где $k_{12} = (\lambda_1 - \lambda_2)^2$, $k_{23} = (\lambda_2 - \lambda_3)^2$; a — эмпирический коэффициент для управления диффузией.

Уравнение диффузии решается итерационно, и для каждой итерации в виде

$$f^{(t+1)} = f^{(t)} + \Delta t \cdot \text{div}(\epsilon_t D \cdot \nabla f^{(t)}),$$

где ϵ_t — коэффициент непрерывности диффузии

$$\epsilon_t = \frac{T_r(D_t D_{t+1})}{T_r(D_t) T_r(D_{t+1})},$$

где T_r — сумма элементов главной диагонали матрицы. Анизотропная диффузия применяется к каждому поддиапазону $W_{i,k}$. Полученный набор направлений представляет собой обработанное диффузией изображение. После завершения всех операций выполняется обратное преобразование NSCT для восстановления объема.

После выполнения обратного преобразования получим трехмерное полутоновое изображение f' , в котором подавлены шумы, а границы объектов усилены. Необходимо преобразовать полученное изображе-

ние в бинарное с границами объектов в один воксел. Применим для этой задачи обобщенный на трехмерную размерность фильтр Кэнни: вычислим градиент изображения, подавим немаксимумы и проведем двойную пороговую фильтрацию с гистерезисом. Отличие от классического фильтра Кэнни только в предобработке, вместо гауссова сглаживания использован разработанный метод. В каждой точке вычисляется градиент путем подсчета центральных разностей:

$$\begin{aligned} f'_x &= \frac{f'(x+1, y, z) - f'(x-1, y, z)}{2}, \\ f'_y &= \frac{f'(x, y+1, z) - f'(x, y-1, z)}{2}, \\ f'_z &= \frac{f'(x, y, z+1) - f'(x, y, z-1)}{2}. \end{aligned}$$

При этом уравнение модуля градиента:

$$M(x, y, z) = \sqrt{(f'_x)^2 + (f'_y)^2 + (f'_z)^2}.$$

Для того чтобы сделать границы толщиной в один пиксель, применяется подавление немаксимумов. Искомые границы соответствуют вокселям, где производная по направлению, перпендикулярному контуру, достигает локального максимума. Поскольку вектор градиента указывает в сторону наибольшего возрастания интенсивности, а направление нормали к границе совпадает с направлением градиента, то сама граница проходит перпендикулярно градиенту. Перед проверкой максимума вектор градиента (f'_x, f'_y, f'_z) нормируется по $M(x, y, z)$ для получения единичного вектора $\mathbf{n}$. Чтобы оставить только одну границу, нужно для каждого вокселя проверить, является ли величина градиента $M(x, y, z)$ локальным максимумом среди точек, претендующих быть границей вдоль направления градиента. Для каждого из этих вокселей применяется трилинейная интерполяция значений $M(x, y, z)$. Если значение $M(x, y, z)$ вокселя меньше хотя бы одного из интерполированных значений, то он обнуляется. После прохода всего изображения остаются только воксели с локальными максимумами градиента. Такое изображение уже имеет выделенные границы толщиной в один воксел. Последним шагом является двойная пороговая фильтрация с гистерезисом. Эмпирически задаются высокий и низкий пороги, воксели со значением $M(x, y, z)$ больше сильного порога отмечаются как сильные, со значением между порогами отмечаются как слабые, а со значением менее, чем низкий порог, отбрасываются. Если слабый воксел связан хотя бы с одним сильным в 26-связности, он также переводится в разряд сильных. Слабые воксели, не имеющие связности с сильными, отбрасываются.

