

Санкт-Петербургский государственный университет

**ИШАЛИНА Ольга Тимофеевна**

**Выпускная квалификационная работа**

**ДЕШИФРИРОВАНИЕ ГЕОМОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ДНЕВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОКРОВНЫХ ЛЕДНИКОВ ПО  
МАТЕРИАЛАМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Уровень образования: магистратура

Направление 05.04.03 «Картография и геоинформатика»

ВМ.5523 «Геоинформационное картографирование»

Научный руководитель:

к.т.н., доцент СПбГУ

Тюрин Сергей Вячеславович

Рецензент:

д.т.н., ведущий научный сотрудник, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

Флоринский Игорь Васильевич

Санкт-Петербург

2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. СТАНЦИЯ ПРОГРЕСС И ЕЕ РОЛЬ В ИССЛЕДОВАНИИ АНТАРКТИДЫ .....	5
1.1.История отечественных антарктических экспедиций.....	5
1.2.Российская научная станция Прогресс .....	8
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕДНИКОВЫХ ТРЕЩИН.....	12
2.1.Ледниковые трещины.....	12
2.2.Наземные способы изучения ледниковых трещин.....	15
2.3. Применение дистанционного зондирования Земли в исследовании ледниковых трещин .....	17
ГЛАВА 3. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ .....	22
3.1.Геоморфометрический анализ рельефа .....	22
3.2.Текстура цифровых моделей местности.....	30
3.3. Методы текстурного анализа изображений.....	33
ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	41
4.1. Обоснование выбора методов анализа цифровой модели поверхности ледника.....	41
4.2.Используемые материалы и описание региона .....	42
4.3.Анализ цифровой модели поверхности .....	46
4.3.1.Расчет локальных геоморфометрических характеристик .....	46
4.3.2. Расчет текстурных признаков Харалика.....	49
4.4. Результаты практической части.....	53
4.4.1.Оценка эффективности используемых методов .....	53
4.4.2.Обнаружение новых трещин .....	56
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	60
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	61
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	65
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	68

## ВВЕДЕНИЕ

Российские научные исследования в Антарктиде начались в середине прошлого века и продолжаются до сих пор. Сегодня на континенте находится пять постоянно - действующих научных станций, из которых одна внутриконтинентальная – станция Восток. Обеспечение ее жизнедеятельности осуществляется санно-гусеничными походами (СГП), а с 2007 года отправным пунктом СГП является станция Прогресс. Однако трасса следования санно-гусеничных походов является небезопасной из-за наличия на ее пути ледниковых трещин. Обнаружение и локализация трещин, также поиск оптимального маршрута санно-гусеничных походов является актуальной задачей. Из всех видов трещин затруднения в их поиске представляют скрытые трещины, а их размеры колеблются от десятков сантиметров до нескольких метров.

В настоящий момент для оперативного выявления скрытых ледниковых трещин не существует однозначного решения. Поскольку речь идет о быстром и в тоже время безопасном способе, сразу же не подходит использование наземных методов исследования ледниковых трещин ввиду непосредственного контакта с поверхностью ледника. Применение данных дистанционного зондирования Земли является безопасным способом при любых географических исследованиях, поскольку не требует обязательного присутствия человека на исследуемых объектах. Аэрофотосъемка как вид дистанционного зондирования применяется при крупномасштабных картографических работах, поэтому предположительно может быть использована для поиска скрытых трещин. При этом особый интерес вызывают возможности анализа цифровых моделей поверхности, как результата аэрофотосъемки. Причиной этому является неявное изображение скрытых трещин на ортофотоплане и тот факт, что ледниковые трещины являются формами ледникового рельефа.

Данная работа посвящена актуальной проблеме – поиску методов обнаружения ледниковых трещин с использованием данных дистанционного зондирования Земли. Цель работы заключается в разработке методики выделения скрытых ледниковых трещин на основе анализа цифровой модели дневной поверхности покровного ледника.

Поставленная цель предполагает решение следующих задач:

- Изучить существующие подходы к исследованию и поиску ледниковых трещин;
- Ознакомиться с особенностями географического положения станции Прогресс;
- Изучить методы анализа цифровых моделей местности;
- Провести текстурный и геоморфометрический анализ цифровых моделей поверхности ледника;

- Оценить эффективность использования текстурного и геоморфометрического анализов цифровых моделей местности для обнаружения скрытых ледниковых трещин.

Объектом исследования является цифровая модель дневной поверхности покровного ледника на участок санно-гусеничного похода между станциями Восток и Прогресс длиной 30 км, в качестве предмета исследования выступают ледниковые трещины данного района.

# ГЛАВА 1. СТАНЦИЯ ПРОГРЕСС И ЕЕ РОЛЬ В ИССЛЕДОВАНИИ АНТАРКТИДЫ

## 1.1. История отечественных антарктических экспедиций

22 декабря 1954 года президент Академии наук СССР А.Н. Несмеянов, министр морского флота СССР В. Г. Бакаев, министр рыбной промышленности СССР А.А. Ишков и исполняющий обязанности начальника ГУГМС при Совмине СССР М.Е. Иванов отправили в адрес Первого секретаря ЦК КПСС Н.С. Хрущева письмо с предложением о создании с 1955 года советской Антарктической научно-исследовательской экспедиции для комплексного изучения Антарктиды и создания постоянных полярных станций на материке и островах (Саватюгин, Преображенская, 1999). Главными задачами этой советской Антарктической экспедиции предлагалось считать:

- метеорологические и геофизические исследования для изучения циркуляции атмосферы в Антарктике;
- геологическое изучение Антарктиды;
- комплексное океанографическое изучение региона для обеспечения безопасности мореплавания и эффективного проведения китобойного промысла;
- изучение ледяного покрова Антарктиды, шельфовых и морских льдов океана;
- разработку методов аэронавигации в условиях Антарктики с целью подготовки пилотов для полетов в любых районах земного шара.

Данное предложение было поддержано в ЦК КПСС, и 13 июля 1955 года Совет Министров СССР издал Постановление об организации Комплексной антарктической экспедиции (КАЭ). С этого момента начала деятельность национальная антарктическая экспедиция, которая за свою историю не раз меняла название: Комплексная, Советская и Российская антарктическая экспедиция. Условно весь период деятельности антарктической экспедиции делится на три этапа (Лукин, 2014).

Первый этап (1955 — 1969 гг.) можно назвать рекогносцировочным. Были выявлены основные закономерности и черты географического, геологического, климатического, гляциологического, океанографического и биологического строения и режима Антарктиды (Саватюгин, 1999). В этот период в Антарктиде появились станции Мирный (1956 г.), Оазис (1956 — 1959 гг.), Пионерская (1956 — 1959 гг.), Комсомольская (1957 — 1959 гг.), Восток (1957 г.), Советская (1958 — 1959 гг.), Молодежная (1963 — 1999 гг.), Лазарев (1959 — 1961 гг.), Новолазаревская (1961 г.) и Беллинсгаузен (1968 г.), а также сезонная полевая база Полюс недоступности (декабрь 1958 г.).

Специалистами КАЭ была разработана технология и успешно осуществлена целая серия внутриконтинентальных санно-гусеничных походов научного и логистического назначения (Лукин, 2014).

Второй этап был связан с изучением и освоением ресурсного потенциала Антарктики, проходил с 1970 по 1991 г. Основное внимание советских исследований Антарктики было направлено на изучении биологических ресурсов Южного океана и минерально-сырьевого потенциала региона. С этой целью коренным образом была изменена технология геологического изучения Антарктики, которое до этого в САЭ проводилось на выходах коренных пород в районе расположения советских антарктических станций или специально созданных сезонных полевых лагерей (Саватюгин, Преображенская, 1999).

В этот период сеть Антарктических станций была дополнена двумя станциями в тихоокеанском секторе - Ленинградская и Русская - и еще станцией Прогресс в индоокеанском секторе. На станции Молодежная был построен и введен в эксплуатацию комплекс высотного ракетного зондирования атмосферы. На станциях Мирный, Молодежная, Ленинградская и Беллинсгаузен была установлена аппаратура для приема информации о состоянии земной поверхности с искусственных спутников Земли. На всех советских антарктических станциях были организованы наблюдения методами спутниковой геодезии (Лукин, 2014).

Третий, современный этап связан с работой Российской антарктической экспедиции. В этот период деятельность РАЭ была направлена на определение роли и места Антарктики в глобальных природных и социальных процессах.

Политико-экономические преобразования в стране привели к сокращению финансирования Антарктических экспедиций. В 1999 г. была закрыта крупнейшая российская (советская) станция Молодежная с последующим ее переводом в статус сезонной полевой базы. Дальнейшая организация РАЭ до 2005 года проводилась под принципом “минимально допустимых параметров”.

В 2002 году были начаты работы по переносу со станции Мирный на станцию Прогресс транспортного узла для проведения санно-гусеничного похода на станцию Восток и строительства снежно-ледового аэродрома на станции Прогресс. Были завершены в конце 2012 года, когда на станции Прогресс были построены новый зимовочный комплекс и взлетно-посадочная полоса, предназначенная для приема транспортных самолетов. Начиная с 2007 года санно-гусеничные походы по обеспечению внутриконтинентальной станции Восток стали проводиться со станции Прогресс, а не со станции Мирный, как это делалось на протяжении 50 лет (Лукин, 2010).

Наиболее крупными инвестиционными проектами по модернизации РАЭ в начале XXI века стали строительство нового зимовочного комплекса на станции Прогресс и научно-экспедиционного судна «Академик Трёшников». К значимым отечественным научным проектам и экспериментам, выполненным Россией в этот период, относятся (Лукин, 2014):

- организация первой в Антарктике дрейфующей научной российско-американской станции Уэдделл-1 в западной части моря Уэдделла в феврале — июне 1992 г.
- создание цифрового интегрального индекса возмущений магнитосферы планеты
- издание Атласа океанов «Антарктика» (Министерство обороны СССР, 2005);
- ввод в эксплуатацию на российских антарктических станциях аппаратуры дифференциальной коррекции параметров орбит спутников навигационной системы ГЛОНАСС
- экологически чистое проникновение в водный слой подледникового озера Восток через ледяной покров 5 февраля 2012 г.

На сегодняшний день в Антарктиде находятся 5 постоянно действующих российских станций: Беллинсгаузен, Восток, Мирный, Новолазаревская, Прогресс, и 4 сезонных: Русская, Молодежная, Ленинградская, Дружная (Рисунок 1).



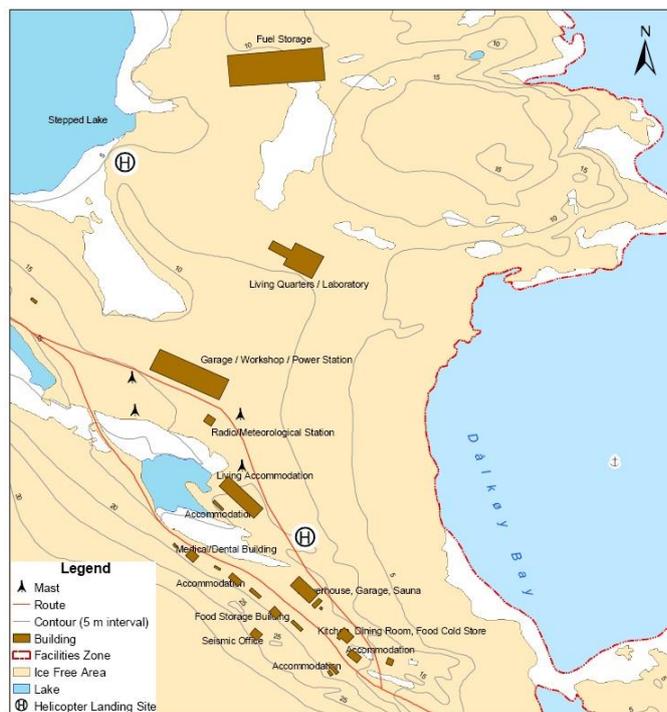
Рисунок 1. Антарктические станции

Продолжительная история отечественных антарктических исследований и работ подразумевала преемственность поколений в структуре КАЭ — САЭ — РАЭ, что помогало не только осваивать новые регионы шестого континента, но и активно внедрять новые методики исследований, транспортных операций, связи и других видов экспедиционных работ. При этом Российская Федерация следует целям обеспечения государственных интересов в Антарктическом регионе и соблюдает нормы международного права (Лукин, 2014).

## 1.2. Российская научная станция Прогресс

Станция Прогресс была открыта в 1989 году и расположилась на восточном берегу бухты Тюленья залива Прюдс в точке с координатами  $69^{\circ} 22' 30''$  ю.ш. и  $76^{\circ} 23' 30''$  в.д. Сооружения станции размещены между холмами Ларсеманн и береговой чертой залива Прюдс на каменисто-песчаном плато на высоте 15,5 м над уровнем моря. Строго говоря, существует станция Прогресс 1 и Прогресс 2. В данном районе на расстоянии около 3 км друг от друга также были построены австралийская летняя научная база (Лоу), китайская постоянная научная станция (Жонг Шан), индийская станция (Бахарти).

Станция Прогресс 1 (рисунок 2) в 1992 году была частично демонтирована и вывезена. На территории станции осталось одно функционирующее здание, используемое для хранения оборудования. Прогресс 2 находится на расстоянии около 1 км к югу от станции Жонг Шан. Станция была построена в 1988 г. на плато в 300 м от западной береговой линии залива Долк, чтобы облегчить доставку материалов с судов снабжения. Кроме того, это место лучше защищено от непогоды по сравнению со станцией Прогресс 1. Станция Прогресс 2 использовалась лишь периодически и была закрыта летом 1994 г., однако в течение летнего сезона 1998 года была вновь открыта и сегодня работает как круглогодичный научный комплекс. Прогресс 2 служит, главным образом, базой поддержки при проведении внутриконтинентальных геологических и гляциологических исследований и является транспортно-логистическим центром для посещения южной части залива Прюдс и внутренних районов антарктического континента, особенно станции Восток (XXVII КСДА).



