На правах рукописи



КУЗНЕЦОВ Леонид Львович

АЛГОРИТМЫ СЕГМЕНТАЦИИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И СУШИ В СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2026

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» (РГРТУ) в НИИ обработки аэрокосмических изображений (НИИ «Фотон»)

Научный руководитель:	**Гусев Сергей Игоревич** доктор технических наук, доцент, проректор по научной работе и инновациям, заведующий кафедрой «Космические технологии» РГРТУ
Официальные оппоненты:	**Ташлинский Александр Григорьевич** доктор технических наук, директор НИЦ обработки изображений и сигналов «Сигнал» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск
	Кашницкий Александр Витальевич кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела «Технологий спутникового мониторинга» Института космических исследований Российской академии наук, г. Москва
Ведущая организация:	**ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики»,** г. Самара

Защита состоится **16 сентября 2026 года в 14:00** на заседании диссертационного совета 24.2.375.01 в Рязанском государственном радиотехническом университете им. В.Ф. Уткина по адресу:

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГРТУ и на сайте РГРТУ: https://rsreu.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.375.01
доктор технических наук

Пруцков Александр Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в системах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для решения многих задач наряду с традиционным оптическим наблюдением все чаще используется радиолокационная съемка, позволяющая получать данные ДЗЗ в любое время суток и при наличии облачности. Одной из наиболее востребованных задач обработки радиолокационных данных является классификация двух объектов: водной поверхности и суши. Надежное определение границ данных классов необходимо во многих сферах, причем конкретные потребности могут отличаться. Например, в гидрологии, судоходстве, рыбном хозяйстве приоритет отдается выделению воды; в геологии, картографии и градостроительстве – определению суши.

Радиолокационные изображения трудно воспринимаемы человеческим зрением из-за зашумленности (например, спекл-шума), наличия геометрических искажений объектов поверхности, эффектов затенения и отражения. Возникает необходимость обработки, позволяющей облегчить дешифрирование объектов наблюдаемой сцены. Актуальным решением является автоматизированное формирование маски классов водной поверхности и суши для каждого пикселя изображения, то есть его сегментация. Существующие алгоритмы не обеспечивают во многих практических приложениях достоверность решения указанной задачи. Актуальным направлением исследований является повышение достоверности сегментации водной поверхности и суши, чему и посвящена настоящая работа.

В диссертации предлагаются новые научно обоснованные технические решения в виде алгоритмов сегментации радиолокационных изображений для определения водной поверхности и суши. Они нацелены на повышение достоверности классификации этих объектов и востребованы во многих народнохозяйственных приложениях.

Степень разработанности темы. Проблема сегментации радиолокационных изображений в системах ДЗЗ за рубежом начала активно исследоваться на данных от первых спутников с радиолокаторами с синтезированной апертурой антенны (РСА): SEASAT (1978 г., США); ERS-1, ERS-2 и ENVISAT (1991 г., 1995 г. и 2002 г., Евросоюз); RADARSAT-1 и RADARSAT-2 (1995 г. и 2007 г., Канада). Наибольшее развитие данная проблема получила с появлением поляриметрических РСА-систем в 1990-х годах. Основной вклад внесли ученые S.R. Cloude, E. Pottier, R.M. Goldstein, C.L. Werner, A.K. Dobson, L.E. Pierce, F.T. Ulaby, M. Moghaddam и др.

В СССР работы по данной тематике начаты в 1980-е годы при создании аппаратов «Космос-1500» (1983 г.), «Космос-1870» (1987 г.) и «Алмаз-1» (1991 г.). После распада СССР в этом направлении долгое время не было новых разработок, они стали появляться лишь в последнее десятилетие в рамках проектов серий «Аркон», «Кондор», «Обзор-Р» и др. Здесь ведущую роль заняли предприятия АО «РКЦ «Прогресс», АО «ВПК «НПО Машиностроения, Институт космических исследований РАН, РГРТУ и др., а также ученые и специалисты в области создания систем радиолокационного наблюдения Зем-

ли: В.С. Верба, В.Э. Турук, Л.Б. Неронский, О.Ю. Лаврова, Г.С. Кондратенков, В.Г. Коберниченко, О.В. Горячкин и др.

В настоящее время большинство предлагаемых алгоритмов сегментации радиолокационных изображений нацелены на выделение водной поверхности и основаны либо на кластеризации по методу *k*-средних, либо на машинном обучении. Основными недостатками кластеризации являются зависимость от начальной инициализации и возможность получения разных результатов при повторной обработке. Машинные алгоритмы требуют проведения обучения нейронной сети и ориентированы на сегментацию схожих с обучающей выборкой изображений. Таким образом, актуальным направлением исследований является разработка инвариантных к начальным условиям алгоритмов сегментации радиолокационных изображений для определения водной поверхности и суши, которые не требуют обучения и обеспечивают повторяемость и высокую достоверность получаемых результатов.

Цель диссертации – повышение достоверности и повторяемости алгоритмов сегментации радиолокационных изображений для определения водной поверхности и суши.

Объектом исследования служат алгоритмы сегментации радиолокационных изображений для определения водной поверхности и суши.

Предметом исследования являются информативные признаки объектов радиолокационных изображений и достоверность алгоритмов сегментации.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи.**

Задача 1. Анализ космических систем радиолокационной съемки, методов обработки радиолокационной информации и сегментации изображений.

Задача 2. Разработка алгоритма сегментации радиолокационных изображений для определения водной поверхности и суши, обладающего высокой повторяемостью и достоверностью результатов.

Задача 3. Разработка алгоритма комплексирования результатов сегментации многоканального радиолокационного изображения.

Задача 4. Разработка маски классов поверхности на основе анализа значений высот по данным цифровой модели рельефа (ЦМР).

Задача 5. Оценка разработанных алгоритмов на натурной информации от космических систем радиолокационной съемки Земли.

Научная новизна диссертации определяется тем, что в работе предложены и исследованы новые алгоритмы сегментации радиолокационных изображений для определения водной поверхности и суши, основанные на комплексном использовании текстурных, поляриметрических и топографических признаков объектов изображений, что позволяет повысить достоверность и повторяемость результатов сегментации.

Теоретическая и практическая значимость диссертации состоит в том, что разработаны и исследованы новые алгоритмы повышения достоверности и повторяемости сегментации водной поверхности и суши на радиолокационных изображениях, которые получили внедрение на практике.

Методы исследования. Теоретические результаты получены с использованием методов оптимизации, математической статистики, цифровой обработки изображений.

Соответствие паспорту специальности 2.3.1. Диссертация соответствует паспорту специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» в части:

– пункта 4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»;

– пункта 12 «Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации».