Результаты

Экспериментальная проверка предложенного метода фильтрации контуров трехмерных объектов проводилась на тестовых данных. Рис. 1 представляет собой

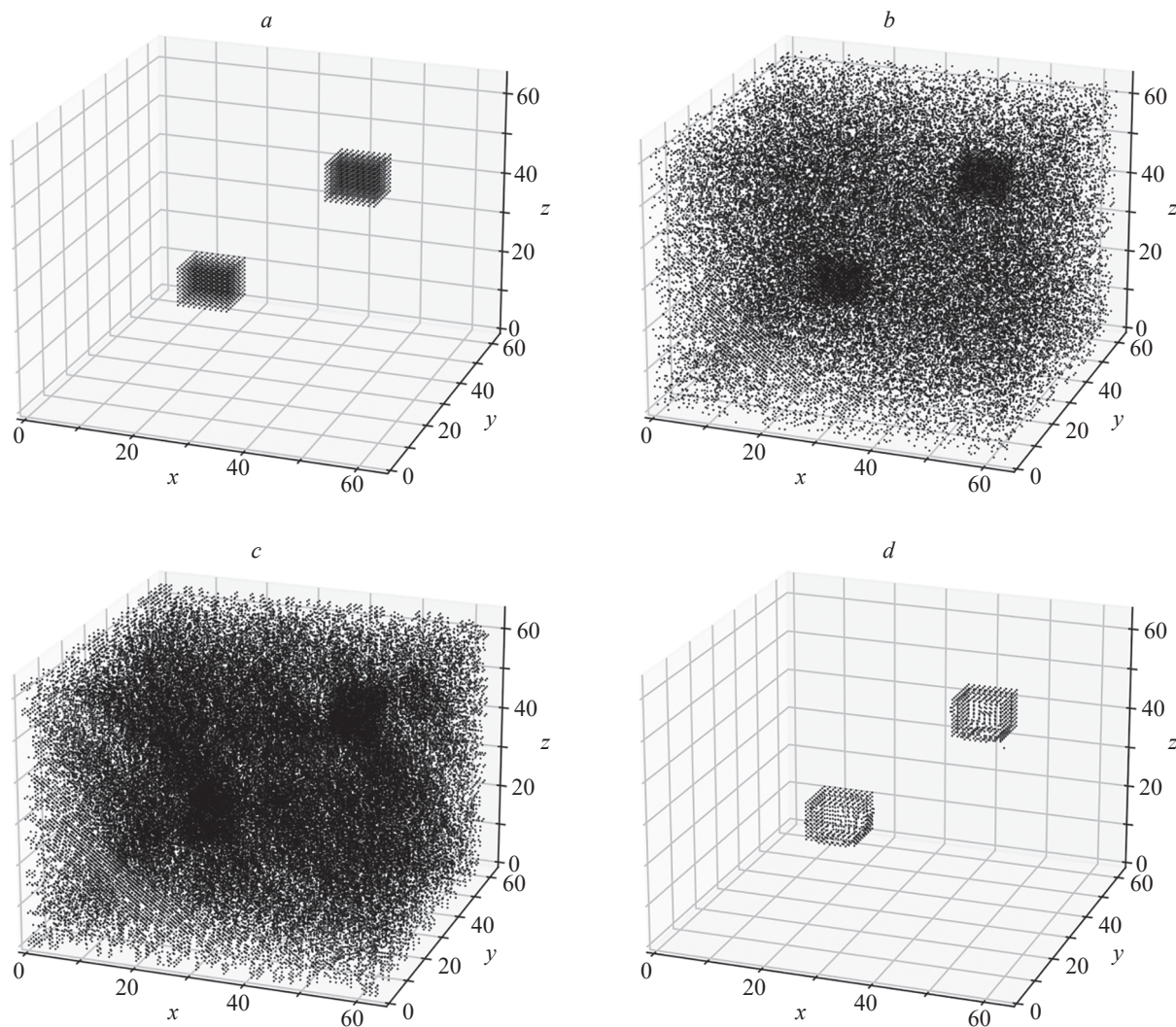


Рис. 1. Результат работы метода на исходном изображении (a); зашумленном исходном изображении (b); зашумленном изображении после применения непрореживающего контурлет-преобразования и диффузии со структурным тензором (c); отфильтрованное изображение после подавления немаксимумов и двойной пороговой фильтрации по гистерезису (d).

Синтетический объем изображений $64 \times 64 \times 64$ вокселя

Fig 1. The method of operation on cubic objects: original image (a); noisy original image (b); noisy image after applying a non-subsampled contourlet transform and diffusion with a structure tensor (c); filtered image after suppression of non-maxima and double threshold filtering by hysteresis (d)

результат работы на объектах кубической геометрической формы.