*Рисунок 2. Карта станции Прогресс*

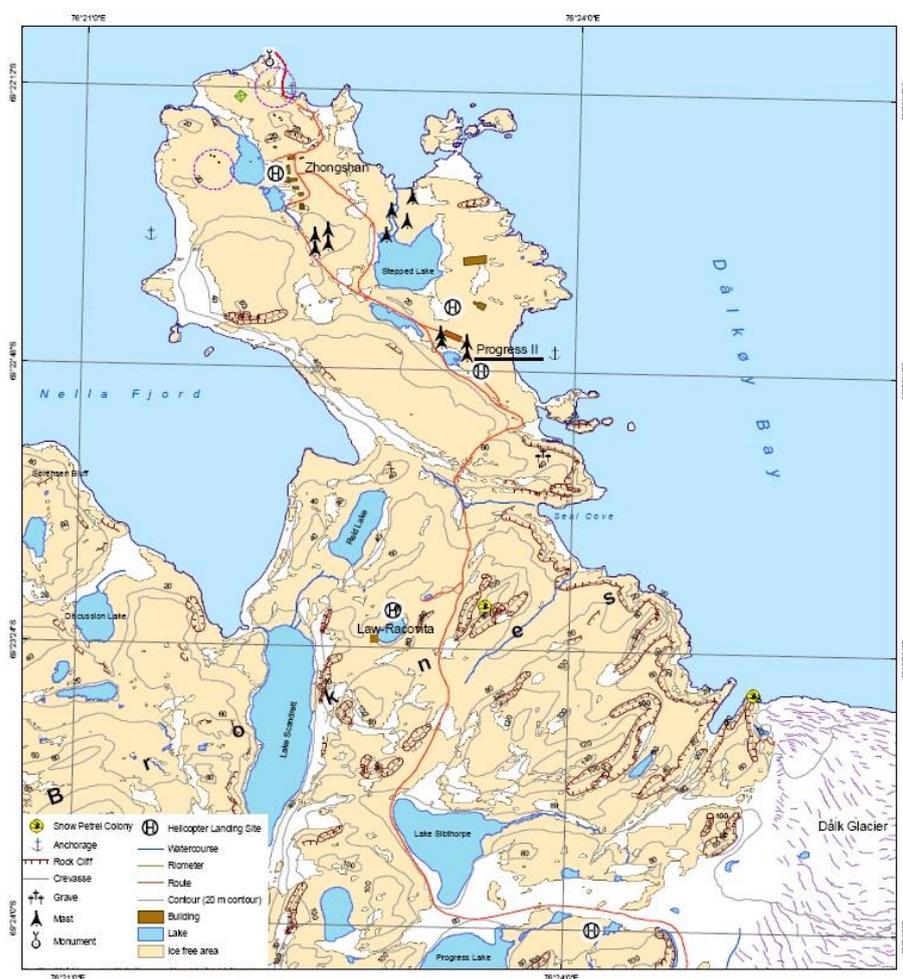
Ключевым объектом территории являются Холмы Ларсерманн (рисунок 3). Территория Холмов Ларсеманн в 1935 году была впервые нанесена на карту норвежской экспедицией под руководством Кристенсена. Холмы Ларсеманн – это свободная от ледникового покрова территория, площадь которой 40 км<sup>2</sup>, расположена между Холмами Вестфолд и шельфовым ледником Амери на юго-восточном берегу залива Прюдс. В состав этой территории, не имеющей ледникового покрова, входят два крупных полуострова (Сторнес и Брокнес), четыре небольших мыса и около 130 прибрежных островков. Самый восточный полуостров – Брокнес – в свою очередь, разделен фьордом Нелла на западную и восточную части (XXVII КСДА).

Ледовая обстановка в районе залива Прюдс характеризуется наличием ледника Долк, расположенного к востоку от холмов Ларсерманн и продуцирующего крупные айсберги. У побережья обычно находится много айсбергов и их обломков. Ледовая обстановка улучшается при западном ветре, но повторяемость этого направления в районе станции незначительна. В летний период залив освобождается ото льда, исключение составляют фьорды, где вскрытие льда в некоторые сезоны не происходит (XXVII КСДА).

Крупные элементы рельефа территории имеют продолговатую форму и объясняются композиционной слоистостью и наличием складок и разломов (линеаментов) в метаморфических коренных породах. Линия берега, в основном, представлена коренными породами, а пляжи встречаются только в вершинах фьордов или в изолированных защищенных заливах. Присутствует несколько цепочек озер, подпруженных ледниками, а

также связанных с ними ущелий и аллювиальных конусов выноса. Прибрежные островки обычно представляют собой «бараньи лбы», отделенные современным морем. Часто встречаются формы рельефа, образовавшиеся под воздействием ветра. Кроме того, здесь встречаются перигляциальные формы рельефа, хотя они не особенно многочисленны и не очень развиты. На территории холмов Ларсеманн имеется свыше 150 озер(XXVII КСДА).

Относительно мягкий микроклимат и наличие пресной воды летом создают достаточно благоприятные условия для развития форм жизни, характерных для Антарктики. Здесь обитают малые снежные буревестники, качурки Вильсона и южнополярные поморники. Недалеко от берега есть залежки тюленей Уэдделла, где они выводят потомство и переживают линьку. На территории Района встречаются многочисленные пятна мхов, лишайников и цианобактерий.



*Рисунок 3. Карта Холмов Ларсерманн*

За пределами п-ова Брокнес очень мало следов человеческого присутствия: единственными заметными искусственными объектами являются вешки, используемые как ориентиры при проведении топографических обследований и фотосъемки.

В 2007 г. на основании совместного предложения Австралии, Китая, Индии, Румынии и Российской Федерации холмы Ларсеманн были определены в особо управляемый район Антарктики (ОУРА).

## ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕДНИКОВЫХ ТРЕЩИН

### 2.1. Ледниковые трещины

Ледниковые трещины – явление, характерное для всех типов ледников. Трещиной называют разрыв ледника, образовавшийся в результате его движения.

Ледник состоит из монолитной метаморфической ледяной породы. По происхождению все трещины подразделяются на два типа: нетектонические и тектонические. Нетектонические трещины возникают в горных породах на поверхности Земли или вблизи нее под действием сил, связанных с экзогенными геологическими и антропогенными процессами или с изменением температуры, влажности, плотности пород. Тектонические трещины имеют наиболее широкое распространение в породах земной коры. Они возникают в результате напряжений, вызванных тектоническими движениями земной коры. Ледниковые трещины относят к неотектоническому типу (Елифанцев, Плетенчук, 2008).

В то время как основная структура ледника обусловлена стратиграфией снежного покрова, трещины являются одной из вторичных структур, образованные в ходе деформации. Ширина трещин может варьироваться от миллиметров (зарождающиеся трещины, стенки которых еще соприкасаются) до нескольких метров (Colgan et al., 2016). По степени открытости трещины разделяют на скрытые, закрытые (стенки плотно прижаты), открытые, залеченные трещины, т.е. частично или полностью заполненные (Елифанцев, Плетенчук, 2008). Кроме того, выделяют типы трещин по их положению и ориентации на леднике (рисунок 4).

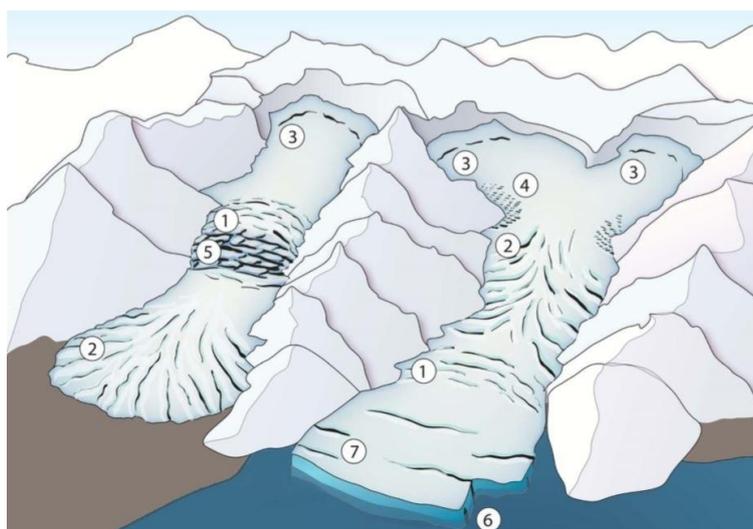
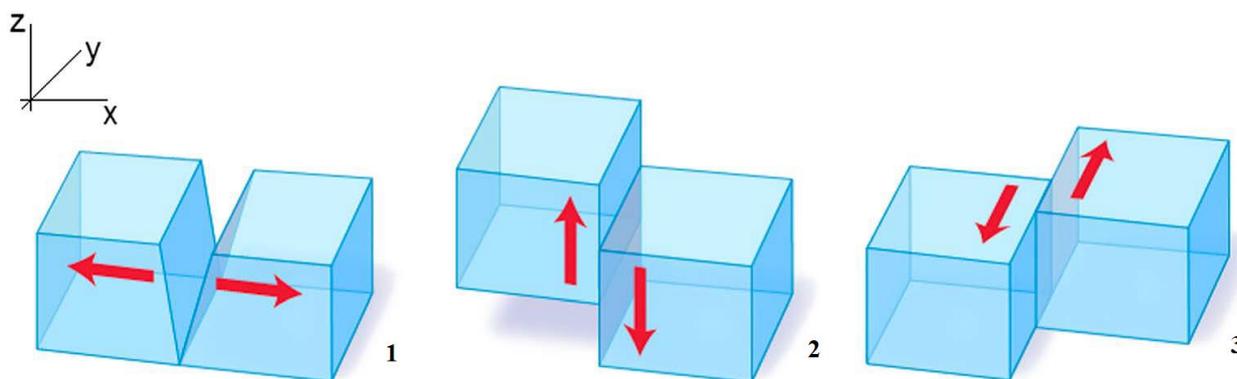


Рисунок 4. Типы трещин в зависимости от их положения и ориентации на леднике:

1 - поперечные, 2 - косые, 3 - бергирунд, 4 - ледопад, 5 - ступенчато-расположенные трещины, 6 - базальные, 7- рифт (Colgan et al., 2016)

Поперечная (transverse) трещиной называют вогнутую трещину по направлению движения ледника, в то время как косая (splaying) трещина вогнута против движения и к центру ледника становится параллельной потоку. Бергшрудн - трещина, которая образуется при отделении тяжелой нижней части ледника от статичного верхнего слоя и чаще всего располагается в самом его начале, характерна только для горных ледников. Ледопад - участок ледника, разбитый множеством поперечных трещин на отдельные глыбы, возникает в результате разрушения ледника из-за его движения по выпуклой поверхности. Базальной называют трещину, располагающуюся у подошв ледника независимо от ее происхождения. Рифт – обособленная трещина, которая перпендикулярна или параллельна потоку и распространяется через всю толщу шельфового ледника (Colgan et al., 2016). Существуют различия между трещинами ледников разных типов. Так, для покровных ледников в отличие от горных не характерно наличие бергшруднов.

Образование трещин происходит вследствие движения ледника по негладкой поверхности. Существует три вида разрыва, влекущих появление трещин трех типов соответственно: раздвиг, сброс, сдвиг (рисунок 5). При этом кроме разрывных нарушений на процесс образования трещин влияют и механические свойства льда, например, плотность, химический состав (Colgan et al., 2016).



*Рисунок 5. Типы разрывов поверхности:*

*1 - раздвиг, 2- сброс, 3 - сдвиг (Colgan et al., 2016)*

Как правило, трещины первого типа образуются при относительно большом горизонтальном смещении стенок по сравнению с вертикальным. В результате сброса образуется два типа трещин: поперечные и косые. Согласно теории ламинарного течения поперечные трещины возникают при продольном растяжении либо при поперечном сжатии. Причиной могут быть вогнутый подледный рельеф, сужение ледника, что приводит к увеличению вертикальной скорости движения и снижению горизонтальной. Косые трещины,

наоборот, образуются либо при сжатии ледника вдоль движения, либо при поперечном растяжении, причиной чего являются выпуклая подледная поверхность и расширение русла ледника, увеличивающие горизонтальную скорость движения и уменьшающие вертикальную (Colgan et al., 2016).

В отличие от остальных видов разрыва определить сдвиг гораздо сложнее. Немногочисленные наблюдения показывают, что трещины, образованные в результате сдвига длиннее, чем трещины сброса. Кроме того, существуют так называемые смешанные трещины, которые образуются в результате раздвига и сдвига одновременно, что влияет на их ориентацию и геометрию. К повороту трещины приводит стремление ледника при движении минимизировать сдвиг и увеличить раздвиг (Colgan et al., 2016).

Расстояние между трещинами вероятно связано с их глубиной и толщиной ледника. По мере старения трещин их изначально острые кромки начинают изнашиваться за счет поверхностной абляции или растрескивания. Кроме того трещин могут полностью исчезнуть в результате абляции, заполнения снегом и талой водой, а также в результате сжатия из-за компрессионного давления (Colgan et al., 2016).

При закрытии, другими словами залечивании, ледниковых трещин остаются характерные следы, которые иногда соединяются с открытыми трещинами. Отсутствие залеченных трещин при наличии открытых является показателем того, что в недавнем времени ледник стал более подвижным. Наоборот, при избытке следов трещин и отсутствии открытых можно предположить, что ледник стал менее динамичным. Лед в залеченных трещинах, как правило, более плотный, чем окружающий. Несмотря на то, что могут быть обнаружены следы трещин шириной до 1 м, большинство из них будут иметь толщину всего несколько сантиметров, но их можно проследить на протяжении многих метров по всей поверхности ледников. Следы трещин могут образоваться, в том числе из вторично замерзшей талой воды, о чем свидетельствует ориентация кристаллов. Поэтому на их месте могут быть микротрещины или структурные каналы, в пределах которых происходит таяние и замерзания льда (Colgan et al., 2016).

В широком смысле ориентация и геометрический рисунок трещин говорит о характере движения ледника, например, различие между районами ледника с разной скоростью движения, между областями сжатия и растяжения потока в пределах одного ледника или выявление сдвига ледника. В условиях относительно низкой деформации общий вид рисунков может сохраняться в течение нескольких месяцев, лет или даже нескольких веков. Поэтому в многолетних исследованиях за ледниковыми трещинами изучается движение ледника в результате изменения его толщины, уклона или под климатическим воздействием. При годовом наблюдении внезапное появление трещин может быть признаком

чрезвычайного события, например, быстрое появление трещин может сигнализировать о переходе ледника из состояния покоя. На шельфовых ледниках внезапное образование трещин может быть признаком предстоящего распада шельфового ледника.

На сегодняшний день для гляциологов большой интерес представляет определение глубины ледниковых трещин, нежели их ширина, длина, расстояние между трещинами или иные геометрические характеристики. Способа однозначного определения глубины трещины не существует, что связано с трудностями измерения сужающегося разлома, а кажущееся очевидным соотношение между глубиной и расстоянием между трещинами зависит от множества локальных факторов, включая скорость движения ледника и температуру.

Несмотря на то, что гляциологов больше волнуют характеристики ледниковых трещин, их расположение остается объектом интереса. Во-первых, поиск трещин обеспечивает безопасность проведения исследований. Во-вторых, геометрический рисунок позволяет говорить о процессах, происходящих на леднике. Наблюдения за ледниковыми трещинами проводятся либо наземными методами, либо с помощью данных дистанционного зондирования Земли.

## 2.2. Наземные способы изучения ледниковых трещин

При тех наземных исследованиях ледников, которые включают в себя изучение скрытых ледниковых трещин, используются геофизические методы, а именно георадарное профилирование.

Принцип действия георадара основан на излучении импульсов метрового и дециметрового диапазона электромагнитных волн и приеме сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондируемой среды с различными электрофизическими свойствами. Основные элементы георадара— импульсный генератор с передающей антенной, приемная антенна и блок управления.

На входе генерируется либо электромагнитный, либо упругий импульс, а на выходе приемной антенной воспринимается отклик среды – совокупность волн, отличающихся друг от друга временами пробега, интенсивностью и формой. Для георадиолокации это двойные времена пробега электромагнитных волн до границы раздела сред с различной диэлектрической проницаемостью, информация о потерях, связанных с токами проводимости, информация о дисперсии фазовых скоростей в среде (Владов, Старовойтов, 2004).

Глубина проникновения волн зависит от электропроводности поверхности. Для проникновения на большую глубину подходят низкие частоты, для детального изучения поверхностных слоев нужны более высокие частоты. Конечными результатами

георадиолокационного метода являются временные георадарные разрезы или профили (рисунок 6).

Интерпретация временного георадарного разреза сводится к двум моментам: формированию скоростной модели среды, на основе которой временной разрез пересчитывается в глубинный, и попытке объяснения, как сформировано наблюдаемое волновое поле (Владов, Старовойтов, 2004).