Новые научные положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм сегментации (АС) радиолокационных изображений для определения водной поверхности и суши с достоверностью сегментации не менее 90 % на основе алгоритма кластеризации, который обеспечивает повторяемость результатов при повторной обработке и повышение быстродействия на 35–50 %.

2. Алгоритм комплексирования результатов сегментации многоканального радиолокационного изображения с помощью взвешенного голосования, позволяющий повысить достоверность до 2,5 % по отношению к АС.

3. Алгоритм формирования маски классов поверхности по результатам анализа относительных значений высот из цифровой модели рельефа, позволяющий выполнить сегментацию с достоверностью не менее 93 % или повысить ее достоверность при наличии на изображении теневых склонов рельефа до 4,7 % по отношению к АС.

Степень достоверности и апробация. Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждена корректным использованием математического аппарата, широкими исследованиями предложенных алгоритмов на статистически представительных данных натурной радиолокационной съемки.

По основным положениям и результатам исследований сделано 6 докладов на всероссийских и международных научно-технических конференциях: на международных конференциях «Современные технологии в науке и образовании» (Рязань, 2023, 2024, 2025), «Космические технологии» (Москва, 2024); на всероссийских конференциях «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 2024), «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2025).

Внедрение. Диссертационные исследования выполнены в Рязанском государственном радиотехническом университете им. В.Ф. Уткина (НИИ обработки аэрокосмических изображений – НИИ «Фотон») в рамках ОКР 16-13 по теме «Обзор-Р», определенной Федеральной космической программой (заказчик – АО «Ракетно-космический центр «Прогресс»). Предложенные решения получили внедрение в специальном программном обеспечении высокоуровневой обработки радиолокационной информации космического аппарата «Обзор-Р»

№1, а также в учебном процессе РГРТУ. Это подтверждается соответствующими Актами.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 работ: 4 статьи в изданиях по списку ВАК, 6 статей и тезисов докладов в материалах международных и всероссийских конференций, 4 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложения. Основной текст работы включает 130 с., 50 рисунков и 44 таблицы. Список литературы содержит 109 наименований на 11 с., приложение – 7 с.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Анализ существующих методов и алгоритмов сегментации радиолокационных изображений систем ДЗЗ

Проанализированы существующие подходы к сегментации радиолокационных изображений для определения водной поверхности и суши. Установлено, что наиболее универсальное решение для использования в системах обработки данных ДЗЗ основано на кластеризации по алгоритму на базе *k*-средних. Его основным недостатком является возможность получения разных результатов сегментации при повторной обработке. Также изучены поляриметрические и текстурные информационные признаки, позволяющие повысить достоверность. На основе проведенного анализа выделены следующие задачи.

Во-первых, необходимо оценить достоверность сегментации, основанной на поляриметрической классификации Клода-Потье с использованием распределения Уишарта. Клод и Потье выделили 9 классов объектов по свойствам отражения радиолокационного сигнала, поэтому классы, в которые попадает водная поверхность, следует отнести в одну группу, а остальные – в другую, после чего рассчитать достоверность такой сегментации.

Во-вторых, необходимо разработать алгоритм кластеризации, который гарантирует повторяемость результатов при повторной обработке изображения и обладает характеристиками по быстродействию и точности, не уступающими методу *k*-средних.

В-третьих, следует отобрать текстурные признаки Харалика, позволяющие достичь наибольшей достоверности сегментации, и определить диапазоны значений, соответствующие целевым классам. Данная информация будет использоваться для интерпретации результатов кластеризации.

В-четвертых, необходимо разработать алгоритм, позволяющий комплексировать результаты нескольких сегментаций для повышения достоверности. Основной задачей является определение способа принятия решений о классе пикселей.

В-пятых, следует использовать априорную информацию о высотах земной поверхности из цифровых моделей рельефа. Она позволяет сформировать

маску классов поверхности на изображении, которая может использоваться для уточнения или получения результатов сегментации.

В-шестых, требуется оценить разработанные алгоритмы на статистически представительной выборке данных.

Важной задачей, решаемой во всех направлениях исследований, является оценка достоверности сегментации. Такая оценка может быть выполнена на основе соответствия предварительно созданной маске эталонной сегментации натурных изображений от космической системы радиолокационной съемки Земли «RadarSat-2».

Глава 2. Алгоритмы сегментации радиолокационных изображений для определения водной поверхности и суши

Выполнена оценка достоверности целевой сегментации радиолокационных изображений, основанной на поляриметрической классификации Клода-Потье с использованием распределения Уишарта. Для этого пиксели, отнесенные к классам 3 и 6 (соответствующие отражению от гладкой поверхности с низкой энтропией и от шероховатой поверхности со средней энтропией), объединены в класс воды, а остальные – в класс суши.

Достоверность сегментации здесь и в дальнейшем рассчитывалась по формуле: $Acc = (Acc_{\text{в}} + Acc_{\text{с}})/2$, где $Acc_{\text{в}}$ и $Acc_{\text{с}}$ – достоверность сегментации воды и суши соответственно, рассчитываемые как $Acc_{\text{в}} = P_{\text{в}}/N_{\text{в}}$ и $Acc_{\text{с}} = P_{\text{с}}/N_{\text{с}}$, где $P_{\text{в}}$ и $P_{\text{с}}$ – число правильно классифицированных пикселей воды и суши, определенное с помощью маски изображения, $N_{\text{в}}$ и $N_{\text{с}}$ – количество пикселей воды и суши на маске изображения.

Проведена серия опытов, в которых фиксировалась достоверность сегментации при разном окне обработки. В ходе экспериментов для каждого изображения при определенных размерах окна достигнута высокая достоверность. Установлено правило, согласно которому достоверность сегментации каждого класса в отдельности должна быть не менее 0,90. Лучшее среднее значение получено при окне размером 11x11 и составило 95,38 %. На основе данного результата сделан вывод о возможности применения поляриметрической классификации Клода-Потье для сегментации на классы водной поверхности и суши.