Необходимо отметить, что в приведенном примере схожий по качеству результат для анализируемых на рис. 1, a объектов был получен при применении только подавления немаксимумов и двойной пороговой фильтрации по гистерезису. Для демонстрации эффективности метода усложним задачу, фильтруя изображение с геологическими объектами. На рис. 2 изображена работа разработанного метода на разреженных данных, содержащих базовый фон, три слоя с разной интенсивностью, разлом, слияние двух слоев после разлома, а также две каверны. Отметим, что параметры фильтрации были подобраны для поиска криволинейных объектов, и результатом работы метода стали отфильтрованные каверны.

Полученный результат работы метода был достигнут за счет сочетания многомасштабного направленного разложения на основе контурлет-преобразования с нелинейной анизотропной диффузией, управляемой структурным тензором. Среди принятых на данный момент методов фильтрации контуров трехмерных изображений, таких как трехмерный детектор границ Кэнни без предварительной обработки, фильтрация в частотной области на основе преобразования Фурье, а также пороговая обработка коэффициентов дискретного вейвлет-преобразования, только предложенный метод учитывает внутреннюю структуру объектов анализируемого изображения. Метод анализирует направление структур внутри изображения, что обеспечивает улучшение качества выделения границ в зашумленных трехмерных данных. Полученные результаты подтвер-