Из-за дифракции от боковых стенок ледниковые трещины проявляются как сложенные дифракционные гиперболы возвращаемого радиолокационного сигнала. Моделирование характерных для трещин вертикально сложенных гипербол может говорить о материале, заполняющем трещину: воздух, лед или вода (Colgan et al., 2016).

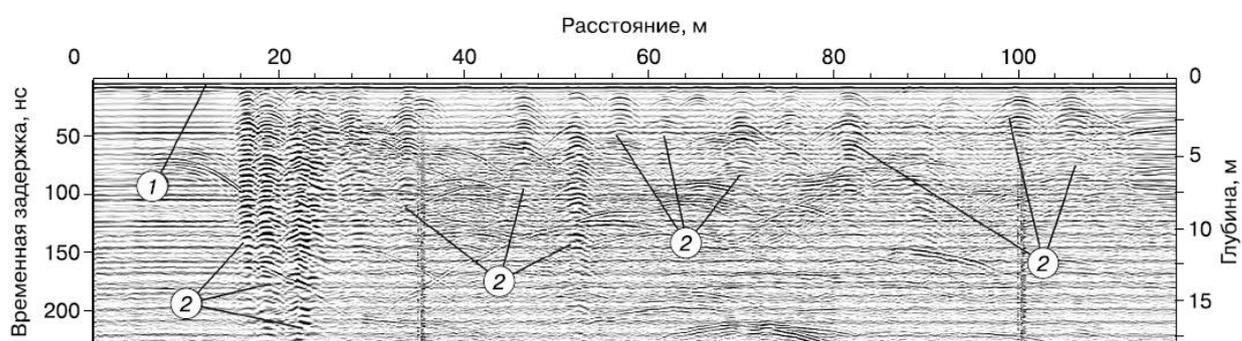


Рисунок 6. Временной георадарный разрез, полученный при лоцировании залеченных трещин:

1 - нулевая отметка,

2 - дифрагированные волны, сформированные от элементов трещин (Попов, Поляков, 2016)

Для оперативного обнаружения трещин используется георадар, антенна которого закреплена на выпущенной впереди трактора длинной стреле (рисунок 7).



Рисунок 7. Приспособления, предназначенные для дистанционного обнаружения приповерхностных трещин в теле ледника с помощью георадаров (Попов, Поляков, 2016)

Однако эффективность данного метода вызывает сомнения по следующим причинам. Во-первых, георадарные данные обрабатывает человек. Во-вторых, из-за высокой скорости движения предполагаемого транспортного средства (5–10 км/ч), у оператора мало времени

на принятие решения. В-третьих, в конфигурации трещин какие-либо признаки ее приближения (дифрагированные волны) либо отсутствуют, либо неярко выражены, и это дополнительно сокращает время. В-четвертых, понять, что наблюдаемое отражение представляет собой дифрагированную волну, возможно после пересечения антенной формирующего ее рефлектора и появления на экране монитора вершины дифрагированной волны (Попов, Поляков, 2016).

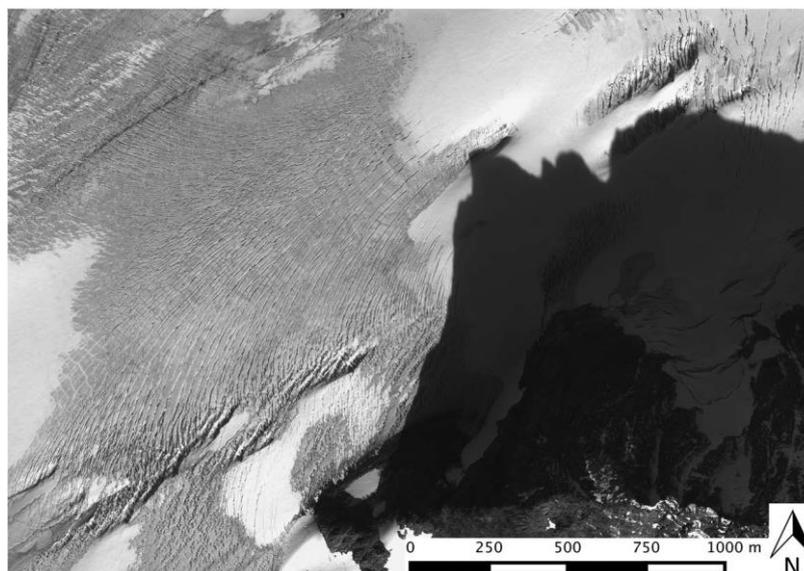
### 2.3. Применение дистанционного зондирования Земли в исследовании ледниковых трещин

Для наблюдений за ледниковыми трещинами применяются практически все методы дистанционного зондирования Земли. Работа с такими данными особенно актуальна для труднодоступных районов. Используются результаты, как активных, так и пассивных методов съемки, пространственное разрешение которых может быть низким, средним и высоким.

Первые дистанционные наблюдения за трещинами появились в 70-х годах XX века. На основе аэрофотосъемки выявляли отдельные трещины, области их большого распространения и так называемые ледниковые складки в Восточной Антарктиде на Леднике Уилланс. Отдельные трещины удалось обнаружить за счет высокого (0.7 м) разрешения. В 1975 Кримель и Майер определили трещины как относительно темные области на поверхности на космических снимках с пространственным разрешением около 100 м (Colgan et al., 2016).

Дальнейшие исследования показали, что ледниковые трещины отлично выделяются на снимках, полученных с помощью серии спутников Ландсат (Landsat), на основе изображений в оптическом диапазоне был исследован шельфовый ледник Фильхнера-Ронна в Западной Антарктиде (Colgan et al., 2016)

В 2008 году, используя снимки Landsat 7 и результаты радарной съемки ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), были установлены размеры и выделены различные элементы поверхности шельфового ледника Ларсен (Антарктида), в том числе трещины. При этом обнаружение скрытых трещин оказалось затруднительным, в то время как открытые или заполненные водой трещины представляли из себя темные линии и хорошо определились (Glasser, Scambos, 2008).



*Рисунок 8. Ледниковые трещины на снимке в видимом диапазоне, панхроматический канал, WorldView-1 (Colgan et al.,2016)*

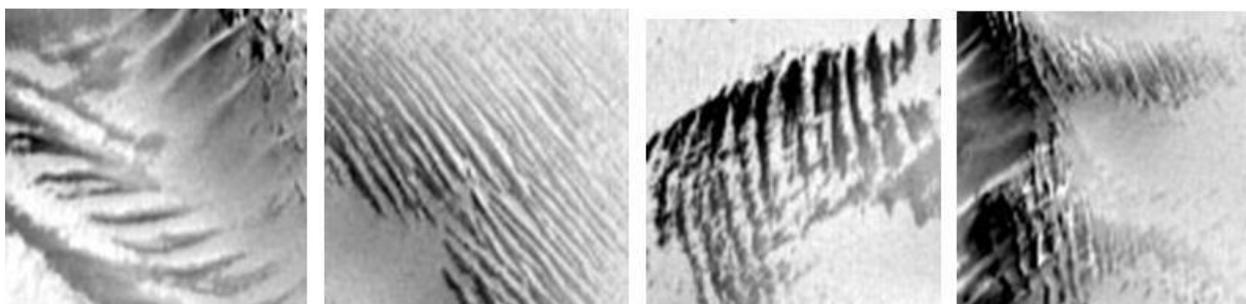
Таким же способом, тем же автором были зафиксированы изменения на леднике Ларсена за 40 лет между 1963 и 2003 гг. с использованием съемочной системы MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer – сканирующий спектрорадиометр среднего разрешения), пространственное разрешение которой варьируется от 250 до 1000 м. По бокам ледника располагались зоны трещин, а редкие отдельные трещины располагались перпендикулярно его движению.

Холт в 2013 году использовал аналогичный подход для изучения элементов поверхности, включая трещины, шельфового ледника Георга VI на Антарктическом полуострове. Нолин использовал данные MISR (Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer – многоугловой сканирующий спектрорадиометр), чтобы различить зоны трещин от однородных поверхностей в Антарктиде. В то время как однородная поверхность, покрытая льдом, способствует прямому рассеянию, при наличии трещин возникает обратное рассеяние, в результате чего поверхности отличаются друг от друга текстурой и спектральными характеристиками. Наблюдения показали, что большинство трещин исследуемого района имеют поперечную ориентацию (Holt et al.,2013).

Кроме того, проводились исследования по объединению спутниковых снимков и аэрофотоснимков для автоматизированного выделения и классификации зон ледниковых трещин. В 2011 году Колган сравнил результаты аэрофотосъемки (разрешение 2 м) со спутниковыми снимками WorldView-1 при мониторинге изменений ледниковых трещин в Гренландии. Выделение границ трещин осуществлялось методом Робертса, применяемого для выделения контуров изображения. Перекрестный оператор Робертса вычисляет сумму квадратов разниц между диагонально смежными

пикселями. Исследование показало: трещины шириной 2 м увеличились на  $13 \pm 4\%$  между 1985 и 2009 годами, в то время как трещины с шириной более 10 м за тот же период изменились незначительно (Colgan et al.,2016).

Для обнаружения трещин эффективными являются методы космической радарной съемки, принцип работы которых аналогичен георадарному профилированию. В общем случае радиолокационное изображение является комплексным, то есть из него можно извлечь амплитуду, характеризующую яркость поверхности и фазу, обусловленную временной задержкой сигнала и длиной волны. На снимках в видимом диапазоне трещины кажутся темными, а на радиолокационных изображениях они, наоборот, яркие, поскольку радиолокация чувствительна к изменению текстуры поверхности (Xu et al.,2011). Также радарная съемка может проникать сквозь толщу снега, благодаря чему идентифицируются скрытые трещины, которые не видны на изображениях в видимом диапазоне. В радиолокационных изображениях скрытые трещины обычно выделяются по узким линиям с низким радиолокационным отражением на местах снежного моста (рисунок 9). Возможность выявления трещин сильно зависит от того, под каким углом относительно их ориентации проводится радарная съемка. Безусловно, наиболее заметны трещины, расположенные перпендикулярно направлению съемки (Xu et al.,2011).



*Рисунок 9. Изображение ледниковых трещин на радиолокационных изображениях ASTER (Colgan,2016)*

Изучение текстуры на радиолокационных снимках для поиска трещин, особенно использование текстурных признаков Харалика, не раз становилось объектом исследований, например, (Xu et al.,2011), где при обнаружении зон трещин выполнялся анализ текстуры радиолокационных изображений ASTER в Антарктике. Также при оценке эффективности метода текстурного анализа фиксировались области, которые можно было ошибочно принять за трещины.

Важным дополнением более традиционных методов исследования трещин являются методы лазерной альтиметрии, т.е. использование данных о высоте поверхности. Таким способом был исследован шельфовый ледник Эмери в Антарктиде на основе данных ICESat-

1(Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite) (Liu et al., 2014). Авторы в качестве признака трещины рассматривали V-образный профиль поверхности, что также позволило определить их глубину (рисунок 10).

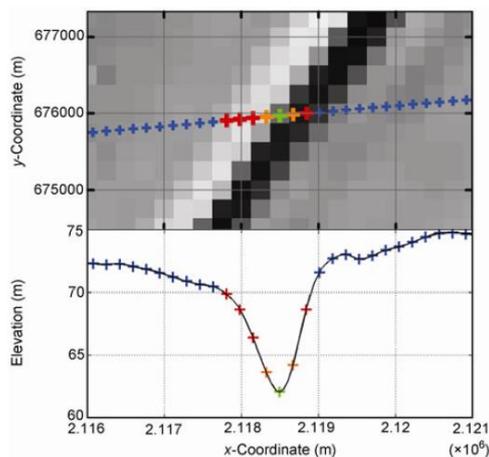


Рисунок 10. Профиль ледниковой трещины, наложенный на снимок MODIS  
(Liu et al., 2014)

Использование данных космической съемки для изучения ледниковых трещин является популярным способом, и все-таки имеет ряд особенностей. В первую очередь, детальность производимой съемки влияет на размер трещин, которые могут быть определены. Поэтому на снимках с низким пространственным разрешением удастся выделить только зоны трещиноватости, а не отдельные объекты. К тому же выбор конкретного метода съемки влияет на возможность определения трещин разного типа. Так на изображениях в видимом диапазоне возникают проблемы с изучением скрытых трещин, что решает космическая радиолокационная съемка. Наконец, особое внимание уделяется исследованию ледниковых трещин Антарктиды и Гренландии, удаленным районам, которые покрывает малое количество спутниковых систем. Так подходящая для изучения трещин активная съемка Антарктиды проводится только двумя съемочными системами: ENVISAT 1 и CryoSat-2, разрешение которых составляет 30 и 250 м, что, безусловно, недостаточно для изучения отдельных ледниковых трещин.

Отдельное внимание стоит уделить использованию беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в гляциологических исследованиях. Преимущества использования БПЛА следующие. Во-первых, данная технология позволяет получать данные с высоким пространственным разрешением. Во-вторых, относительно низкие материальные затраты на получение данных. В-третьих, возможность проведения инфракрасной съемки (Bhardwaj et al., 2016). Использование БПЛА в гляциологии слабо изучено, и все же гляциологические исследования с применением БПЛА можно разделить на три группы. В первой группе

рассматриваются технические возможности БПЛА для проведения полетов, например (Crockner et al.,2011). Во второй группе обсуждается точность полученных в результате обработки материалов аэрофотосъемки (Tonkin,2014). Как раз к третьей группе можно отнести сами исследования ледников (скорость движения, таяние, моренные отложения) на основе цифровых моделей поверхности и ортофотопланов. Так (Dąbskia et al.,2017) по ортофотоплану выявили 16 характерных форм рельефа, структурировали их по средней высоте, уклонам и доле занимаемой ими площади. Касательно исследования трещин известна работа (Ryan et al.,2015), в которой помимо изучения движения ледника рассчитывалась средняя плотность трещин, выделенных ранее по ортофотоплану. Выявлению отдельных ледниковых трещин посвящена идея (Florinsky, Vliakharskii,2019), суть которой заключается в расчете геоморфометрических характеристик, что использовано в данной работе.

### ГЛАВА 3. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ

Взаимодействие различных факторов формирования рельефа, тесная связь геоморфологии с другими науками: естественными, а также с точными науками физико-математического типа, стало следствием многообразия применяемых методов исследования рельефа. Среди множества методов изучения рельефа выделяют морфологический подход, историко-генетический и морфометрический.

Морфографические методы исследования заключаются в непосредственном наблюдении форм и элементов рельефа, выявлении их особенностей и типических черт для морфологической классификации, изучения их пространственных взаимосвязей (Кизевальтер, Раскатов, Рыжкова, 1981).

В основу историко-генетических методов положен морфолого-генетический принцип. Это означает, что исследование рельефа территории проводится исходя из генетического истолкования морфологических признаков рельефа и учета всех геологических данных (генезиса и возраста отложений).

Морфометрические методы основаны на применении количественных критериев при анализе форм рельефа и интерпретации полученных результатов. С помощью морфометрии осуществляется прогнозирование различных разрывных нарушений, линейных складок и брахиморфных структур, форм погребенного рельефа (Кизевальтер, Раскатов, Рыжкова, 1981). Важным дополнением являются методы математической статистики для получения количественных характеристик рельефа. Поскольку при изучении рельефа его представляют в виде цифровых моделей местности, морфометрические методы исследований являются эффективными.