Разработан детерминированный алгоритм кластеризации. За основу взят анализ гистограммы изображения. Пиксели, сосредоточенные вокруг максимумов (пиков) гистограммы, имеют схожие свойства, на основании чего их можно объединить в кластеры. С учетом этого, алгоритм адаптивной кластеризации по максимумам гистограммы (АКМГ) включает следующие шаги:

1) задание начальных параметров – числа формируемых кластеров k, ширины ядра Гаусса r, защитного интервала между центроидами d_{min}, минимального уровня фиксируемых максимумов τ;

2) вычисление гистограммы изображения $h[l]$ по формуле

$$h[l] = \sum_{i=1}^{W} \sum_{j=1}^{H} \delta(I(i,j), l), l = 0,1,2, \dots, L-1, \quad (1)$$

где $h[l]$ – число пикселей с интенсивностью l; W и H – ширина и высота изображения; $I(i,j)$ – интенсивность пикселя в точке (i,j); $\delta(a,b) = \begin{cases} 1, a = b \\ 0, a \neq b \end{cases}$ – дельта-функция Кронекера;

3) определение граничных индексов гистограммы l_{min} и l_{max} путем отсечения нулевых значений по краям для оптимизации последующих вычислений;

4) вычисление сглаженной гистограммы $s[l]$:

$$s[l] = \sum_{t=-r}^{r} h[l+t]\, g[t], \tag{2}$$

где $g[t] = \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) / \left(\sum_{j=-r}^{r} \exp\left(-\frac{j^2}{2\sigma^2}\right)\right), t \in \{-r, \dots, r\}$ – дискретное нормированное ядро Гаусса, t – дискретное смещение от центра окна сглаживания, $\sigma = r/2$ – половина радиуса окна сглаживания;

5) определение глобального максимума $s_{max} = \max s[l], l_{min} \leq l \leq l_{max}$ и присвоение его индекса центру первого кластера;

6) поиск локальных максимумов P по правилу

$$P = \{i \in [l_{min}, \dots, l_{max}] | s[i] > s[i-1], s[i] > s[i+1], s[i] > \tau s_{max}\}, \tag{3}$$

где P – множество индексов подходящих локальных максимумов, τ – множитель для определения порогового значения высоты пика относительно глобального максимума из диапазона $[0{,}1; 0{,}5]$;

7) определение значимости пиков $prom[i]$ – насколько сильно они выделяются относительно соседних значений – по формуле

$$prom[i] = s[i] - \max\{s[i-1], s[i+1]\} \tag{4}$$

и сортировка их по убыванию значимости;

8) назначение оставшимися центроидами $k-1$ самых значимых пиков при условии их расположения как минимум на расстоянии d_{min} друг от друга;

9) при наличии незаполненных центров кластеров их итеративное определение на основе максимума плотностно-дистанционной оценки Ф[l]:

$$\Phi[l] = s[l] \cdot \min_{c \in C} |l - c|, \tag{5}$$

где $s[l]$ – число пикселей яркостью l на сглаженной гистограмме, C – множество отобранных центроидов;

10) уточнение положений кластеров $\widehat{c_i}$ с помощью взвешенного среднего:

$$\widehat{c_i} = \left(\sum_{l=c_i-\frac{d_{min}}{2}}^{c_i+\frac{d_{min}}{2}} l \cdot h[l]\right) / \left(\sum_{l=c_i-\frac{d_{min}}{2}}^{c_i+\frac{d_{min}}{2}} h[l]\right), \tag{6}$$

где $\widehat{c_i}$ – уточненное положение кластера, $h[l]$ – число пикселей яркостью l на исходной (несглаженной) гистограмме;

11) сортировка полученных центров кластеров по возрастанию.

С целью оценки быстродействия и точности кластеризации АКМГ выполнено сравнение с другими алгоритмами кластеризации на синтезированных гистограммах. Полученные результаты показали, что точность кластеризации по метрике внутрикластерной суммы квадратов (WCSS) немного уступает лучшим значениям, получаемым с помощью K-Means++, при этом скорость работы алгоритма (определения центров кластеров) в 100–250 раз выше.

Осуществлен отбор текстурных признаков Харалика, позволяющих достичь наибольшей достоверности сегментации. Рассчитаны 11 признаков и максимальная достоверность сегментации по ним, также производился замер времени вычислений. Наилучшие значения получены для второго углового момента (энергии), обратного дифференциального момента (гомогенности) и энтропии, поэтому данные признаки отобраны для дальнейшего использования. При этом время расчета энтропии оказалось примерно в 3 раза больше, чем у двух других признаков, поэтому для задачи оперативной сегментации его использовать не рекомендуется.

На основе описанных действий разработан алгоритм сегментации АС (**Положение 1**), содержащий следующие шаги:

1) выполнение текстурного анализа на основе одного из трех отобранных признаков;

2) применение алгоритма АКМГ для определения центров кластеров;

3) нормирование центров кластеров в динамический диапазон анализируемого изображения;

4) определение кластеров водной поверхности и суши на основе межклассовой границы и соотношения яркостей;

5) формирование сегментированного изображения.

Межклассовые границы определены эмпирическим путем для нормированных диапазонов значений текстурных признаков и приведены в таблице 1. В ней в столбцах «c_{min}» и «c_{max}» указаны нормированные значения центроидов, между которыми находится граница, для соответствующей пары поляризаций, в столбце «$c_{\text{ср}}$» – среднее значение этого диапазона, в столбце «Соотношение яркостей» указано правило проведения классификации пикселей.

Таблица 1 – Диапазоны возможных значений границ между классами воды и суши

Текстурный признак	**Поляризация**	c_{min}	c_{max}	$c_{\text{ср}}$	**Соотношение яркостей**
Энергия	*VV, HH*	0,028	0,036	0,032	$c_{\text{воды}} > c_{\text{суши}}$
	VH, HV	0,121	0,144	0,133	
Гомогенность	*VV, HH*	0,316	0,451	0,384	$c_{\text{воды}} > c_{\text{суши}}$
	VH, HV	0,584	0,840	0,712	
Энтропия	*VV, HH*	0,551	0,633	0,592	$c_{\text{воды}} < c_{\text{суши}}$
	VH, HV	0,365	0,392	0,379	

В рамках текущей работы принято решение об использовании среднего значения диапазона в качестве границы между классами. При этом введено *ограничение* – указанный способ определения границы применим, только если на сегментируемом изображении присутствуют пиксели обоих классов.

Произведено экспериментальное сравнение АС и его ближайшего широко распространенного аналога на основе кластеризации с помощью K-Means++. Полученные данные свидетельствуют о сопоставимой достоверности сегмента-

ции (в среднем АС дает на 1,84 % лучший результат, все полученные значения превышали **90 %**), при этом из-за высокой скорости работы алгоритма АКМГ общее время вычислений сократилось на 35–50 %. Таким образом, разработанный алгоритм сегментации отвечает всем поставленным ранее условиям: гарантирует повторяемость результатов, обладает высокой скоростью работы и достоверностью.

Примеры результатов сегментации изображений приведены на рисунке 1. Слева – сегментированное по признаку энтропии изображение канала с поляризацией *HV*, справа – сегментированное по признаку энергии изображение канала с поляризацией *HH*. Белым цветом обозначен класс водной поверхности, черным – класс суши. Основные ошибки сегментации заключаются в отнесении теневых склонов рельефа и асфальтированных дорог к классу водной поверхности из-за схожих свойств отражения радиолокационных сигналов и в поглощении сушей части узких русел рек.