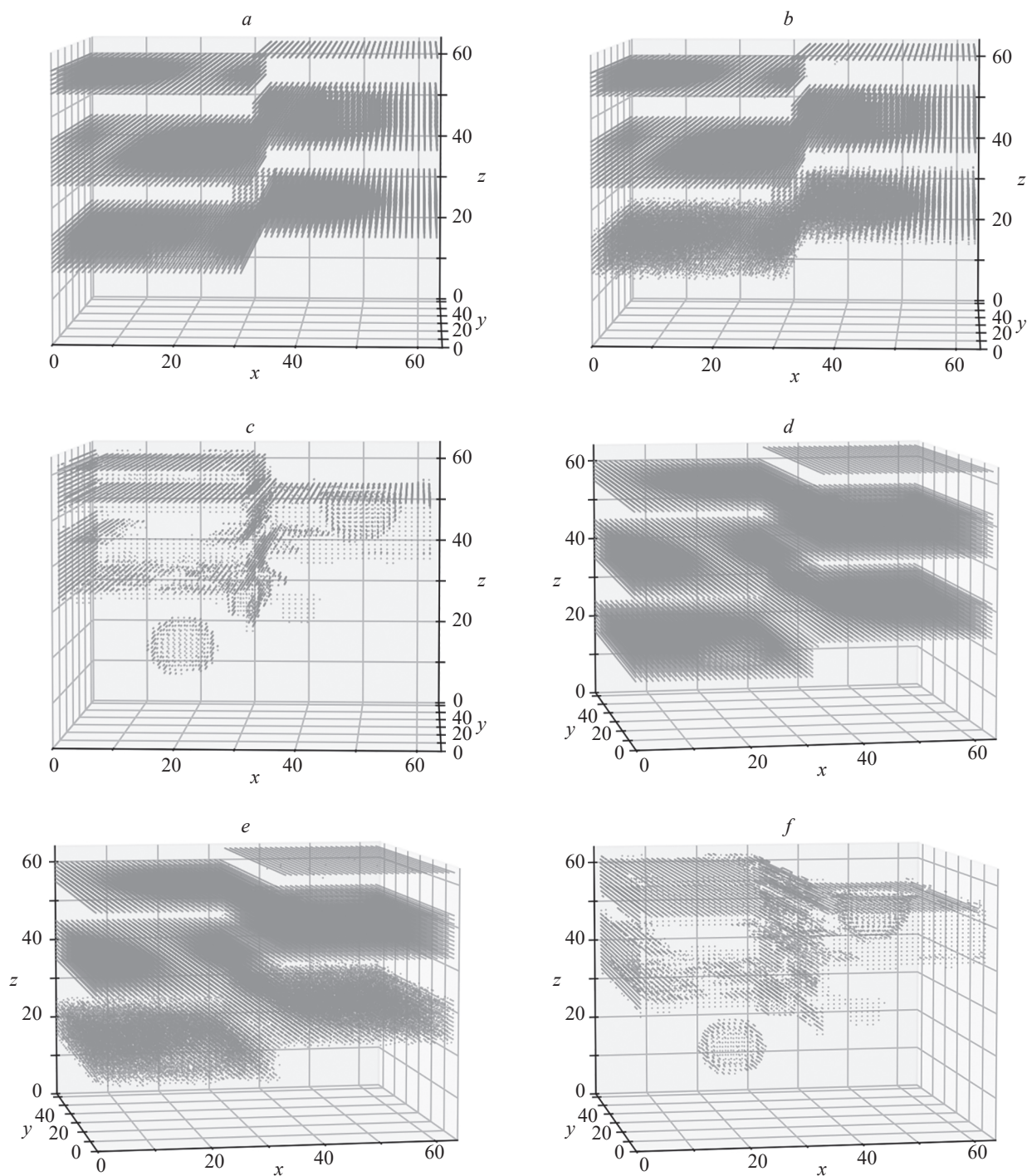


Рис. 2. Работа метода на разреженных данных: исходное изображение (a) и (d); зашумленное исходное изображение (b) и (e); отфильтрованное изображение (c) и (f).

Синтетический объем изображений $64 \times 64 \times 64$ вокселя

Fig. 2. The method of operation: original image (a) and (d); noisy original image (b) and (e); filtered image (c) and (f)

ждают перспективность использования предложенного подхода в задачах анализа объемных изображений сложной структуры.

Заключение

Метод фильтрации контуров применим для поиска трехмерных объектов в задачах геологического моде-

лирования пласта. Предложенный подход, объединяющий непрореживающее контурлет-преобразование, анизотропную диффузию со структурным тензором и подавление немаксимумов с последующей двойной пороговой фильтрацией по гистерезису, позволяет получить изображение с отфильтрованными контурами единичной толщины для последующих операций идентификации и сравнения в общем конвейере поиска.

Метод обеспечивает подавление шумов, сохраняя при этом резкие перепады и разломы, выделяет границы объектов с произвольными ориентацией и масштабом.

К преимуществам метода относятся инвариантность к сдвигу, многомасштабность и многонаправленность обработки данных, интуитивное представление результатов. Обеспечена возможность калибровки метода для отдельного взятого набора данных. Проведено сравнение с трехмерными градиентными фильтрами Собеля и Кэнни, преобразованием Фурье и дискретным вейвлет-преобразованием. Результаты сравнения показывают, что в трехмерном пространстве предлагаемый метод превосходит перечисленные методы по устойчивости к шуму, сохранению тонких и разломных структур, а также связности контуров. Устойчивость к шуму обеспечивается за счет многомасштабного разложения непрореживающего контурлет-преобразования, где высокочастотные шумовые компоненты сосредоточены в мелких масштабах и могут быть выборочно подавлены анизотропной диффузией, управляемой структурным тензором. Вычисление структурного тензора по низкочастотной аппроксимации позволяет отделить шум от полезного сигнала без размытия границ. Сохранение тонких разломов достигается путем введения меры достоверности разлома, вычисляемой на основе соб-

ственных значений структурного тензора. Эта мера блокирует диффузию поперек предполагаемых разломов. Высокая связность контуров является следствием сдвиговой инвариантности непрореживающего контурлет-преобразования и направленного характера диффузии. Диффузия проводится вдоль собственных векторов структурного тензора. При этом, за счет использования непрореживающего преобразования, предлагаемый метод содержит в себе избыточность. Такая избыточность допустима для задач, где возможна индексация, как задача поиска, но неприменима для задач, где требуется работа в режиме реального времени.

Дальнейшее развитие исследования может быть направлено на интеграцию метода с глубокими нейронными сетями для автоматической настройки параметров под конкретные данные. Вторым вектором развития метода видится адаптация для учета в работе специфики разных видов исследований, таких как сейсмика, гравиразведка, скважинные исследования и др. Разработанное программное обеспечение может быть интегрировано в существующие платформы геологического моделирования для последующего встраивания в общий конвейер инструментария поиска трехмерных геологических объектов по образцу.