#### 3.1. Геоморфометрический анализ рельефа

Рельеф земной поверхности образуется вследствие перемещения вещества земной коры. Различные виды и способы этого перемещения должны отражаться и некоторое время сохраняться во внешнем облике рельефа, что в свою очередь влияет на происходящие процессы: микроклиматические, гидрологические, почвообразующие и т.д.

Геоморфометрия - научная дисциплина, предметом которой является моделирование и анализ рельефа, а также взаимосвязей между рельефом и другими компонентами геосистем (Флоринский, 2016).

Представление об общей и частной геоморфометрии как науке о количественном анализе рельефа было введено английским геоморфологом И. Эвансом. Согласно Эвансу, общая геоморфометрия обеспечивает основу для количественных сравнений качественно различных ландшафтов и может адаптировать методы анализа поверхности, используемые вне геоморфологии. Частная геоморфометрия более ограничена; она включает в себя более

произвольные решения и оставляет больше места для субъективизма. Методами общей геоморфометрии могут описываться твердый и жидкий поверхностный сток, расчлененность местности, терморезим склонов, геометрические формы земной поверхности, высотная зональность (Шарый, Шарая, 2003).

При математическом моделировании реальные поверхности аппроксимируют топографической поверхностью. Под топографической поверхностью понимается замкнутое ориентированное бесконечно дифференцируемое двумерное многообразие  $S$  в трехмерном евклидовом пространстве  $E^3$ . При этом:

- поверхность определяется гладкой однозначной функцией  $z = f(x, y)$ ;
- топографическая поверхность имеет производные всех порядков;
- поверхность находится в однородном гравитационном поле;
- при анализе топографической поверхности кривизной земли можно пренебречь;
- топографическая поверхность является масштабно зависимым объектом.

В качестве реальных поверхностей могут выступать не только рельеф земной поверхности, но и подводный, ледяной и даже рельеф внеземных территорий (Флоринский, 2016).

Геоморфометрия оперирует морфометрическими величинами (МВ), которые являются количественными характеристиками земной поверхности, определенными в каждой точке земной поверхности. Морфометрической характеристикой (параметром, величиной, показателем) называют однозначную функцию двух переменных  $\omega = u(x, y)$ , описывающую свойства топографической поверхности.

Выделяют четыре основные группы морфометрических величин:

1. Локальные величины.
2. Нелокальные величины.
3. Солярные величины.
4. Комбинированные величины.

Локальной морфометрической величиной называют однозначную функцию двух переменных  $\omega = u(x, y)$ , описывающую геометрию топографической поверхности в окрестностях данной точки поверхности вдоль направлений, задаваемых одной из двух пар взаимно перпендикулярных нормальных сечений (рисунок 11). При этом окрестность точки фиксирована. Локальные характеристики рельефа являются функциями частных производных высоты.

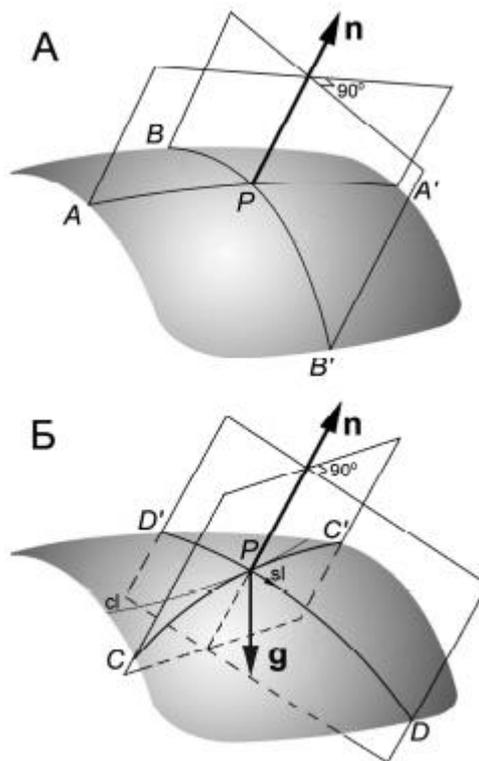


Рисунок 11. Две пары нормальных сечений в точке  $P$  топографической поверхности  
(Флоринский, 2016)

Первой парой взаимно перпендикулярных нормальных сечений являются главные сечения  $APA'$  и  $BPB'$ , которые обладают максимальным и минимальным изгибом в данной точке  $P$  топографической поверхности. Вторая пара взаимно перпендикулярных нормальных сечений  $CPC'$  и  $DPD'$  выделяется гравитационным полем. Нормальное сечение  $DPD'$  включает в себя вектор ускорения силы тяжести  $g$  и имеет общую касательную с линией скольжения в данной точке  $P$  топографической поверхности. Нормальное сечение  $CPC'$  тангенциально горизонтально<sup>2</sup> в данной точке  $P$  топографической поверхности.

Локальные МВ можно разделить на 2 класса: атрибуты форм и атрибуты потоков. В первой группе величины не зависят от направления вектора ускорения силы тяжести. Вторая группа величин связана с нормальными сечениями, выделенными гравитацией, т.е. зависят от направления вектора ускорения силы тяжести.

В геоморфометрии используются первые  $(p,q)$ , вторые  $(r,t,s)$  и третьи  $(g,h,k,m)$  частные производные, на основе которых рассчитываются морфометрические величины (Флоринский, 2016):

$$p = \frac{\partial z}{\partial x}, q = \frac{\partial z}{\partial y},$$

$$r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}, t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}, s = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \quad (1)$$

$$g = \frac{\partial^3 z}{\partial x^3}, h = \frac{\partial^3 z}{\partial y^3}, k = \frac{\partial^3 z}{\partial x^2 \partial y}, m = \frac{\partial^3 z}{\partial x \partial y^2}$$

Локальные морфометрические характеристики:

- Крутизна склона – угол между горизонтальной и тангенциальной плоскостями в данной точке топографической поверхности

$$G = \arctg \sqrt{p^2 + q^2} \quad (2)$$

- Экспозиция склона – угол, отсчитываемый по часовой стрелке, между направлением на север и проекцией внешней нормали на горизонтальную плоскость в данной точке поверхности

$$A = -90[1 - \text{sign}(q)](1 - |\text{sign}(p)|) + \quad (3)$$

$$+ 180[1 + \text{sign}(p)] - \frac{180}{\pi} \text{sign}(p) \arccos\left(\frac{-q}{\sqrt{p^2 + q^2}}\right)$$

- Кривизна горизонтали – кривизна линии горизонтали в данной точке топографической поверхности

$$k_p = - \frac{q^2 r - 2pqs + p^2 t}{\sqrt{(p^2 + q^2)^3}} \quad (4)$$

- Горизонтальная кривизна — кривизна нормального сечения, тангенциального горизонтали в данной точке топографической поверхности

$$k_h = - \frac{q^2 r - 2pqs + p^2 t}{(p^2 + q^2) \sqrt{1 + p^2 + q^2}} \quad (5)$$

Горизонтальная кривизна может принимать положительные, отрицательные и нулевые значения. Потоки конвергируют при отрицательных значениях и дивергируют при положительных.

- Вертикальная кривизна — кривизна нормального сечения, имеющего общую касательную с линией скольжения в данной точке топографической поверхности

$$k_v = - \frac{p^2 r - 2pqs + q^2 t}{(p^2 + q^2) \sqrt{(1 + p^2 + q^2)^3}} \quad (6)$$

- Средняя кривизна — полусумма кривизн двух любых нормальных взаимно перпендикулярных сечений в данной точке топографической поверхности

$$H = \frac{1}{2} (k_v + k_h) \quad (7)$$

- Минимальная кривизна — кривизна главного нормального сечения с минимальным изгибом в данной точке топографической поверхности

$$k_{min} = H - M = H - \sqrt{H^2 - K} \quad (8)$$

- Максимальная кривизна— кривизна главного нормального сечения с максимальным изгибом в данной точке топографической поверхности

$$k_{max} = H + M = H + \sqrt{H^2 - K} \quad (9)$$

- Разностная кривизна — полуразность горизонтальной и вертикальной кривизны

$$E = \frac{1}{2}(k_v - k_h) \quad (10)$$

- Гауссова кривизна— произведение максимальной и минимальной кривизн

$$K = k_{min}k_{max} = \frac{rt - s^2}{(1 + p^2 + q^2)^2} \quad (11)$$

- Избыточная горизонтальная кривизна— разница горизонтальной и минимальной кривизн

$$K_{he} = k_h - k_{min} \quad (12)$$

- Избыточная вертикальная кривизна— разница вертикальной и минимальной кривизн

$$K_{ve} = k_v - k_{min} \quad (13)$$

- Аккумуляционная кривизна — произведение горизонтальной и вертикальной кривизн

$$K_a = k_h k_v \quad (14)$$

- Кольцевая кривизна— произведение избыточной горизонтальной и избыточной вертикальной кривизн

$$K_r = k_{he} k_{ve} \quad (15)$$

- Несферичность. Показывает, насколько форма элемента земной поверхности отклоняется от сферической

$$M = \frac{1}{2}(k_{max} - k_{min}) = \sqrt{H^2 - K} \quad (16)$$

- Ротор— кривизна линий тока

$$rot = \frac{(p^2 - q^2)s - pq(r - t)}{\sqrt{(p^2 + q^2)^3}} \quad (17)$$

Нелокальные морфометрические величины описывают относительное положение точки на топографической поверхности. Нелокальными МВ являются водосборная площадь и дисперсивная площадь. Водосборная площадь - мера площади вышележащих участков, которые могут дренироваться через данную точку поверхности. Дисперсивная площадь – мера площади нижележащих участков, которых могут достигать потоки, прошедшие через данную точку поверхности.

Для расчета нелокальных морфометрических характеристик применяют алгоритмы маршрутизации потока. При анализе нелокальных морфометрических величин используются

такие понятия, как поток, линия тока и водосбор, при этом поверхность описывают без учета ее происхождения и наличия каких-либо жидкостей.

Солярная морфометрическая величина описывает зависимость между топографической поверхностью и солнечной радиацией в данной точке поверхности. К солярным морфометрическим величинам относятся отражательная способность и инсоляция.

К комбинированным морфометрическим величинам относят, в частности, топографический индекс и индекс мощности потоков, для получения которых проводится последовательный расчет локальных и нелокальных МВ и их комбинация.

Топографический индекс описывает отношение водосборной площади и крутизны склонов, отвечает за меру аккумуляции потоков. Чем больше водосборная площадь и чем меньше крутизна склонов, тем выше значение топографического индекса.

Индекс мощности потоков – произведение водосборной площади и крутизны склонов в данной точке топографической поверхности. Индекс мощности потоков – мера потенциальной эрозионной силы поверхностных потоков. Чем больше водосборная площадь и крутизна склонов, тем выше значение индекса мощности потоков (Флоринский, 2016).

Выделяют следующие основные аспекты действия рельефа (Шарый, 2006):

- Поверхностный сток сыпучих и жидких веществ,
- Расчлененность (изрезанность) местности,
- Геометрические формы (связанные памятью в ландшафтах),
- Термический режим склонов,
- Высотная поясность.

Помимо этих основных аспектов, действие рельефа проявляется еще в ряде более частных, специфических для конкретной местности, явлений.

В (Шарый, 2006) систематизированы морфометрические величины и механизмы, которые они описывают (таблица 1).

Таблица 1. Система базовых морфометрических величин

Морфометрическая величина	Что описывает	
Экспозиция склона	Поверхностный сток	Направление потоков
Крутизна склона		Скорость потоков
Горизонтальная кривизна		1-ый механизм аккумуляции
Площадь сбора		
Дисперсивная площадь		2-ой механизм аккумуляции
Вертикальная кривизна		
Разностная кривизна		Сравнивает 1-ый и 2-ой механизмы аккумуляции
Аккумуляционная кривизна		Выявляет зоны относительной аккумуляции
Кольцевая кривизна	Расчлененность рельефа	Извилистость потоков (расчлененность рельефа)
Горизонтальная		Эти две МВ расщепляют

избыточная кривизна		извилистость потоков на две компоненты
Вертикальная избыточная кривизна		
Ротор		Направление поворота линий тока
Несферичность	Геометрические формы рельефа	Отличие формы рельефа от сферической в точке
Средняя кривизна		«Равновесную» (минимальную) поверхность, имеющую минимальную при данной границе площадь
Максимальная кривизна		Гребневые формы рельефа
Минимальная кривизна		Килевые формы рельефа
Гауссова кривизна		Не меняется при изгибании поверхности
Освещенность склонов	Терморезим склонов	Интенсивность прямого солнечного излучения
Высота поверхности	Высотная зональность	Изменение температуры и давления атмосферы

На основе морфометрических величин проводится классификация форм рельефа.

Первая классификация форм поверхности предложена К.Ф. Гауссом, она основана на знаках полной гауссовой кривизны и средней кривизны –  $MV$ , описывающих геометрические формы. В ней выделяется 4 типа форм (рисунок 12).

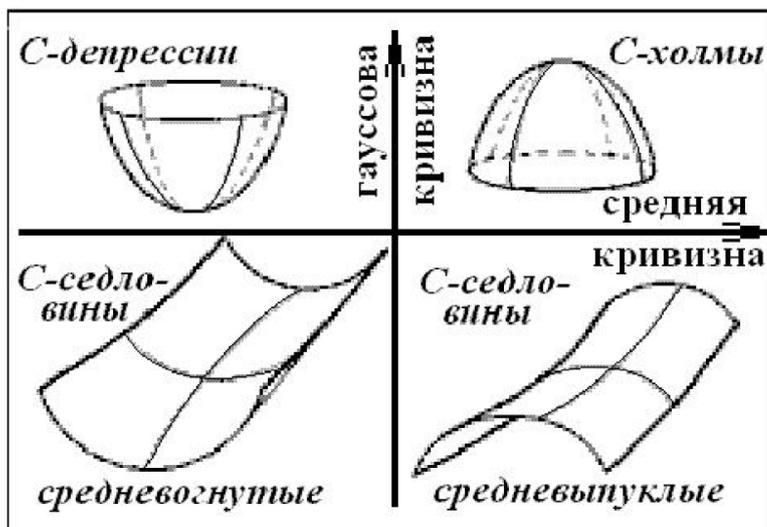


Рисунок 12. Типы форм рельефа классификации Гаусса (Шарый, 2006)

Позднее Ф.Р. Трех предложил иную классификацию форм рельефа, основанную на знаках вертикальной и горизонтальной кривизн, а также отвечающую двум основным механизмам аккумуляции (рисунок 13).

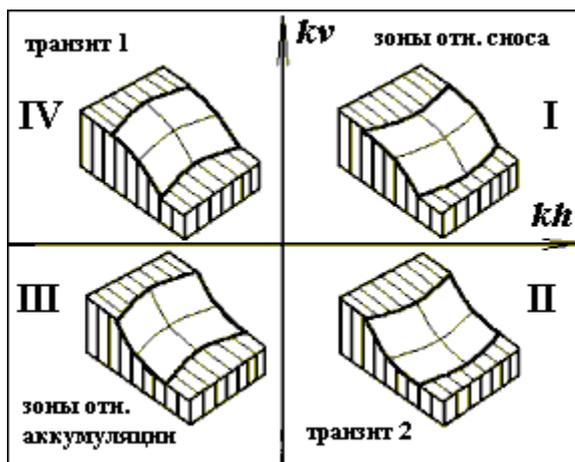


Рисунок 13. Типы форм рельефа классификации Треха (Шарый, Шарая, 2003)

П.А. Шарый предложил более общую классификацию форм рельефа, включавшую в себя классификации Гаусса и Треха как частные случаи. В этой классификации 12 типов форм (рисунок 14).