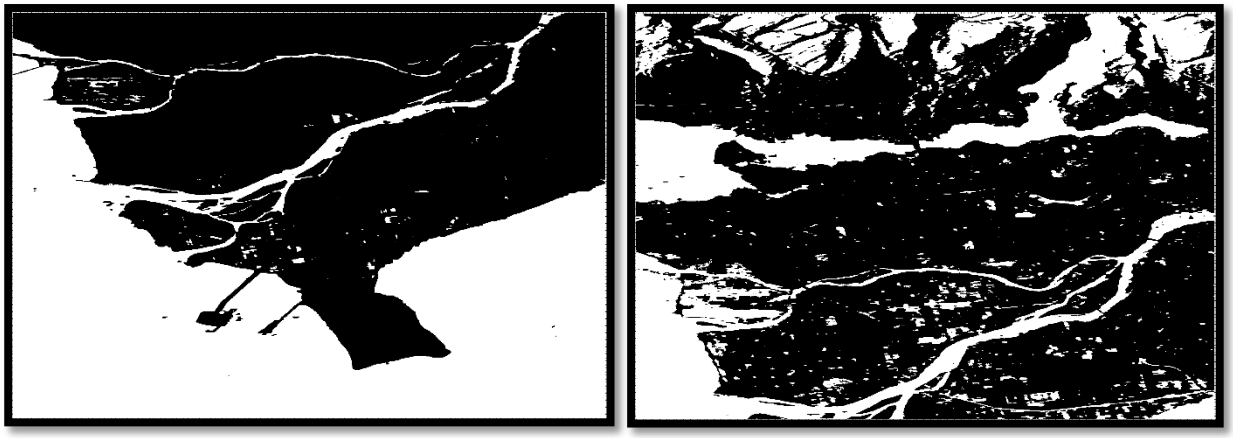


Рисунок 1 – Примеры сегментации изображений по алгоритму АС

Глава 3. Алгоритмы повышения достоверности сегментации радиолокационных изображений для определения водной поверхности и суши

Проведено экспериментальное исследование лучшего способа принятия решений о классе пикселей, позволяющего выполнить комплексирование результатов сегментаций каналов изображения с различными видами поляризации с наибольшей достоверностью. Исследовались следующие способы принятия решений: классический принцип большинства, принцип большинства с учетом равенства «голосов», строгое согласие, мягкое согласие и взвешенное голосование. Лучший результат показало взвешенное голосование, которое для полнополяризационного радиолокационного изображения определяет значение пикселя v по формуле:

$$v = \omega_{VV} v_{VV} + \omega_{VH} v_{VH} + \omega_{HH} v_{HH} + \omega_{HV} v_{HV}, \quad (7)$$

где v_i – результат сегментации i-го канала ($v_i = 1$, если пиксель – вода, и $v_i = 0$, если пиксель – суша), ω_i – вес i-го канала. Полученное таким образом

значение сравнивается с заданным порогом t и, если $v \geq t$, пиксель классифицируется как вода, иначе – как суша.

Предложен алгоритм комплексирования результатов сегментации многоканального радиолокационного изображения с помощью взвешенного голосования (**Положение 2**), имеющий две разновидности.

Первый вариант алгоритма подразумевает комплексирование результатов сегментаций, полученных с помощью АС, по каждому виду поляризации. Параметры взвешенного голосования следующие: для всех текстурных признаков набор весов каналов $\omega = \{0{,}3; 0{,}2; 0{,}3; 0{,}2\}$, значение порога $t = 0{,}6$ для энергии и энтропии и $t = 0{,}5$ для гомогенности. Выполнена оценка изменения достоверности сегментации на основе сравнения средней по четырем каналам и после применения алгоритма комплексирования. В результате экспериментов среднее увеличение достоверности составило **0,56 %** (0,51 % по признаку энергии, 0,55 % по признаку гомогенности и 0,62 % по признаку энтропии), а максимальное – **1,42 %**.

Второй вариант алгоритма предусматривает расширение набора данных для принятия решений путем добавления результата сегментации, выполненной на основе поляриметрической классификации: $\omega = \{\omega_{VV}; \omega_{VH}; \omega_{HH}; \omega_{HV}; \omega_{Pol}\}$. Значения весов и порогов следующие: для признаков энергии и гомогенности веса $\omega_1 = \{0{,}23; 0{,}18; 0{,}23; 0{,}18; 0{,}18\}$ с порогами $t = 0{,}59$ и $t = 0{,}46$ соответственно, а для признака энтропии – $\omega_2 = \{0{,}22; 0{,}17; 0{,}22; 0{,}17; 0{,}22\}$ и $t = 0{,}44$. По результатам оценок средний прирост в достоверности составил **0,58 %** (0,61 % по признаку энергии, 0,54 % по признаку гомогенности и 0,59 % по признаку энтропии), а максимальный – **0,99 %**, таким образом, средняя достоверность сегментации этого варианта алгоритма немного выше. Следует отметить, что каждое полученное увеличение достоверности соответствует корректной классификации нескольких км^2 поверхности Земли на одном радиолокационном изображении.

Примеры сегментации, получаемой с помощью комплексирования по каждому из вариантов алгоритма, приведены на рисунке 2. Слева – результат выполнения первого варианта алгоритма при текстурном анализе на основе признака энтропии, справа – результат выполнения второго варианта алгоритма при текстурном анализе на основе признака энергии. В обоих случаях заметно устранение части ошибочной сегментации суши в класс водной поверхности.

Предложен алгоритм формирования маски классов поверхности по результатам анализа относительных значений высот из цифровой модели рельефа (**Положение 3**), также имеющий две разновидности. *В первом случае* образуются классы «вода», «не вода» и «не определено», после чего выполняется комплексирование с имеющимися результатами сегментации. *Во втором случае* выполняется аналогичное формирование маски, по завершении которого классы «не вода» и «не определено» объединяются в один, представляющий сушу, а получившаяся маска становится результатом сегментации изображения.

В основе формирования маски классов лежит анализ относительных значений высот участка местности в форме оконной обработки: малое окно содер-

жит целевой фрагмент изображения, для которого принимается решение о его принадлежности классу воды целиком, большое окно содержит некоторую окрестность, которая дает представление об относительном положении анализируемого участка рельефа.