Литература

1. Литвинов П.А., Бессмертный И.А. Поиск трехмерных изображений методом сравнения контуров в задачах геологического моделирования пласта // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 2. С. 303–310. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-2-303-310
2. Roberts L.G. Machine Perception of Three-Dimensional Solids. Ph.D. Thesis. // Massachusetts Institute of Technology, 1963.
3. Prewitt J.M.S. Object enhancement and extraction // Picture Processing and Psychopictorics. 1970. P. 75–149.
4. Duda R.O., Hart P.E. Pattern Classification and Scene Analysis. Wiley, 1973. P. 271–272.
5. Canny J.F. A computational approach to edge detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1986. V. 8. N 6. P. 679–698. doi: 10.1109/TPAMI.1986.4767851
6. Rothwell C.A., Mundy J.L., Hoffman W., Nguyen V.-D. Driving vision by topology // Proc. of the International Symposium on Computer Vision — ISCV. 1995. P. 395–400. doi: 10.1109/ISCV.1995.477034
7. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. М.: Мир, 1976. 512 с.
8. Jäger M., Jutzi B. 3D density-gradient based edge detection on neural radiance fields (nerfs) for geometric reconstruction // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2023. V. 48/W3-2023. P. 71–78. doi: 10.5194/isprs-archives-48w3-2023-71-2023
9. Zhao W.D., Wang X.L., Zhu J., Chen W. Research on 3D reconstruction calibration method of monocular camera based on improved Canny algorithm // Journal of Anhui University of Technology (Natural Science). 2026. V. 43. N 4. P. 408–414. doi: 10.12415/j.issn.1671-7872.25043
10. Adetokunbo P., Al-Shuhail A.A., Al-Dossary S. 3D seismic edge detection using magic squares and cubes // Interpretation. 2016. V. 4. N 3. P. T271–T280. doi: 10.1190/int-2015-0091.1
11. Bracewell R.N. The Fourier Transform and Its Applications. McGraw Hill, 2000. 616 p.
12. Zernike F. Phase contrast, a new method for the microscopic observation of transparent objects // Physica. 1942. V. 9. N 7. P. 686–698. doi: 10.1016/s0031-8914(42)80035-x
13. Vishwakarma A.K., Sukumar N., Sumathi P. Two-dimensional DFT with sliding and hopping windows for edge map generation of road

References

1. Litvinov P.A., Bessmertny I.A. Search for three-dimensional images using the contour comparison method in problems of geological reservoir modeling. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 2, pp. 303–310. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-2-303-310
2. Roberts L.G. *Machine Perception of Three-Dimensional Solids*. Ph.D. Thesis. Massachusetts Institute of Technology, 1963.
3. Prewitt J.M.S. Object enhancement and extraction. *Picture Processing and Psychopictorics*, 1970, pp. 75–149.
4. Duda R.O., Hart P.E. *Pattern Classification and Scene Analysis*. Wiley, 1973, pp. 271–272.
5. Canny J.F. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, vol. 8, no. 6, pp. 679–698. doi: 10.1109/TPAMI.1986.4767851
6. Rothwell C.A., Mundy J.L., Hoffman W., Nguyen V.-D. Driving vision by topology. *Proc. of the International Symposium on Computer Vision — ISCV*, 1995, pp. 395–400. doi: 10.1109/ISCV.1995.477034
7. Duda R.O., Hart P.E. *Pattern Classification and Scene Analysis*. Wiley, 1973, 512 p.
8. Jäger M., Jutzi B. 3D density-gradient based edge detection on neural radiance fields (nerfs) for geometric reconstruction. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2023, vol. 48/W3-2023, pp. 71–78. doi: 10.5194/isprs-archives-48w3-2023-71-2023
9. Zhao W.D., Wang X.L., Zhu J., Chen W. Research on 3D reconstruction calibration method of monocular camera based on improved Canny algorithm. *Journal of Anhui University of Technology (Natural Science)*, 2026, vol. 43, no. 4, pp. 408–414. doi: 10.12415/j.issn.1671-7872.25043
10. Adetokunbo P., Al-Shuhail A.A., Al-Dossary S. 3D seismic edge detection using magic squares and cubes. *Interpretation*, 2016, vol. 4, no. 3, pp. T271–T280. doi: 10.1190/int-2015-0091.1
11. Bracewell R.N. *The Fourier Transform and Its Applications*. McGraw Hill, 2000, 616 p.
12. Zernike F. Phase contrast, a new method for the microscopic observation of transparent objects. *Physica*, 1942, vol. 9, no. 7, pp. 686–698. doi: 10.1016/s0031-8914(42)80035-x
13. Vishwakarma A.K., Sukumar N., Sumathi P. Two-dimensional DFT with sliding and hopping windows for edge map generation of road