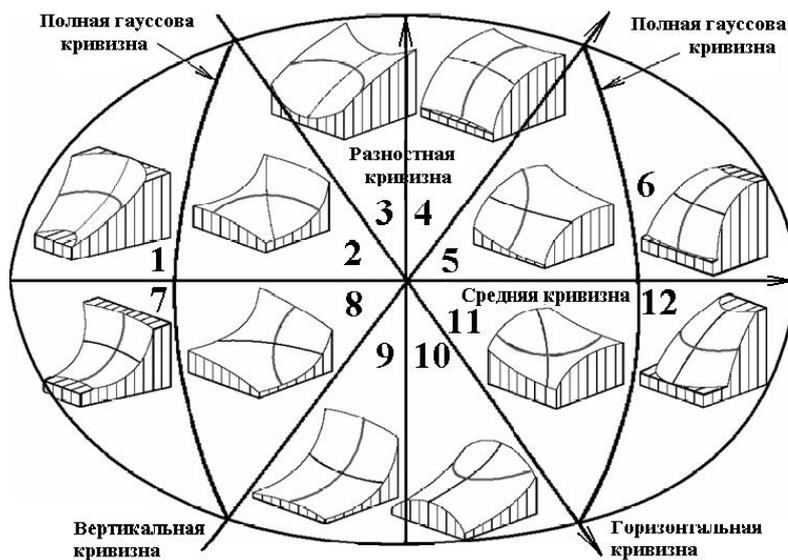


Рисунок 14. Двенадцать типов форм рельефа классификации Шарого (Шарый, 2006)

Помимо этих (основных) типов форм рельефа, можно определить еще редкие типы форм, образующих на картах линии или точки, обычно общие границы соседних основных типов форм (рисунок 15).

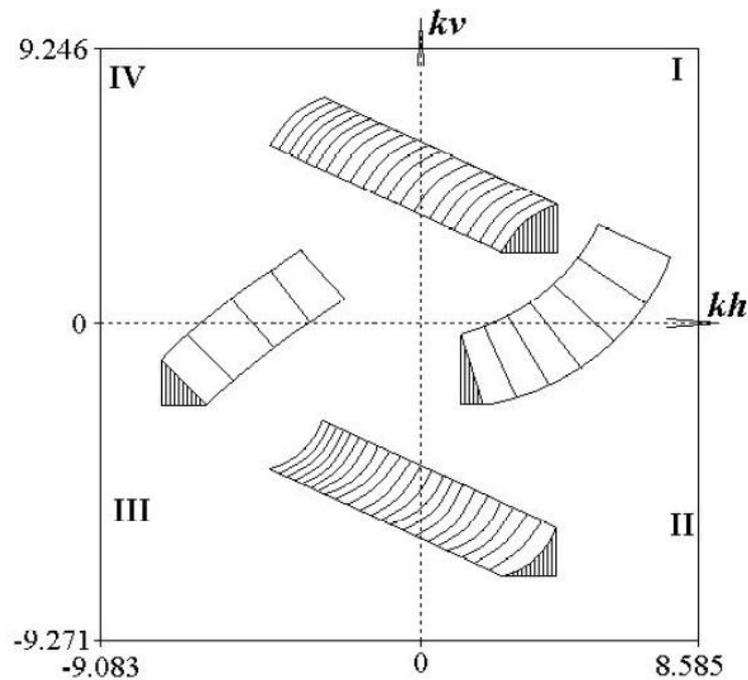


Рисунок 15. Примеры редких типов форм, показанных на плоскости

На рисунке 15 по осям отложены горизонтальная кривизна  $kh$  и вертикальная кривизна  $kv$ : I – рассеивающие с идеально прямым профилем ( $kv=0$ ); II – замедляющая с идеально прямыми горизонталями ( $kh=0$ ); III – собирающие с идеально прямым профилем ( $kv=0$ ); IV – ускоряющие с идеально прямыми горизонталями ( $kh=0$ ) (Шарый, 2006).

Описанные выше классификации форм рельефа относятся к локальным, то есть построенным с помощью локальных МВ. В силу негладкой природы земной поверхности такие типы форм существенно зависят от масштаба карты, что создает заметные трудности при их использовании.

### 3.2. Текстура цифровых моделей местности

Одной из задач геоморфометрии является классификация форм рельефа. Существует два подхода к данному вопросу. В первом случае классификации форм земной поверхности фундаментальны и основываются на знаках кривизн, что описано в разделе 3.1. (Шарый, Шарая, 2003). Во втором случае, используются статистические методы анализа местности, а именно анализ гистограмм статистического распределения высот, крутизны и направления склонов. Другими словами, рассматривается текстура земной поверхности в целях определения повторяющихся форм рельефа. Как правило, это включает в себя разграничение регионов, которые характеризуются повторением закономерностей изменений высоты в пределах определенной территории. В последнее время текстура местности, полученная на

основе ЦМР, привлекает больше внимания благодаря возможности непосредственного анализа морфологии рельефа (Hengl et al., 2008).

Большинство исследований для определения форм рельефа использует вычисления на основе скользящего окна и сводится к следующим этапам:

- Определение размера скользящего окна;
- Вычисление статистических показателей геоморфометрических параметров в скользящем окне;
- Формулировка правил классификации на основе вариантов пространственной статистики.

Ключевой проблемой этого подхода является выбор размера окна, в пределах которого вычисляются статистические показатели. Простейшее решение состоит в том, чтобы визуально оценить рельеф земной поверхности и назначить фиксированные размеры окна поиска. Так была выдвинута концепция “топографического зерна”, к которому должен приближаться размер скользящего окна, и автоматизировали его расчет по 30-метровым ЦМР. Топографическое зерно определяется как самый длинный значительный гребень. Они также показали, что зерно и сопутствующая ему относительная высота рельефа эквивалентны, по диапазону и порогу изогнутым вариограммам (Pike et al., 1989).

Окно, которое не покрывает хотя бы один крупный хребет, т.е. слишком мало, не позволяет выделить значимые формы рельефа, в то время как слишком большое окно может, наоборот, не распознать локальные, но важные особенности рельефа. Невозможно выбрать фиксированный размер для движущегося окна, которое будет идеально захватывать все особенности рельефа, представляющие интерес, потому что рельеф местности не является однородным (Hengl et al., 2008).

Пайк характерной чертой рельефа считал набор параметров, который достаточно хорошо описывает форму поверхности и позволяет отличить один ландшафт от другого. Его классификация форм рельефа осуществлялась с помощью вычислений статистических распределений геоморфометрических параметров в скользящем окне размером 21×21. В своем примере он выделил до 75 различных вариантов. Эти варианты представляют собой рассчитанные среднее, максимальное, минимальное значения, дисперсию от угла наклона, вертикальной и горизонтальной кривизны, а также анализ изменений углов наклона, экспозиции склона самой высоты рельефа. Значительным вкладом стала идея, в скользящем окне могут быть вычислены статистические показатели от геоморфометрических величин, и на этой основе можно различать различные типы рельефа. Правда концепция была ограничена небольшим количеством примеров и отсутствием наборов для общей классификации типов рельефа. Пайк также не определил, какие именно признаки могут быть

наиболее успешными для определения форм. В 2007 году Пайк выделил 16 форм поверхности Земли с использованием данных радиолокационной топографической миссии шаттла (SRTM) на основе только трех параметров: уклон, локальная выпуклость, “текстура” (Hengl et al., 2008).

Дикау (Dikau et al., 1991) выделил 4 типа склона, 6 типов рельефа по относительной высоте, 4 типа профиля рельефа, которые в различной комбинации образуют 96 возможных вариантов и распределены по группам: равнины, плоскогорья, возвышенности, горы (Таблица 2).

Таблица 2. Критерии классификации метода Дикау

Доля пологих склонов (%)	Относительная высота (м)	Профиль
Более 80	0-30	Более 75% низменности
50-80	30-91	50-75% низменности
20-50	91-152	50-75% возвышенности
Менее 20	152-305	Более 75% возвышенности
	305-915	
	более 915	

В последние годы возрастает интерес к возможности применения статистических методов текстурного анализа изображений, но для цифровых моделей местности. Основным способом, применяемом в данных исследованиях является расчет “статистических признаков Харалика второго порядка”. Эти признаки вычисляются в предположении, что информация о текстуре изображения заключается в общем или среднем пространственном отношении одних оттенков серого к другим. Характеристики содержат в себе информацию о таких особенностях изображения, как однородность, линейные зависимости, контрастность, сложность структуры изображения. Каждая из характеристик может быть использована как некоторое число, и они могут быть кластеризованы. Вместе с тем для каждого конкретного набора нет точного способа определения, какие именно признаки дадут разбиение на классы, соответствующее действительности (Батюков, 2015).

В исследовании (Liu et al., 2013) авторы на 9 примерах оценили возможность классификации различных типов поверхности по значениям текстурных признаков Харалика. Анализ проводился на основе 3 типов данных независимо: углы наклона, кривизна и собственно высота. Принципом классификации признавался следующий: значения внутри класса должны быть максимально однородны, а между классами наоборот. Мерой соблюдения данного условия являлся коэффициент вариации. По результатам экспериментов для классификации рельефа местности наиболее подходящими являются углы наклона.

В работе (Huang et al., 2015) оценивалась зависимость текстурных признаков от разрешения ЦМР. В ходе исследования были сделаны следующие выводы:

- Уклон поверхности наименее чувствителен к изменению разрешения

- Контраст и однородность лучше других характеристик способны различить типы рельефа
- Однородность сильно зависит от разрешения ЦМР

Таким образом, большая часть практических исследований по классификации типов рельефа и выделению форм заключается в изучении текстуры местности и попытке формализовать субъективные представления о типах рельефа.

### 3.3. Методы текстурного анализа изображений

Методы текстурного анализа применяются в целях качественной кластеризации подстилающей поверхности. Компьютерные методы текстурной сегментации применяются в самых различных областях науки и техники – от исследования медицинских препаратов до распознавания текстур зон износа режущих инструментов. Тем не менее, наибольшее распространение они получили в работе с данными дистанционного зондирования Земли (Яковлева, Нестерова, 2009).

Признаком изображения называется его простейшая отличительная характеристика или свойство. Некоторые признаки являются естественными, т.е. они определяются визуальным анализом изображения. К ним относят светлоту(яркость), текстуру различных областей изображения, форму контуров объектов. Искусственные признаки (гистограммы распределения яркости и спектры пространственных частот) получают в результате обработки или измерений (Прэтт, 1982).

Вследствие высокого интереса специалистов к проблеме текстурного анализа разработано множество методов, которые применяют для решения задач в данной области. Большинство из них можно отнести к одной из двух групп:

- Методы анализа границ  
Выявляются части изображения, на которых происходит скачок в значениях выбранной характеристики, и по ним проводятся границы между текстурами.
- Методы анализа областей  
Выявляются части изображения, похожие по выбранной характеристике. Они считаются относящимися к одной текстуре.

Понятие текстура не имеет строгого определения. Разнообразие определений во многом и обусловило многочисленность подходов к анализу и используемых для этого признаков.

Существует множество определений текстуры. Например, Пикетт дал такую формулировку: «текстура используется для описания двумерных массивов изменений

яркости», а Хоукинс выделил следующие свойства изображения, охватываемые текстурой (Прэт, 1982):

- в нем можно найти фрагмент, «рисунок» которого регулярно повторяется в пределах области, которая велика по сравнению с размером фрагмента;
- этот «рисунок» образуется элементарными составными частями фрагмента, размещенными в некотором неслучайном порядке.

По используемым в анализе текстурным признакам современные подходы подразделяются на следующие группы (Фраленко, 2014):

1. Статистические
2. Геометрические
3. Структурные
4. Спектральные
5. Модельные

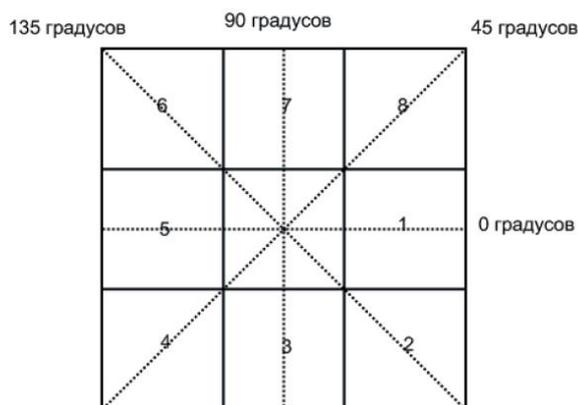
В статистических методах текстура рассматривается как количественная характеристика распределения значений яркости пикселя в области изображения, для чего используются матрицы частот появления пары значений яркости на определенном расстоянии и направлении друг от друга. У разных текстур такие матрицы будут различны.

Наиболее часто применяемой является матрица смежности уровня серого Харалика, который предложил описывать текстуру, покрывающую изображение, характеристиками специальных матриц вхождений  $E$ , рассчитываемых по изображению. Каждая матрица вхождений описывает структуру текстуры в соответствующем направлении от одного края обрабатываемого изображения к другому. По результатам расчета характеристик матриц  $E$  составляется вектор текстурных признаков изображения, которые могут рассматриваться как характеристики текстуры, покрывающей каждый пиксель изображения. Для снимка  $I$  его необходимо обойти с помощью скользящего окна, рассчитывая для каждого окна набор текстурных признаков Харалика (Прэт, 1982):

$$E, \theta(i, j) = |\{(x_1, y_1), (x_2, y_2) : I(x_1, y_1) = i, I(x_2, y_2) = j\}|, \quad (18)$$

где

- $i, j$  — уровни яркости матрицы  $P(i, j = 1, L)$ ;
- $I(x_1, y_1)$  и  $I(x_2, y_2)$  - значения элементов матрицы яркости с координатами  $(x_1, y_1)$  и  $(x_2, y_2)$ ;
- $r$  — расстояние между элементами  $I(x_1, y_1)$  и  $I(x_2, y_2)$ ;
- $\theta$  — угол между элементами  $I(x_1, y_1)$  и  $I(x_2, y_2)$  относительно горизонтальной оси, т.е. направление, всего их 4 штуки (рисунок 16).



*Рисунок 16. Четыре направления текстурного анализа Харалика*

Специалисты предлагают множество формул для вычисления статистических характеристик с помощью элементов матриц. Для некоторых из них дополнительно по элементам матрицы должны быть вычислены оценки математических ожиданий  $\mu$  и среднеквадратических отклонений  $\sigma$ . Для матрицы взаимного положения градаций тона, вычисляемой аналогично матрице смежности уровня серого Харалика, используются следующие статистические характеристики: энергия, контраст, корреляция, однородность, энтропия, автокорреляция, инерция, тень кластера, выпуклость кластера, максимальная вероятность (Патана, 2008). Перевод названий характеристик в разной литературе может немного отличаться, например: однородность, контраст, корреляция, дисперсия, гомогенность, среднее по суммам, дисперсия по суммам, суммарная энтропия, энтропия. (Конкин, Колесенкова, 2016)

Стоит выделить метод вектора разности уровня яркости, где вместо пары расстояние-угол для выбора пары пикселей используется вектор, и метод гистограмм суммы и разности, основанный на вычислении локальных свойств гистограмм суммы и разности уровней яркости пар пикселей (Астафуров, Аксёнов, Евсюткин, 2014)

На практике в том числе используются являющиеся существенными для зрительного восприятия эвристические признаки Тамуры (Фраленко, 2014):

- зернистость – признак, связанный с размером образующих текстуру примитивных элементов и с расстоянием между значимыми пространственными колебаниями оттенков серого;
- контраст – мера того, насколько сильно и резко может меняться цвет на изображении (признак является объединением влияний следующих факторов: разброс яркости, отделенность белого и черного цвета на яркостной гистограмме, период повтора некоторого шаблона);

- направленность – признак, измеряемый с помощью гистограммы локальных направлений контуров;
- линейность – признак, показывающий, насколько прямолинейны контуры на изображении;
- регулярность – общая изменчивость первых четырех признаков между различными частями изображения;
- грубость – субъективная оценка грубости переходов на изображении (выраженности текстуры)

Наиболее информативными считаются грубость, контраст и направленность.