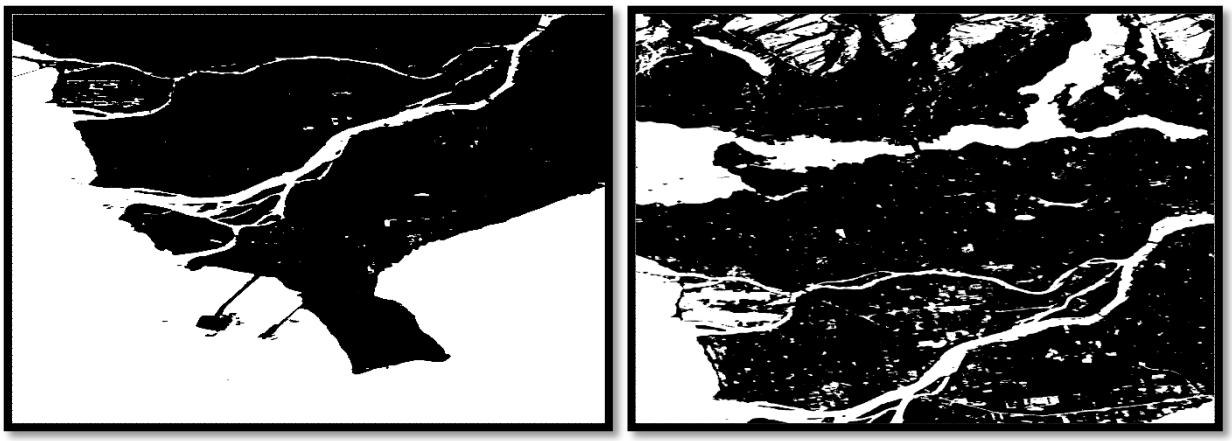


Рисунок 2 – Примеры повышения достоверности сегментации изображений с помощью взвешенного голосования

Основная обработка подразумевает сравнение среднего значения высоты в малом H_s и большом H_l окнах. Водные объекты естественного происхождения (озера, реки, моря и т.д.) обычно не подвержены резким перепадам высот и располагаются в низинах, соответственно, их уровень ниже окрестности, однако при удалении от берега такая разница становится нулевой. С учетом вышесказанного, пиксели малого окна классифицируются как «*вода*», если выполняется условие $H_s \leq H_l$ и если малое окно однородно (местность имеет постоянную высоту).

На ЦМР плавные изменения в высоте, присущие водным объектам, представляются скачкообразно, с четкой линейной границей, что нарушает условие однородности. Чтобы корректно идентифицировать подобные случаи, вводится проверка линейности границы между двумя соседними уровнями высот. Для этого сначала извлекаются координаты всех граничных точек $\{(x_i, y_i)\}$, после чего рассчитывается центр масс данной границы $m_x = \frac{\sum x_i}{N}$, $m_y = \frac{\sum y_i}{N}$, где m_x, m_y – координаты центра масс, N – число граничных точек. Дальнейшие вычисления производятся относительно его координат, что позволяет устранить влияние положения границы внутри обрабатываемого окна. Рассчитываются вторые центральные моменты инерции относительно осей X и Y S_{xx} и S_{xy} и центробежный момент S_{xy}: $S_{xx} = \frac{\sum(x_i - m_x)^2}{N}$, $S_{yy} = \frac{\sum(y_i - m_y)^2}{N}$, $S_{xy} = \frac{\sum(x_i - m_x)(y_i - m_y)}{N}$. Далее с помощью метода главных компонент вычисляется угол ориентации главной оси инерции $\theta = 0{,}5 \cdot \operatorname{arctg}(\frac{2S_{xy}}{S_{xx} - S_{yy}})$ и производится поворот системы координат на угол θ, в результате чего ось X начинает совпадать с главной осью инерции. Последним шагом является оценка ошибки

$E_1 = \frac{\sum y_i'^2}{N}$, где y_i' – ордината граничных точек в новой системе координат. При $E_1 < 0{,}25$ граница идентифицируется как линейная, что означает выполнение условия однородности в малом окне.

При оконной обработке также определяются участки рельефа, которые однозначно не являются водными объектами. Проверяются три условия, при выполнении одного из них малое окно классифицируется как «*не вода*»:

1) средняя высота в малом окне превышает среднюю высоту в большом окне на некоторую величину δ, т.е. $H_s > H_l + \delta$;

2) малое окно содержит сильную неоднородность (количество уникальных значений высоты *K* больше пороговой величины *k*);

3) величина наклона поверхности *Sl* превышает пороговое значение α.

В класс «*не определено*» помещаются оставшиеся пиксели изображения, для которых в ходе оконной обработки не были выполнены условия классов «вода» и «не вода».

Блок-схема алгоритма формирования маски классов поверхности имеет вид, представленный на рисунке 3. Здесь S и L – размеры малого и большого окна обработки, W и H – ширина и высота изображения.