- images // *IET Image Processing*, 2022, V. 16, N 4, P. 972–984. doi: 10.1049/ipr2.12168
14. Nikolaidis N., Pitas I. *3-D Image Processing Algorithms*. Wiley, 2000. 192 p.
 15. Sun Y.-Z., Li J., Qin D.-W., Liu Q.-W. The application of 3D edge-preserving de-noising methods based on structure oriented in a complex faults block: A case study of C oilfield in East China Sea // *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, V. 45, N 3, P. 692–701. doi: 10.11720/wtyht.2021.1283
 16. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // *Успехи физических наук*, 1996, Т. 166, № 11, С. 1145–1170. doi: 10.3367/UFNr.0166.199611a.1145
 17. Wang P.S.P., Yang J. A review of wavelet-based edge detection methods // *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2012, V. 26, N 7, P. 1255011. doi: 10.1142/s0218001412550117
 18. Shih M.-Y., Tseng D.-C. A wavelet-based multiresolution edge detection and tracking // *Image and Vision Computing*, 2005, V. 23, N 4, P. 441–451. doi: 10.1016/j.imavis.2004.11.005
 19. Chickanosky V., Mirchandani G. Wreath products for edge detection // *Proc. of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP*, 1998, P. 2953–2956. doi: 10.1109/icassp.1998.678145
 20. Fujinoki K., Ashizawa K. Directional lifting wavelet transform for image edge analysis // *Signal Processing*, 2024, V. 216, P. 109188. doi: 10.1016/j.sigpro.2023.109188
 21. Hassina Boukerbout. The use of the 2D and 3D complex wavelet and ridgelet transforms in geophysical prospecting: case of potential fields data // *Modern Applications of Wavelet Transform*, 2024, P. 37–48. doi: 10.5772/intechopen.1003873
 22. Janssen M.H.J., Janssen A.J.E.M., Bekkers E.J., Bescos J.O., Duits R. Design and processing of invertible orientation scores of 3D Images // *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2018, V. 60, N 9, P. 1427–1458. doi: 10.1007/s10851-018-0806-0
 23. da Cunha A.L., Zhou J.P., Do M.N. The Nonsubsampled contourlet transform: theory, design, and applications // *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, V. 15, N 10, P. 3089–3101. doi: 10.1109/TIP.2006.877507
 24. Lakshmi Priya B., Jayanthi K., Pottakkat B., Ramkumar G. A Modified framework for multislice image fusion for high contrast liver cancer detection // *IETE Journal of Research*, 2020, V. 66, N 2, P. 139–149. doi: 10.1080/03772063.2018.1479664
 25. Wang J., Zhang J., Yang Y., Du Y. Anisotropic diffusion filtering based on fault confidence measure and stratigraphic coherence coefficients // *Geophysical Prospecting*, 2021, V. 69, N 5, P. 1003–1016. doi: 10.1111/1365-2478.13085
 26. Lu Y.M., Do M.N. Multidimensional Directional Filter Banks and Surfacelets // *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, V. 16, N 4, P. 918–931. doi: 10.1109/tip.2007.891785
 27. Perona P., Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, V. 12, N 7, P. 629–639. doi: 10.1109/34.56205
 - images. *IET Image Processing*, 2022, vol. 16, no. 4, pp. 972–984. doi: 10.1049/ipr2.12168
 14. Nikolaidis N., Pitas I. *3-D Image Processing Algorithms*. Wiley, 2000, 192 p.
 15. Sun Y.-Z., Li J., Qin D.-W., Liu Q.-W. The application of 3D edge-preserving de-noising methods based on structure oriented in a complex faults block: A case study of C oilfield in East China Sea. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, vol. 45, no. 3, pp. 692–701. doi: 10.11720/wtyht.2021.1283