При геометрических подходах повторяющийся характер расположения текстурных элементов оценивают с помощью функции автокорреляции, которая может использоваться для оценки степени регулярности и мелкозернистости. Для крупнозернистой текстуры величина автокорреляционной функции уменьшается незначительно по сравнению с областью, в которой находится мелкозернистая текстура.

В геометрических методах анализа текстуры она воспринимается как нечто, составленное из «элементов» или примитивов. После того, как элементы текстуры идентифицированы, применяются два основных подхода к анализу текстуры: а) вычисление статистических признаков; б) оценка принципа расположения примитивов, что может включать в себя геометрический или синтаксический методы анализа текстуры, например, анализ диаграмм полигонов (Фраленко, 2014).

Довольно распространены энергетические текстурные признаки Лавса (рисунок 17). Расчет предполагает разделение изображения на области с разной текстурой с помощью набора из 16 масок размером  $5 \times 5$ .

Для их составления используют следующие вектора:

- $L5 = [ 1 \ 4 \ 6 \ 4 \ 1 ]$  – Уровень
- $E5 = [ -1 \ -2 \ 0 \ 2 \ 1 ]$  – Край
- $S5 = [ -1 \ 0 \ 2 \ 0 \ -1 ]$  – Пятно
- $W5 = [ -1 \ 2 \ 0 \ -2 \ 1 ]$  – Волна
- $R5 = [ 1 \ 4 \ 6 \ -4 \ 1 ]$  – Рябь

Путём перемножения данных векторов можно получить 25 двумерных масок. Симметричные пары масок можно усреднить, после чего их останется 15. В результате каждый пиксель изображения будет охарактеризован вектором из пятнадцати значений, которые далее используются в качестве текстурных признаков для сегментации. Иногда

маску W5 не используют, тогда после перемножения получается 16 масок, после усреднения – 9 текстурных карт (Яковлева, Панченко, 2007).



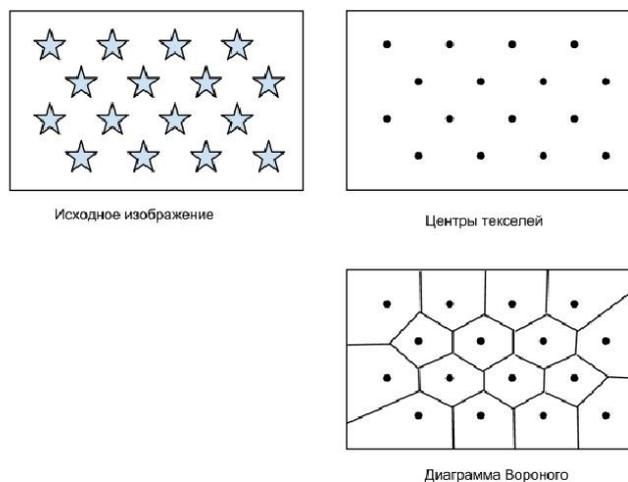
*Рисунок 17. Результат обработки изображения с помощью энергетических характеристик Лавса*

В структурных методах принимается, что текстура представляет собой множество текстурных примитивов – текселов, расположенных в некотором повторяющемся или почти повторяющемся порядке (рисунок 18). Следовательно, они чаще всего плохо справляются с обработкой реальных изображений, на которых текстурные примитивы выделить сложно (Фраленко, 2014).

В качестве примера структурного анализа снимков можно рассмотреть метод построения структурного описания Тусерьяна и Джейна.

За тексел принимаются области, которые можно обнаружить с помощью простых операций, например каждую область можно разделить на две части, в одной из которых все пиксели будут иметь значение выше установленного порога, а в другой – ниже. Для определения оптимального порога обычно исследуют гистограмму яркости пикселей.

Описание пространственной взаимосвязи текселов определяется на основе построенной по их центрам диаграммы Вороного. При этом происходит разбиение плоскости на области, точки в каждой из которых ближе к одному из центров текселов, чем к какому-либо другому.



*Рисунок 18. Графическое представление структурного алгоритма*

По схожести свойств многоугольников Воронова (числа сторон, площади, периметра, ориентации) и самих текселов можно выделить области с определенной текстурой.

Спектральные методы основаны на работе со спектром Фурье и вейвлетами.

Преобразование Фурье следует рассматривать как разложение сигнала на частотную и амплитудную составляющие. Применительно к изображениям преобразование Фурье используется в том числе для выявления периодических структур, которое можно использовать для детектирования объектов. В качестве входных данных выступает двумерное изображение с наложенным шумом.

В случае вейвлета-анализа осуществляется разложение сигнала по базисным функциям (вейвлетам), которые строятся на основе порождающего вейвлета с использованием операций сдвига и масштабирования. Для исходного изображения строится свертка с базисной функцией (фильтром), далее вычисляется разность полученного и исходного сигнала и строится вторая проекция этой разности, причем каждая базисная функция — сдвиг предыдущей, растянутой в определенное число раз.

Эффективными признаны фильтры независимого анализа компонент и фильтры Габора. Первые получаются за счет анализа обучающей выборки изображений, эти фильтры локальны и подобны фильтрам Габора, однако, они отражают основные направления текстуры изображений и имеют естественный характер.

Преобразование Фурье лучше всего подходит для работы с периодическими и квазипериодическими текстурами, поскольку двумерные спектры таких текстур содержат выбросы большой мощности и могут быть найдены даже при значительной зашумленности

изображения (Грузман, Петрова, 2014). Вейвлеты, в отличие от рядов Фурье, имеют большое количество базисных функций. Как следствие, Вейвлет-анализ лучше, чем Фурье-анализ, справляется с зашумленными изображениями, обеспечивает лучшее представление локальных особенностей сигналов (Пигаль, 2014).

Спектральные методы хорошо различают мелкозернистые и крупнозернистые текстуры, но при этом, как показали эксперименты, при анализе отличающихся друг от друга естественных структур, таких как лесные массивы и городские кварталы, могут быть получены схожие спектры, из-за чего сегментация снимка будет проведена неверно (Шитова, Пухляк, Дроб, 2014).

В рамках модельных подходов используется фрактальный метод. Зачастую отдельные части текстур похожи на их целое изображение, поэтому многие специалисты предлагают анализировать текстуры как фракталы. Так, на фракталы похожи края облаков и побережья морей. Из-за того, что искусственные и естественные объекты на земной поверхности обладают разной фрактальной размерностью (характеристикой, описывающей сложность их рисунка), фрактальные методы хорошо подходят и для поиска искусственно созданных объектов на поверхности Земли (Фраленко, 2014).

Если краевая линия объекта является фрактальной, то ее длина  $L(\delta)$  зависит от длины эталона  $\delta$  и при стремлении эталона к нулю стремится к бесконечности, причем определяемая количеством располагаемых на ней квадратов  $\delta^2$  площадь объекта  $A(\delta)$  остается конечной. Тем самым, отношение периметра к квадратному корню из величины площади расходится. Для случая фрактальной береговой линии Мандельбротом было получены следующее соотношение между площадью и периметром:

$$L(\delta) = C\delta^{(1-D)} (A(\delta))^{D/2}, \quad (19)$$

где  $D$  – размерность фрактала, оцениваемая по уравнению регрессии

$$\log(L) = C + B \log G, \quad (20)$$

$$D = 1 - B, \quad (21)$$

где  $B$  – наклон регрессии,  $G$  – величина шага и  $C$  – константа. Соотношение выполняется для любого достаточно малого эталона длины  $\delta$ , позволяющего удовлетворительно обмерить самый малый из объектов (Фисенко, 2008).

Работа (Яковлева, Нестерова, 2009) показывает, что выделение объектов на основе коэффициентов Харалика или на основе метода спектрографических структур дает самый достоверный результат. Необходимо отметить, что текстура может рассматриваться не

только по значениям яркости, но и по любым значениям пикселей в независимости от отображаемого явления.

## ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 4.1. Обоснование выбора методов анализа цифровой модели поверхности ледника

Поиск ледниковых трещин, являющихся результатом разрывных нарушений, связан с выявлением линеаментов. Согласно Горной энциклопедии под редакцией Козловского под линеаментом понимается протяженное линейное образование, длина которого во многом превышает его ширину. К ним относят разломы разной глубины заложения, зоны трещиноватости, как явные, так и скрытые, горные хребты, гряды, цепи барханов, микротрещины в слоях осадочного происхождения, срединно-океанические хребты, островные дуги и т.д.

Было бы неверно утверждать, что все скрытые трещины совершенно незаметны на ортофотоплане, скорее их обнаружение затруднено и требует время. В данной работе рассматривается возможность использования цифровых моделей дневной поверхности ледника (ЦМП) для выявления трещин. Поэтому разработка методики обнаружения скрытых ледниковых трещин сводится к поиску метода, при котором трещины более заметны и однозначны, чем на ортофотоплане.

Для скрытой ледниковой трещины характерно наличие снежного моста, что затрудняет ее обнаружение. Поскольку скрытая трещина все равно содержит в себе полое пространство, снежный мост оседает под действием силы тяжести и образует некоторый прогиб, что должно отразиться на цифровой модели поверхности. В связи с этим, допускается, что не все ледниковые трещины могут быть обнаружены при анализе цифровой модели.

В работе (Florinsky, Bliakharskii, 2019) выявление линеаментов, чем являются ледниковые трещины, выполняется по анализу геоморфометрических величин, поскольку они проявляются как некоторые формы рельефа. Из четырех групп геоморфометрических величин можно ограничиться только группой локальных характеристик.

Поскольку наличие линеамента, в данном случае ледниковой трещины, нарушает основную структуру поверхности, это может быть выражено в изменении текстурных характеристик. В связи с этим, можно предположить, что применение методов текстурного анализа, а именно расчет текстурных характеристик Харалика может быть эффективным при обнаружении ледниковых трещин. Данный метод был выбран по следующим причинам. Во-первых, при расчете текстурных признаков Харалика используемая матрица смежности уровня рассматривает отношение соседних значений по 4 направлениям, что должно подчеркнуть линейные формы рельефа определенной ориентации. Во-вторых, исследования

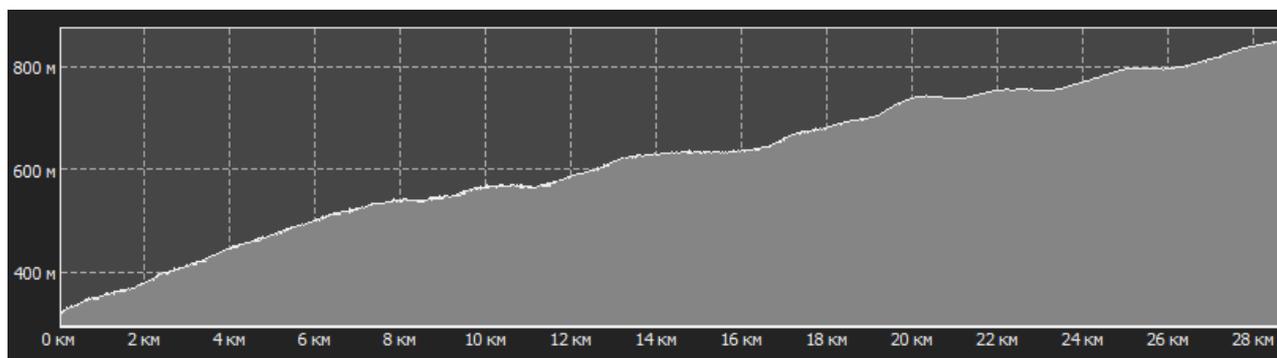
показывают эффективность расчетов статистических признаков Харалика по ЦМП и их производным.

Выбор пространственного разрешения является важным этапом при любом анализе цифровых моделей. Чем меньше пространственное разрешение, тем более подробной является модель, однако слишком маленькое разрешение может содержать шумы. В тоже время при слишком низком пространственном разрешении цифровая модель может быть слишком обобщена. Чтобы сохранить формы рельефа, размер пиксела в идеале должен составлять четверть от размера интересующего объекта, в данной работе четверть от ширины трещины (Флоринский, 2010). Можно предположить, что разрешение цифровой модели поверхности влияет на вероятность определения трещин с разными геометрическими характеристиками.

Таким образом, ожидается, что в основе поиска скрытых ледниковых трещин по цифровым моделям поверхности лежит расчет локальных геоморфометрических характеристик и статистических признаков второго порядка Харалика.

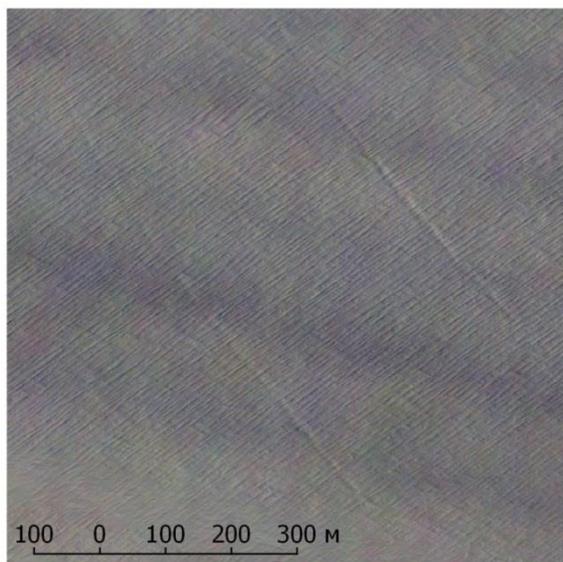
#### 4.2.Используемые материалы и описание региона

В качестве района исследования рассматривался участок первых 30 километров санно-гусеничного похода Восток-Прогресс, на котором происходит восхождение на купол ледника, в 10 км на юг от станции Прогресс. С севера на юг высота поверхности равномерно возрастает от 230 до 850 м (рисунок 19).



*Рисунок 19. Профиль исследуемого участка СГП*

Для этого района характерно наличие особенно большого количества трещин, что делает движение СГП опасным. Ледниковая поверхность представлена эоловыми формами рельефа, встречаются как открытые, так и скрытые трещины, ширина которых варьируется от 0,5 м до 23 м (рисунок 20).



*Рисунок 20. Скрытые трещины на ортофотоплане  
(перпендикулярно расположены эоловые формы рельефа)*

В начале 2017 года с двухнедельной разницей дважды была проведена аэрофотосъемка участка санно-гусеничного похода БПЛА длиной 30 км, ширина съемки – 3 км. Результатами стали два одновременных ортофотоплана и цифровые модели поверхности с разным пространственным разрешением (25 см, 50 см, 1 м). Вторая съемка из-за погодных условий покрывает только половину территории, т.е. использование одновременных данных возможно только на северную часть района исследования (рисунок 21). Пространственное разрешение ортофотопланов – 20 см, цифровых моделей поверхности – для северной части 25 см и 50см, для всей территории 1 м.