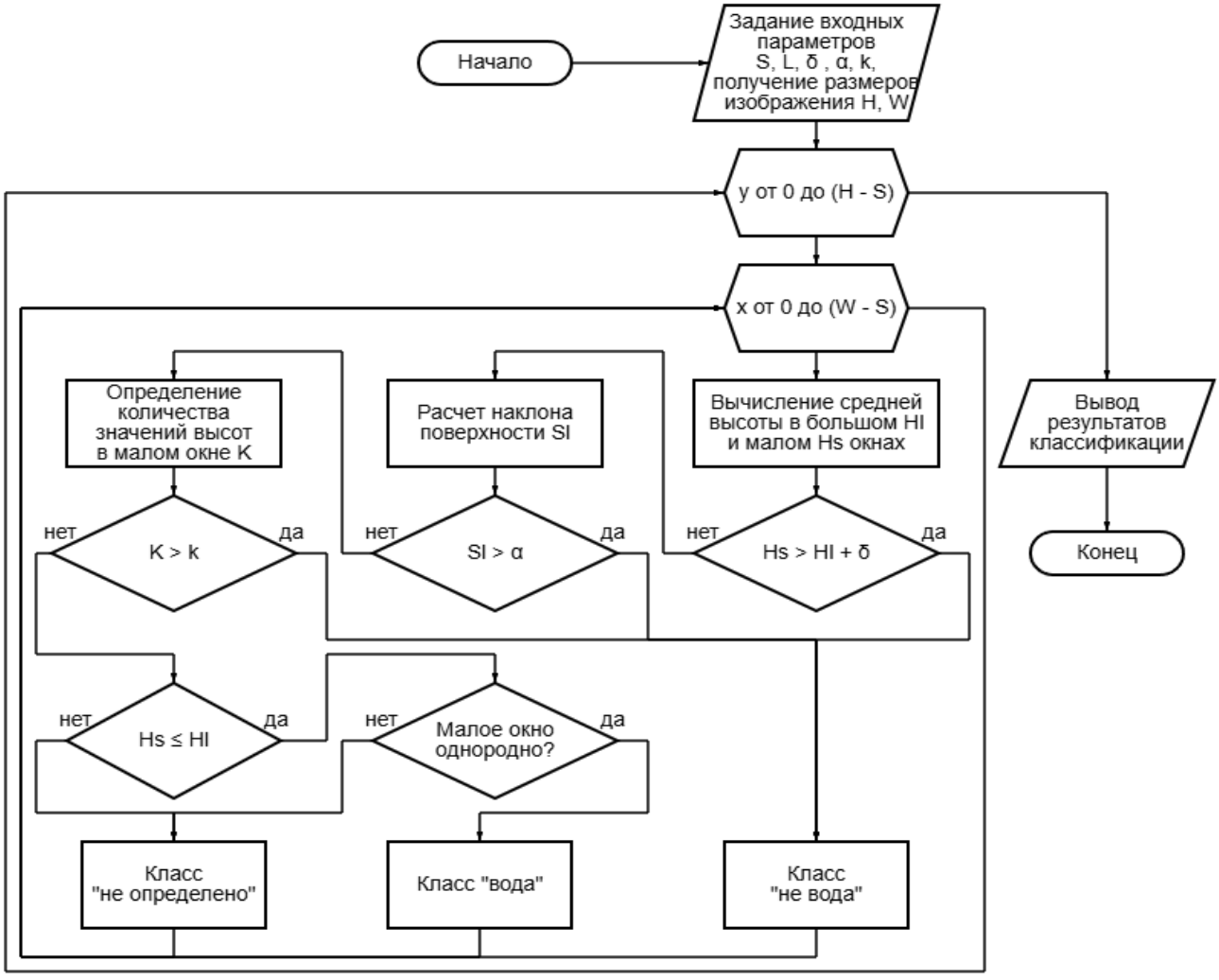


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма формирования маски классов поверхности

Примеры сформированных масок классов поверхности приведены на рисунке 4. Белым цветом обозначен класс «вода», черным цветом – класс «не вода», серым цветом – класс «не определено».

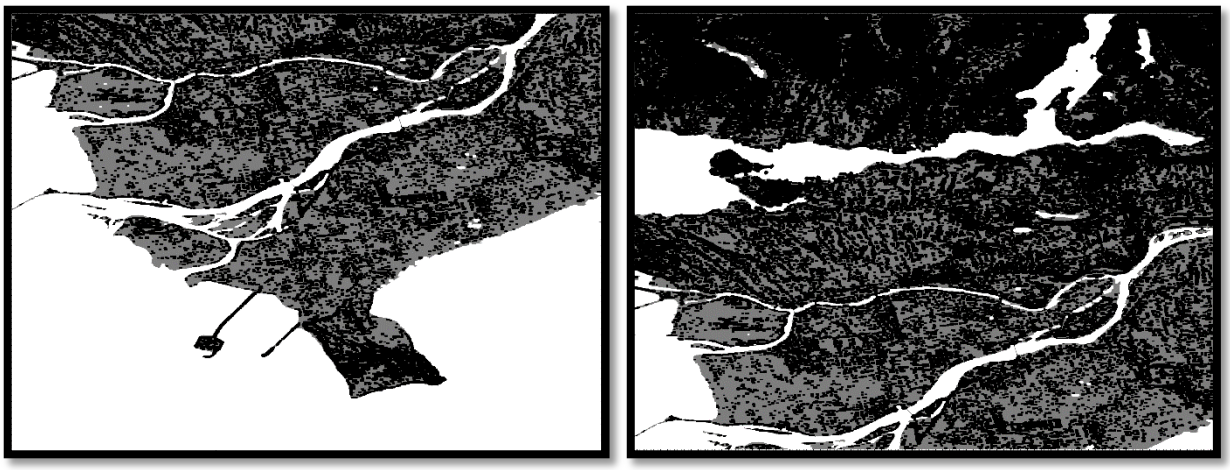


Рисунок 4 – Сформированные маски классов поверхности

Такая маска предназначена для уточнения имеющихся результатов сегментации и должна быть комплексирована с ними следующим образом. Класс «не вода» полностью сохраняется на выходном изображении, класс «не определено» заменяется результатами исходной сегментации, а класс «вода» может быть использован по-разному. Установлено, что существуют неводные объекты, которые имеют характер относительных высот, удовлетворяющий критериям класса «вода» (большое поле, долина между гор и др.). В связи с этим невозможно гарантировать, что определенный как вода участок поверхности действительно ей является.

Таким образом, в зависимости от количества фрагментов на маске, предположительно некорректно отнесенных к классу «вода», целесообразно использовать следующие варианты комплексирования:

1) при малом количестве ложных классификаций пиксели класса «вода» полностью сохраняются на выходном изображении;

2) при среднем и большом количестве ложных классификаций на выходном изображении сохраняются только те пиксели класса «вода», которые относятся к воде и на исходном изображении, остальные маркируются как суша.

Данные ограничения показывают, что достоверность формирования класса «вода» сильно ниже, чем класса «не вода». В связи с этим при отсутствии на исходном изображении ошибочно сегментированных зон суши, обладающих характерным рельефом неводных объектов (например, теневых склонов), комплексирование с маской классов *может* привести к росту достоверности сегментации. В то же время наличие таких зон *гарантирует* повышение достоверности сегментации в результате комплексирования.

Проведена оценка изменения достоверности сегментации при комплексировании с маской классов поверхности. Полученные результаты соответствуют ожиданиям: при обработке изображений с плоским рельефом местности достоверность незначительно изменяется, а в случае наличия характерного рельефа – значительно увеличивается. Для изображений с зонами ложной сегментации

суши, вызванной наличием теневых склонов рельефа, был достигнут максимальный прирост в достоверности на **3,44 %**, средний – на **1,40 %**.

Пример уточнения результатов сегментации изображений по маске классов поверхности приведен на рисунке 5. Слева – исходный результат сегментации канала изображения с поляризацией *VV* по признаку энергии, справа – после комплексирования. Заметно практически полное устранение зон ошибочной сегментации теневых склонов гор.