 16. Astaf'eva N.M. Wavelet analysis: basic theory and some applications. *Physics-Uspeski*, 1996, vol. 39, no. 11, pp. 1085–1108. doi: 10.1070/PU1996v039n11ABEH000177
 17. Wang P.S.P., Yang J. A review of wavelet-based edge detection methods. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2012, vol. 26, no. 7, pp. 1255011. doi: 10.1142/s0218001412550117
 18. Shih M.-Y., Tseng D.-C. A wavelet-based multiresolution edge detection and tracking. *Image and Vision Computing*, 2005, vol. 23, no. 4, pp. 441–451. doi: 10.1016/j.imavis.2004.11.005
 19. Chickanosky V., Mirchandani G. Wreath products for edge detection. *Proc. of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP*, 1998, pp. 2953–2956. doi: 10.1109/icassp.1998.678145
 20. Fujinoki K., Ashizawa K. Directional lifting wavelet transform for image edge analysis. *Signal Processing*, 2024, vol. 216, pp. 109188. doi: 10.1016/j.sigpro.2023.109188
 21. Hassina Boukerbout. The use of the 2D and 3D complex wavelet and ridgelet transforms in geophysical prospecting: case of potential fields data. *Modern Applications of Wavelet Transform*, 2024, pp. 37–48. doi: 10.5772/intechopen.1003873
 22. Janssen M.H.J., Janssen A.J.E.M., Bekkers E.J., Bescos J.O., Duits R. Design and processing of invertible orientation scores of 3D Images. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2018, vol. 60, no. 9, pp. 1427–1458. doi: 10.1007/s10851-018-0806-0
 23. da Cunha A.L., Zhou J.P., Do M.N. The Nonsubsampled contourlet transform: theory, design, and applications. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, vol. 15, no. 10, pp. 3089–3101. doi: 10.1109/TIP.2006.877507
 24. Lakshmi Priya B., Jayanthi K., Pottakkat B., Ramkumar G. A Modified framework for multislice image fusion for high contrast liver cancer detection. *IETE Journal of Research*, 2020, vol. 66, no. 2, pp. 139–149. doi: 10.1080/03772063.2018.1479664
 25. Wang J., Zhang J., Yang Y., Du Y. Anisotropic diffusion filtering based on fault confidence measure and stratigraphic coherence coefficients. *Geophysical Prospecting*, 2021, vol. 69, no. 5, pp. 1003–1016. doi: 10.1111/1365-2478.13085
 26. Lu Y.M., Do M.N. Multidimensional Directional Filter Banks and Surfacelets. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, vol. 16, no. 4, pp. 918–931. doi: 10.1109/tip.2007.891785
 27. Perona P., Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, vol. 12, no. 7, pp. 629–639. doi: 10.1109/34.56205

Авторы

Литвинов Павел Александрович — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 59867479700](https://orcid.org/0009-0009-5246-3713), <https://orcid.org/0009-0009-5246-3713>, p.litvinov7@gmail.com
Бессмертный Игорь Александрович — доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 36661767800](https://orcid.org/0000-0001-6711-6399), <https://orcid.org/0000-0001-6711-6399>, bessmertny@itmo.ru

Authors

Pavel A. Litvinov — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 59867479700](https://orcid.org/0009-0009-5246-3713), <https://orcid.org/0009-0009-5246-3713>, p.litvinov7@gmail.com
Igor A. Bessmertny — D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 36661767800](https://orcid.org/0000-0001-6711-6399), <https://orcid.org/0000-0001-6711-6399>, bessmertny@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 14.04.2026
 Одобрена после рецензирования 11.05.2026
 Принята к печати 24.07.2026

Received 14.04.2026
 Approved after reviewing 11.05.2026
 Accepted 24.07.2026



Работа доступна по лицензии
 Creative Commons
 «Attribution-NonCommercial»