По ортофотоплану были выделены ледниковые трещины. Аэрофотосъемка проводилась при разных погодных условиях, что влияет на построение ортофотопланов, там, где возможно, при векторизации использовались ортофотопланы за обе даты. Из сотен ранее выделенных на ортофотоплане было отобрано 15 трещин, вероятность обнаружения которых планировалось определить на основе ЦМП (рисунок 22). Отдельные трещины для данного участка не характерны, чаще они образуют своеобразные скопления, поэтому было выбрано по 1-2 трещине из каждого скопления (рисунок 23). На данном участке санно-гусеничного похода их ориентация преимущественно перпендикулярна эоловым формам рельефа.

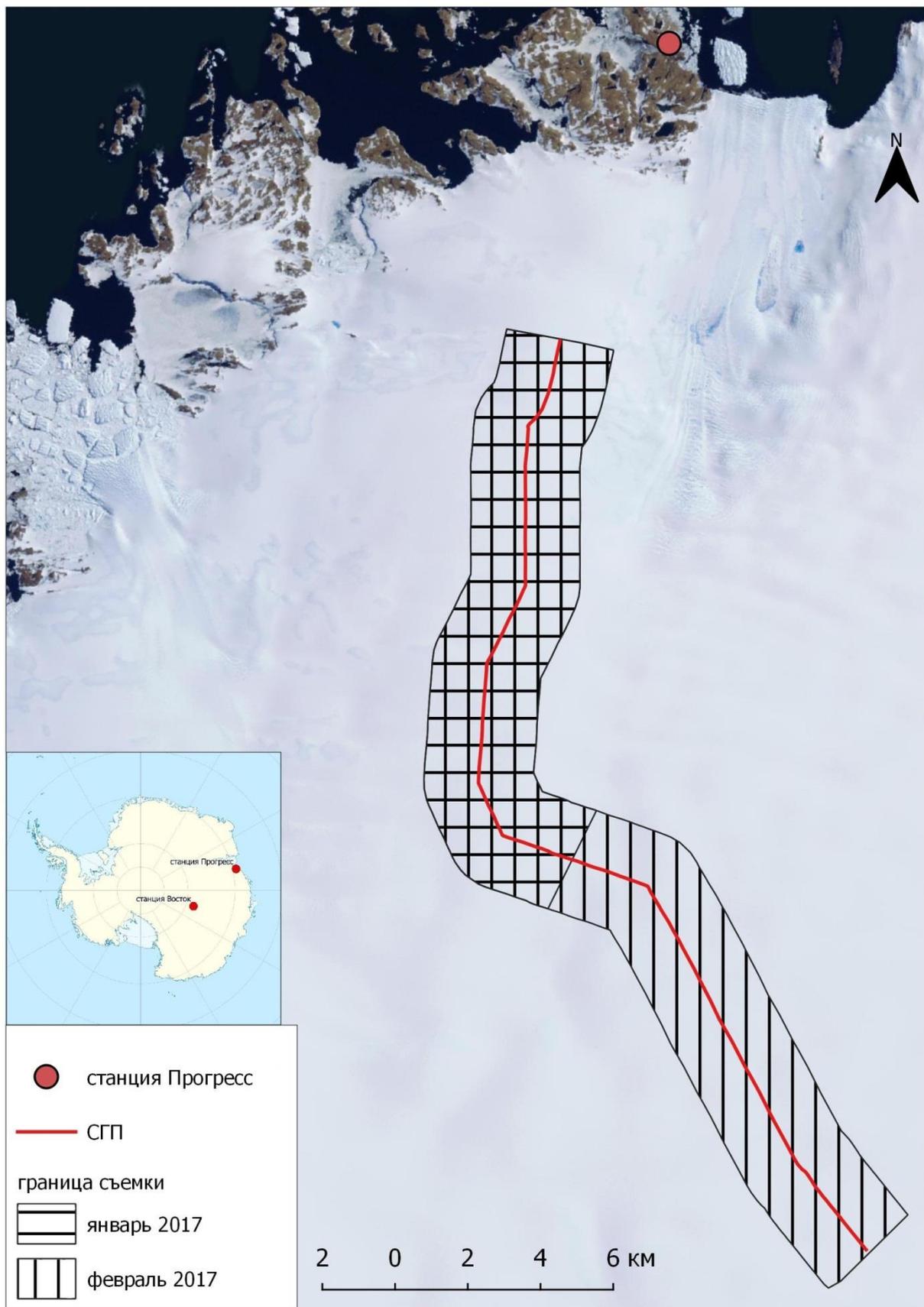


Рисунок 21. Границы аэрофотосъемки участка СГП



Рисунок 22. Схема анализируемого участка (бирюзовым цветом выделена область съемки, черным – ось санно-гусеничного похода, красным – ледниковые трещины)

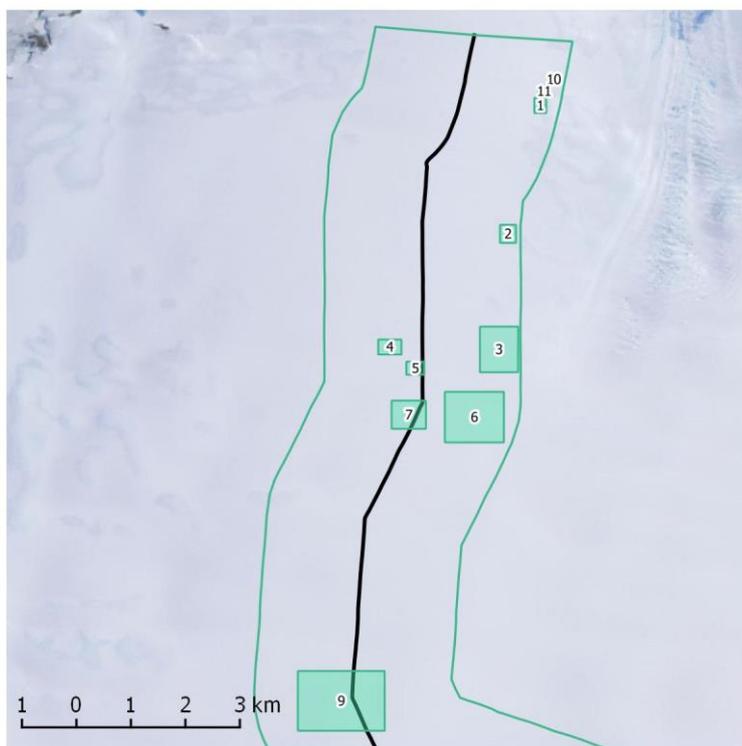


Рисунок 23. Области с трещинами, участвовавшие в оценке эффективности методов

По ортофотоплану были измерены длина и приблизительная ширина каждой трещины (таблица 3). По различным причинам (характеристика самой трещины, особенности аэрофотосъемки) скрытые трещины на ортофотоплане могут выглядеть неодинаково,

поэтому они условно были разделены на две категории: заметные и слабо-различимые. Известно, что на некоторых трещинах проводились полевые работы, и их вскрывали. Одна из таких трещин (№3) была включена в набор.

Таблица 3. Характеристики трещин

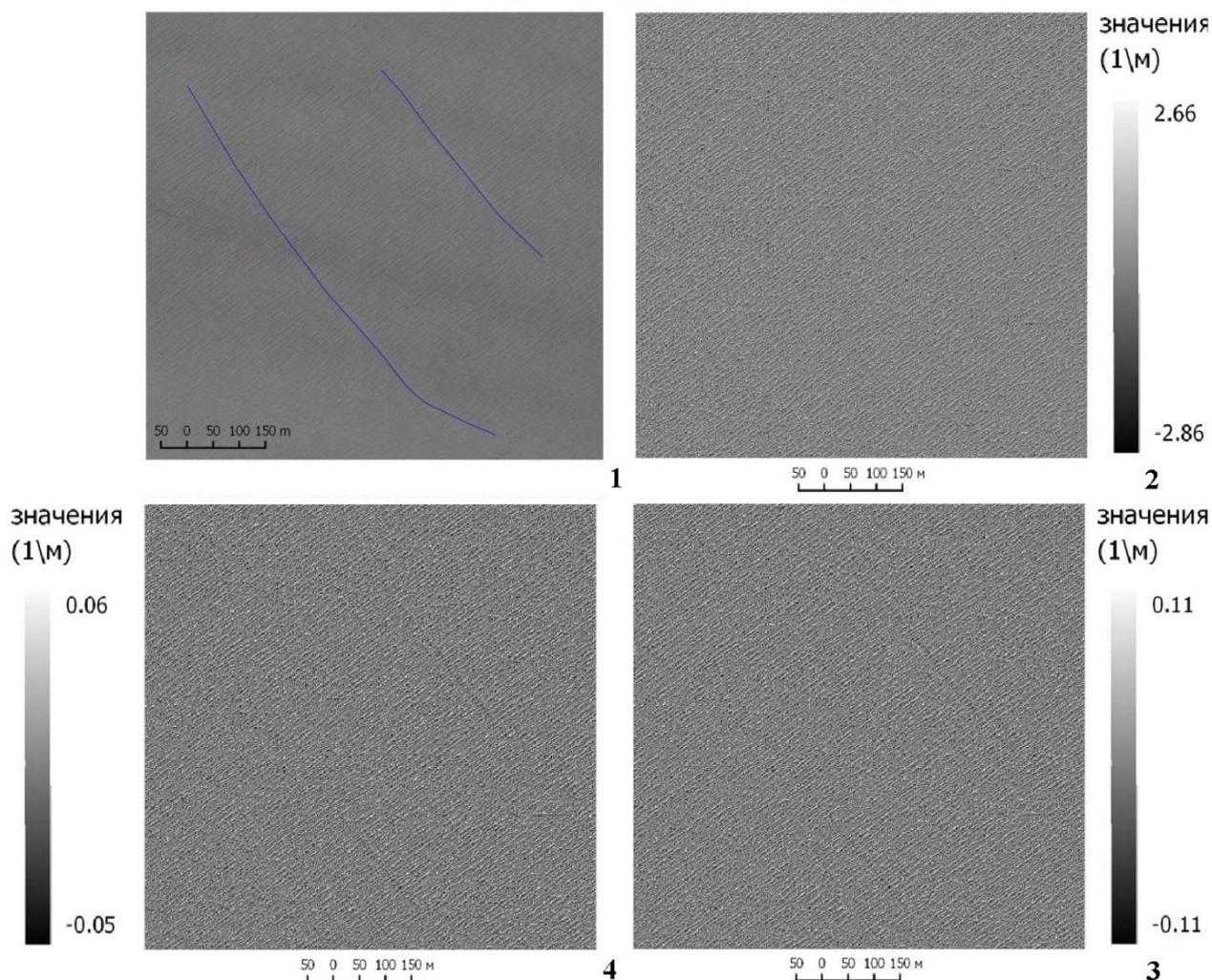
№ трещины	№ участка	Длина (м)	Ширина (м)	Категория
1	4	123	1.5	слабо-различимая
2	4	77	1.5	слабо-различимая
3	9	883	2.0	слабо-различимая
4	2	191	3.0	заметная
5	2	170	5.0	заметная
6	6	913	7.0	слабо-различимая
7	6	476	8.0	слабо-различимая
8	11	117	0.5	заметная
9	10	99	0.6	слабо-различимая
10	3	644	5.0	слабо-различимая
11	3	247	7.0	слабо-различимая
12	3	501	2.0	слабо-различимая
13	7	300	3.0	слабо-различимая
14	1	155	0.6	заметная
15	5	139	2.0	слабо-различимая

### 4.3. Анализ цифровой модели поверхности

#### 4.3.1. Расчет локальных геоморфометрических характеристик

При поиске трещин неизвестно, какие именно морфометрические величины позволят распознать объекты. Поэтому на двух трещинах (№ 6,7) было проверено, какие морфометрические характеристики больше подходят для обнаружения трещин. При выборе конкретных характеристик использовалась цифровая модель с разрешением 1 метр. Часть расчетов выполнялась в свободно распространяемом ПО QGIS с использованием инструмента «Slope, aspect, curvature» методом Зевенберген-Торна, являющимся достоверным и эффективным. Данный инструмент выполняет расчет поверхностей уклона, экспозиции и 9 видов кривизны поверхности. Оставшаяся часть параметров была получена с последующим применением растрового калькулятора. Таким образом, были получены следующие морфометрические величины: горизонтальная кривизна, вертикальная кривизна, кривизна горизонтали, минимальная кривизна, максимальная кривизна, средняя кривизна, разностная кривизна, гауссова кривизна, избыточная горизонтальная кривизна, избыточная вертикальная кривизна, аккумуляционная кривизна, кольцевая кривизна и поперечная кривизна (дословный перевод “cross-sectional”) - аналог кривизны горизонтали. Из всех

рассчитанных характеристик (Приложение 1) рисунок трещины проявился только на трех: плановая, горизонтальная, поперечная (рисунок 24).



*Рисунок 24. Выбранные морфометрические характеристики:  
1- фрагмент ортофотоплана с трещиной, 2- кривизна горизонтали,  
3- горизонтальная кривизна, 4- поперечная кривизна*

Далее было проверено, насколько пригодны для выявления трещин цифровые модели с разным разрешением. По рассчитанной горизонтальной кривизне на ЦМП с разрешением 50 см и 25см выяснилось, что на таких моделях выявление трещин невозможно. Данные ЦМП содержат много шума, а формулы расчета геоморфометрических характеристик (3-17), содержащие частные производные второго порядка, усиливают любые отклонения на ЦМП (рисунок 25).