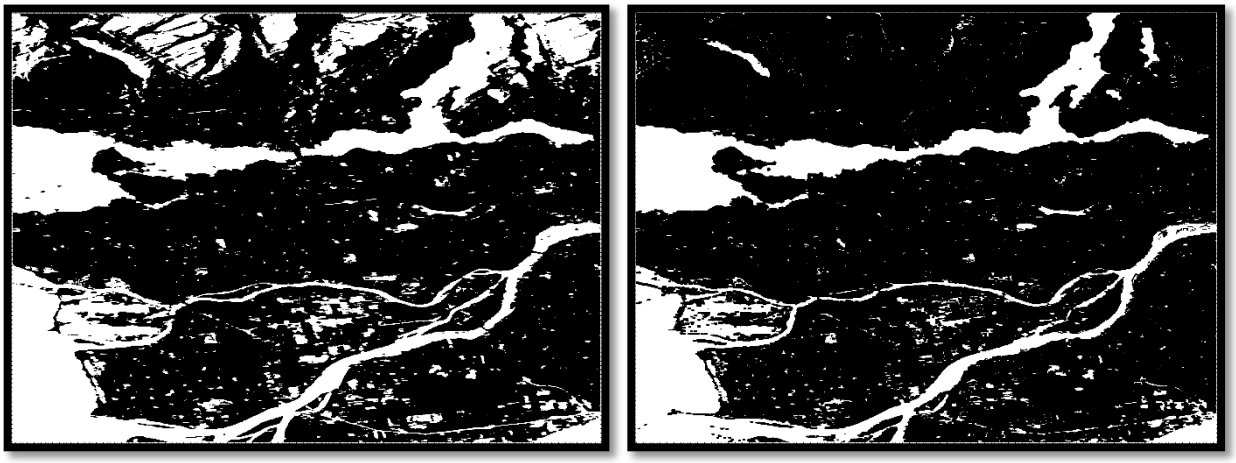


Рисунок 5 – Пример комплексирования результата сегментации изображения (поляризация *VV*) по АС на основе текстурного признака энергии с маской классов поверхности

Второй способ использования маски классов поверхности предполагает выполнение сегментации целиком на ее основе. Для этого классы «не вода» и «не определено» объединяются в один класс, который представляет сушу. Проведена оценка достоверности сегментации, получаемой указанным способом. Минимальное значение составило **93,25 %**. Примеры полученных результатов сегментации приведены на рисунке 6.

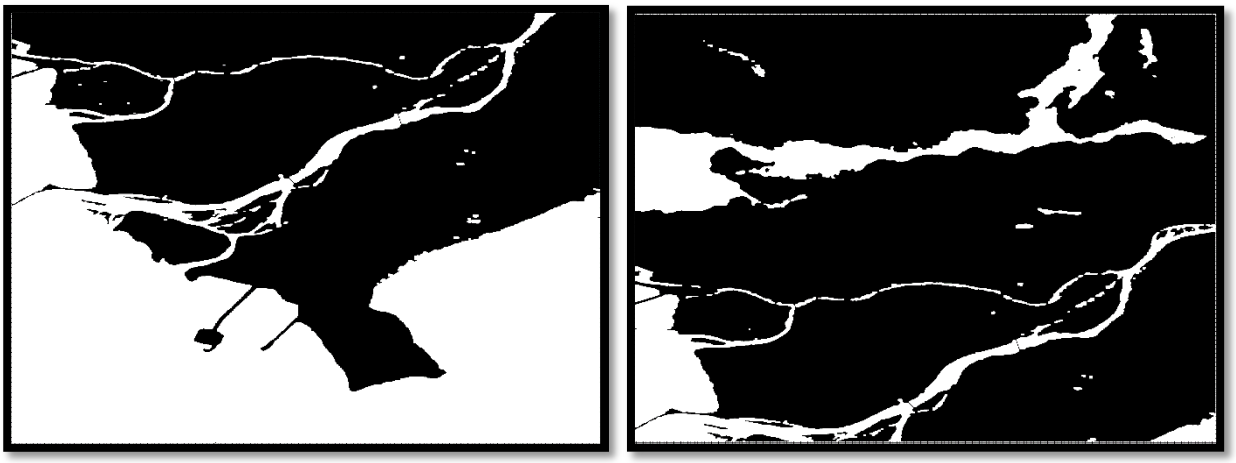


Рисунок 6 – Примеры сегментации изображений целиком на основе маски классов поверхности

Глава 4. Экспериментальные исследования разработанных алгоритмов сегментации радиолокационных изображений

Ставится задача получить достоверное подтверждение характеристик выдвинутых на защиту Положений на основе статистически представительной информации. Исследования в главе 4 проводились на 27 уникальных сценах местности, представленных на 80 натурных радиолокационных изображениях от космических аппаратов «RadarSat-2» и «Sentinel-1», которые представляют собой как полные маршруты съемки, так и их фрагменты.

Положение 1. Выполнена сегментация 80 изображений по АС. Средние значения достоверности сегментации при использовании АКМГ и K-Means++ для определения центров кластеров, а также результаты замера времени выполнения алгоритмов для текстурных признаков энергии и гомогенности (для энтропии подобные замеры нецелесообразны) приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты экспериментов по оценке АС

Признак	$\overline{Acc}_{\text{АКМГ}}$	$\overline{Acc}_{KM}$	$\bar{t}_{TA}$, **с**	$\bar{t}_{\text{АКМГ}}$, **мс**	$\bar{t}_{KM}$, **с**
Энергия	0,9348	0,9320	31,56	432	36,51
Гомогенность	0,9559	0,9488	36,89	465	44,32
Энтропия	0,9445	0,9331	–	–	–

Во всех экспериментах достоверность сегментации превысила 90 %, что является удовлетворительным результатом работы АС. При этом **обеспечивается** повторяемость результатов сегментации, а также повышение быстродействия в среднем на 45 %.

Положение 2. Выполнено исследование *первого варианта* алгоритма комплексирования на 15 полнополяризационных изображениях. Полученные оценки среднего $\overline{\Delta Acc}$ и максимального $\Delta Acc_{\text{макс}}$ изменения достоверности приведены в таблице 3. Среднее повышение достоверности **превышает** значения, полученные в главе 3.

Таблица 3 – Среднее и максимальное изменение достоверности сегментации при комплексировании по первому варианту алгоритма

Текстурный признак	$\overline{\Delta Acc}$, **%**	$\Delta Acc_{\text{макс}}$, **%**
Энергия	+0,97	+1,36
Гомогенность	+0,91	+1,86
Энтропия	+0,74	+2,42

Выполнено исследование *второго варианта* алгоритма комплексирования на той же выборке данных. Полученные оценки изменения достоверности приведены в таблице 4. Среднее повышение достоверности также **превышает** полученное в главе 3.

Таблица 4 – Среднее и максимальное изменение достоверности сегментации при комплексировании по второму варианту алгоритма

Текстурный признак	$\overline{\Delta Acc}$**, %**	$\Delta Acc_{\text{макс}}$**, %**
Энергия	+1,26	+1,53
Гомогенность	+0,85	+1,29
Энтропия	+1,15	+2,47

Таким образом, оба варианта алгоритма комплексирования **обеспечивают** стабильное повышение достоверности сегментации.

Положение 3. Исследование достоверности сегментации при комплексировании исходных результатов сегментации с маской классов поверхности проводилось на 12 изображениях, содержащих теневые склоны рельефа. Средний прирост в достоверности составил **2,98 %**, а максимальный – **4,67 %**.

При сегментации 27 изображений с уникальными сценами целиком на основе сформированных масок классов поверхности минимальная достоверность составила **93,65 %**. При этом результаты в некоторых случаях превысили значения, полученные по первому варианту алгоритма, что делает целесообразным использование обеих разновидностей.

Таким образом, экспериментальные оценки обеих разновидностей алгоритма формирования маски классов поверхности **подтверждают** полученные ранее результаты.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации предложен ряд алгоритмов, позволяющих повысить повторяемость и достоверность сегментации радиолокационных изображений для определения водной поверхности и суши в системах обработки данных дистанционного зондирования Земли. Основные результаты работы состоят в следующем.

1. Выполнен анализ существующих алгоритмов сегментации водной поверхности и суши на радиолокационных изображениях. Определен основной недостаток наиболее универсального решения на основе кластеризации по методу *k*-средних. Определены актуальные направления научных исследований в области повышения повторяемости и достоверности результатов целевой сегментации, которые составили основное содержание диссертации в виде Положений, вынесенных на защиту.

2. Разработан алгоритм сегментации АС радиолокационных изображений для определения водной поверхности и суши на основе детерминированного алгоритма адаптивной кластеризации по максимумам гистограммы (**Положение 1**). Проведено сравнение предложенного алгоритма с ближайшим аналогом на основе K-Means++. Показана наибольшая средняя по четырем каналам (видам поляризаций) достоверность результатов сегментации, а также снижение общего времени вычислений на 35–50 % благодаря большей скорости опреде-

ления кластеров. Полученные во всех экспериментах значения достоверности сегментации с помощью АС составили не менее 90 %.

3. Разработан алгоритм комплексирования результатов сегментации многоканального радиолокационного изображения с помощью взвешенного голосования (**Положение 2**). Предложены два варианта алгоритма с различными значениями параметров взвешенного голосования, в зависимости от набора исходных данных. В проведенных экспериментах было достигнуто повышение достоверности сегментации до 2,5 % относительно результатов, полученных по АС.

4. Разработан алгоритм формирования маски классов поверхности на основе анализа относительных значений высот по данным цифровой модели рельефа (**Положение 3**). Предложены два варианта применения алгоритма: для уточнения имеющихся результатов сегментации при наличии на изображении теневых склонов рельефа (повышение достоверности составило до 4,7 %) и для получения новых (с достоверностью не менее 93 %).

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях по списку ВАК

1. Гусев С.И., Кузнецов Л.Л. Метод кластеризации на основе анализа максимумов гистограммы в задачах сегментации изображений в системах дистанционного зондирования Земли. // Перспективы науки. 2025. № 6 (189). С. 39–43.

2. Гусев С.И., Кузнецов Л.Л. Принятие решений о классе пикселей многоканального радиолокационного изображения по результатам классификации пикселей отдельных каналов в системах дистанционного зондирования Земли // Перспективы науки. 2025. № 7 (190). С. 15–19.

3. Гусев С.И., Кузнецов Л.Л. Классификация объектов радиолокационных изображений по признаку принадлежности к водной поверхности на основе текстурного анализа в системах дистанционного зондирования Земли // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2025. Т. 17. № 3. С. 22–28.

4. Кузнецов Л.Л. Алгоритм повышения достоверности классификации объектов радиолокационных изображений по критерию принадлежности к водной поверхности или суше с использованием цифровой модели рельефа // Вестник РГРТУ. 2026. № 95. С. 202–214.

Статьи и тезисы докладов в материалах конференций

5. Гусев С.И., Кузнецов Л.Л. Сравнительный анализ методов поляриметрической классификации объектов на радиолокационных изображениях // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2024. Сб. тр. VII Междунар. науч.-техн. фор. В 10-ти т. Рязань: РГРТУ, 2024. Т. 6. С. 34–38.

6. Гусев С.И., Кузнецов Л.Л., Ушенкин В.А. Обнаружение водной поверхности на полнополяризационных радиолокационных изображениях // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2025. Сб. тр. VIII Междунар. науч.-техн. фор. В 10-ти т. Рязань: РГРТУ, 2025. Т. 6. С. 58–61.

7. Кузнецов Л.Л. Обзор методов классификации объектов на радиолокационных изображениях // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2023. Сб. тр. VI Междунар. науч.-техн. фор. В 10-ти т. Под общ. ред. О.В. Миловзорова. Рязань: РГРТУ, 2023. Т. 6. С. 172–175.

8. Кузнецов Л.Л. Применение текстурного анализа для классификации объектов на радиолокационных изображениях // Материалы 13-й Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». Москва: ВНИИЭМ, 2025. С. 104–105.

9. Гусев С.И., Кузнецов Л.Л. Сравнительный анализ методов поляриметрической классификации объектов при обработке радиолокационных изображений // Космические технологии - 2024. Сб. науч. стат. Междунар. межведомственнонауч.-техн. конф. Москва: МИРЭА, 2024. С. 298–300.

10. Кузнецов Л.Л. Алгоритм обнаружения водной поверхности на радиолокационных изображениях с помощью цифровой модели рельефа в системах ДЗЗ // Новые информационные технологии в научных исследованиях. Материалы XXX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязань: РГРТУ, 2025. С. 138–139.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

11. Свидетельство №2025693785. Программа уточнения классификации пикселей радиолокационного изображения по признаку принадлежности к водной поверхности или суше с помощью цифровой модели рельефа: программа для ЭВМ / Л.Л. Кузнецов; правообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ им. В.Ф. Уткина». Заявка № 2025693208 от 02.12.2025.

12. Свидетельство №2025693786. Программа текстурной классификации пикселей радиолокационного изображения по признаку принадлежности к водной поверхности или суше: программа для ЭВМ / Л.Л. Кузнецов; правообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ им. В.Ф. Уткина». Заявка № 2025693209 от 02.12.2025.

13. Свидетельство №20256662503. Программа объединения результатов текстурной и поляриметрической классификации пикселей радиолокационного изображения по признаку принадлежности к водной поверхности или суше: программа для ЭВМ / Л.Л. Кузнецов; правообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ им. В.Ф. Уткина». Заявка № 2026662416 от 29.04.2026.

14. Свидетельство №20256662605. Программа классификации объектов фрагмента цифровой модели рельефа по признаку принадлежности к водной поверхности или суше: программа для ЭВМ / Л.Л. Кузнецов; правообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ им. В.Ф. Уткина». Заявка № 2026662479 от 29.04.2026.

Кузнецов Леонид Львович

АЛГОРИТМЫ СЕГМЕНТАЦИИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И СУШИ В СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Бумага офисная. Печать цифровая.
Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет
имени В.Ф. Уткина
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1