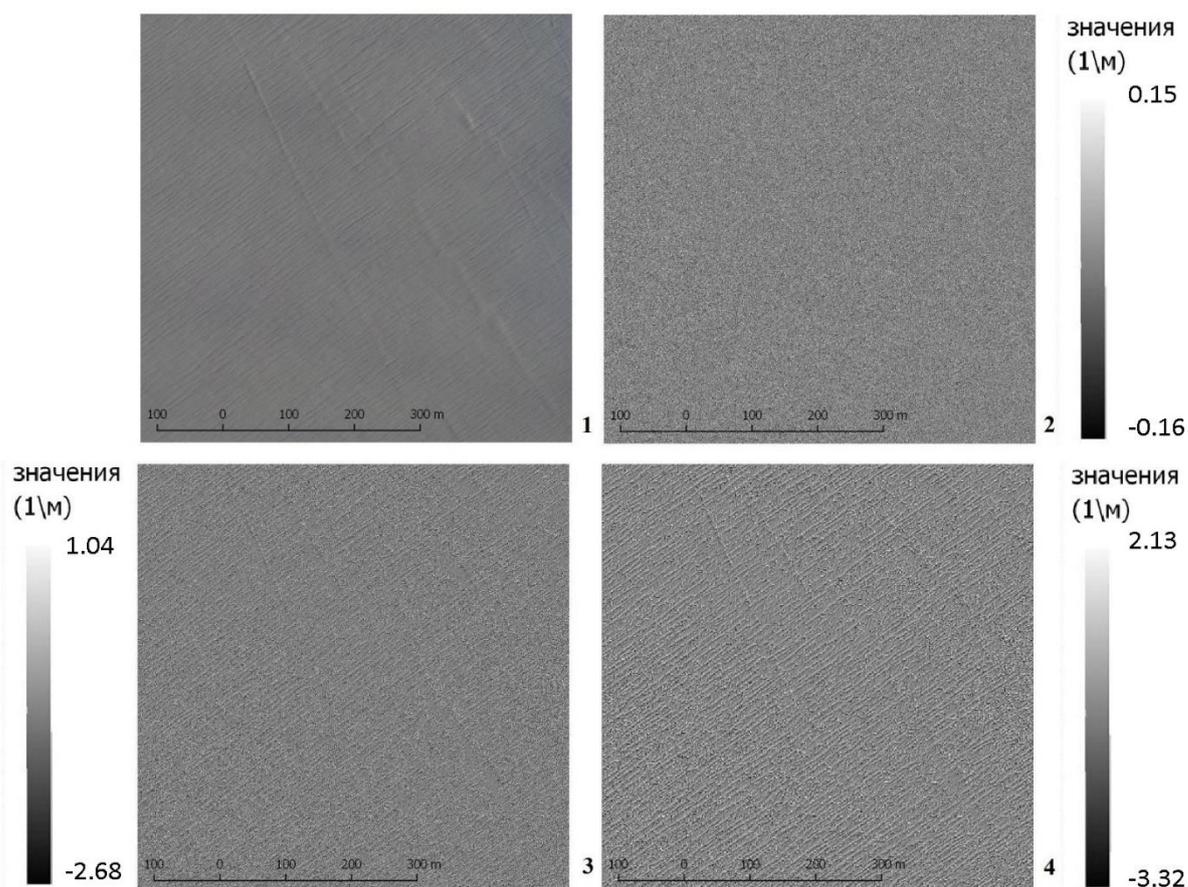


Рисунок 25. Влияние пространственного разрешения ЦМР на отображение трещин  
 1 - фрагмент ортофотоплана с трещинами, 2 – горизонтальная кривизна  
 (разрешение 25 см), 3 - горизонтальная кривизна (разрешение 50 см), 4-  
 горизонтальная кривизна (разрешение 1 м).

При этом сглаживание модели в целях избавления от шума неприменимо, потому что в таком случае могут исчезнуть сами трещины. Рисунок 26 демонстрирует, что на профиле скрытые трещины не отличаются от остальных микроформ рельефа. В итоге оптимальное разрешение для определения трещин составило 1 м.

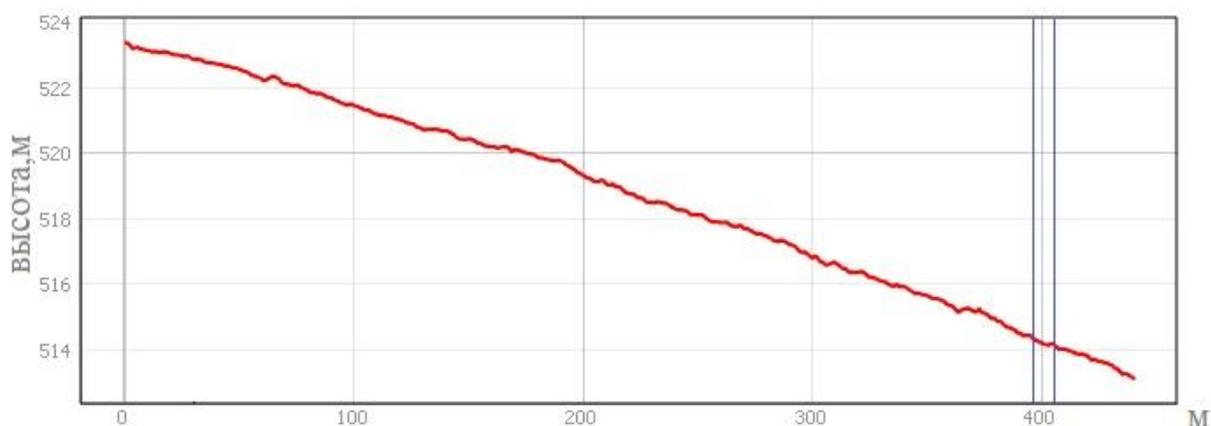


Рисунок 26. Скрытая трещина (№ 7) на профиле поверхности  
 (синим цветом показана граница трещины)

Наконец, значения морфометрических величин, отличающиеся знаком, отражают противоположные по направлению происходящие физические процессы. Исходя из этого, для интерпретации рассчитанных характеристик важно визуальное четкое разделение значений относительно нуля (Флоринский, 2010). Однако на практике для выявления трещин нагляднее использование трехцветной шкалы с разделением экстремальных значений от значений близких к нулю (рисунок 27,28).

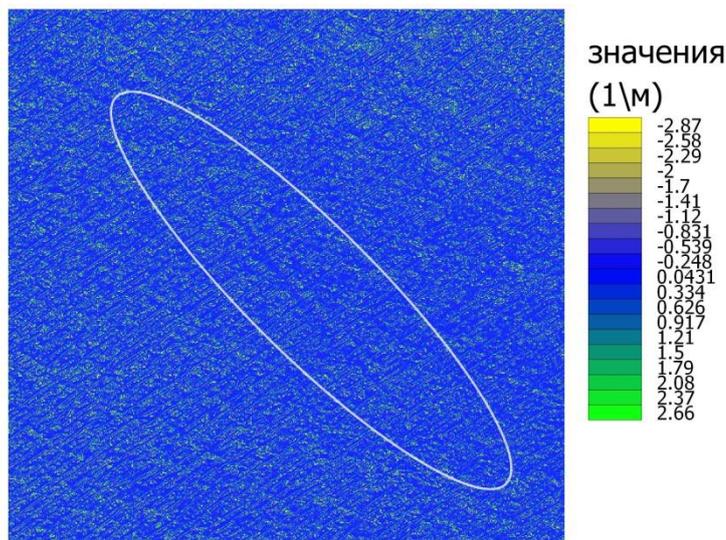


Рисунок 27. Использование трехцветной шкалы для значений кривизны горизонтали (белым цветом выделена область расположения трещины)

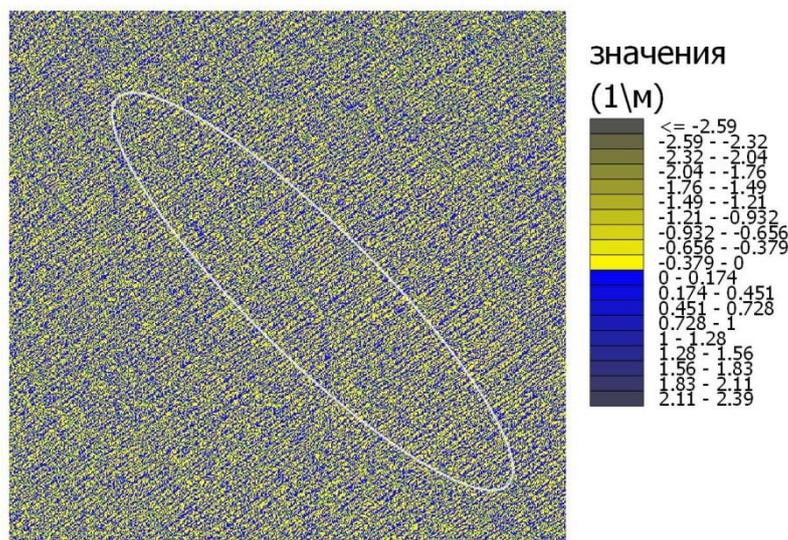


Рисунок 28. Разделение значений кривизны горизонтали строго относительно нуля (белым цветом выделена область расположения трещины)

#### 4.3.2. Расчет текстурных признаков Харалика

Результат расчета текстурных признаков Харалика сильно зависит от параметров, задаваемых при вычислении. При расчете статистических признаков Харалика по формуле (18) непосредственно по ЦМП большое значение имел подбор следующих параметров:

- размер скользящего окна;
- количество уровней значений матрицы  $P(i, j = 1, L) - i, j$ ;
- расстояние между элементами  $I(x_1, y_1)$  и  $I(x_2, y_2) - r$ ;
- угол между элементами  $I(x_1, y_1)$  и  $I(x_2, y_2)$  относительно горизонтальной оси, т.е. направление -  $\theta$

Поскольку цифровая модель местности содержит в себе значения высот, а это величина непрерывная, то при расчете характеристик значения перекодируются. Число равняется количеству уровней квантования  $P$  (8,16,32,64,128 или 256). В основе расчета текстурных признаков Харалика лежит подсчет количества сочетаний разных значений в определенном направлении, где число значений равняется количеству уровней (Hall-Beyer, 2017). Если при вычислении текстурных характеристик уровней слишком мало, то перепад высот для каждого уровня будет большой, и некоторые микроформы и особенности рельефа не будут обозначены, поскольку пиксели, попадающие на них, будут иметь одинаковое значение (рисунок 29). Из этого следует два вывода: количество уровней квантования должно быть как можно больше, обязательно разбиение ЦМП на блоки, в пределах которых перепад высот не превышает определенное значение.

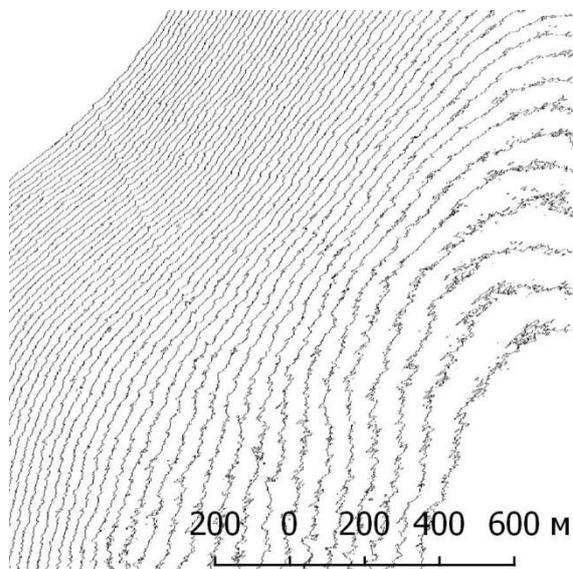


Рисунок 29. Контраст ( $\theta = 0^\circ$ ),

*результат расчета при слишком большом перепаде высот*

Использование абсолютно всех характеристик не имеет смысла, поскольку некоторые характеристики отражают ледниковые трещины, а некоторые совершенно неприменимы. Для трещин (№6, №7) были получены 11 характеристик по всем направлениям. Размер скользящего окна составил  $3 \times 3$  пиксела, т.к. на трещины приходится мало пикселей, а чем меньше размер интересующего объекта, тем меньше должно быть скользящее окно (Hall-Beyer, 2017). Расстояние между элементами – 1 пиксел, т.е. сравнивались значения

действительно соседних пикселей, количество уровней равнялось 256. Подобрать направление не представлялось возможным, потому что допускалась различная ориентация трещин. ЦМП с разрешением 1 м разбивалась на блоки по горизонталям таким образом, чтобы перепад высот не превышал 30 метров. Величина в 30 метров была определена опытным путем. Расчеты также выполнялись в ПО QGIS вызовом инструмента GRASS GIS «r.texture». Результаты представлены в Приложении 2, название текстурных характеристик указано соответственно названию выходных данных инструмента.

Наиболее информативными для обнаружения трещин оказались гомогенность и контраст, но это величины взаимообратные, поэтому дальше в работе используется и упоминается только гомогенность (Hall-Beyer, 2017). Необходимо отметить, что текстурные характеристики – величины безразмерные. Гомогенность принимает значение от 0 до 1, чем больше значение, тем меньше отличаются значения соседних пикселей друг от друга в заданном направлении (рисунок 30).

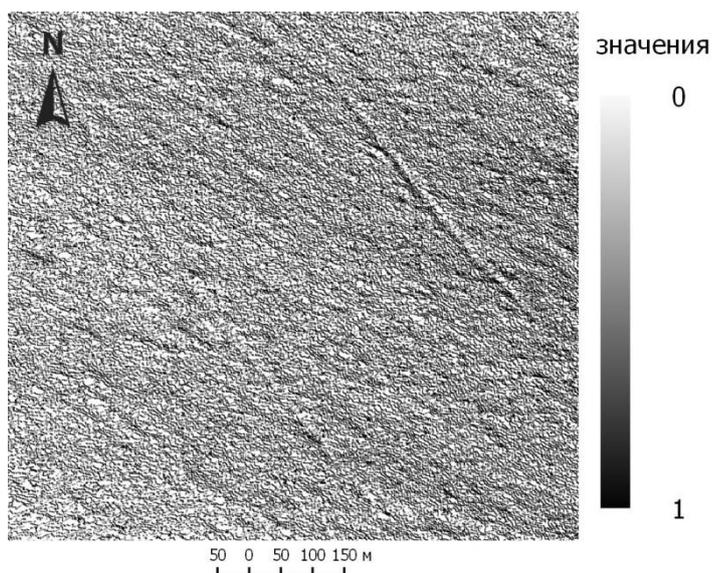
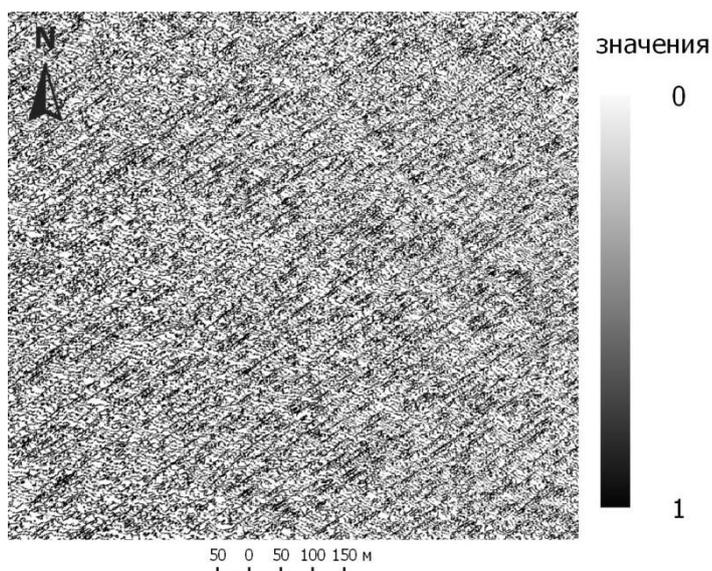


Рисунок 30. Гомогенность ( $\theta = 45^\circ$ )

Как и предполагалось, разные направления при расчете подчеркивают формы рельефа различной ориентации. Так рассчитанная под углом  $135^\circ$  гомогенность подчеркивает положение эловых форм (рисунок 31). Преимущественное положение выбранных трещин такое, что они проявляются при углах  $45^\circ$  или  $0^\circ$ . Это не исключает использование направлений  $90^\circ$  и  $135^\circ$ , потому что допускается любая ориентация трещин на исследуемой территории.



*Рисунок 31. Гомогенность ( $\theta = 135^\circ$ )*

В отличие от геоморфометрических характеристик гомогенность не так чувствительна к шуму, присутствующему на ЦМП с разрешением 25 см. Превышение высот соседних пикселей на модели с разрешением 25 меньше, чем превышение высот между пикселями на модели с разрешением в 1 метр. Следовательно, эти пиксели после перекодирования имеют одинаковое значение. Поэтому для получения корректного результата перепад высот в блоке для ЦМП с разрешением 25 см должен быть меньше (около 10 м). В результате рассчитанная по модели с разрешением 25 см гомогенность может выявлять трещины шириной менее 1 метра. На рисунке 32 можно заметить, что распознаются части трещин, ширина которых около 50 см.

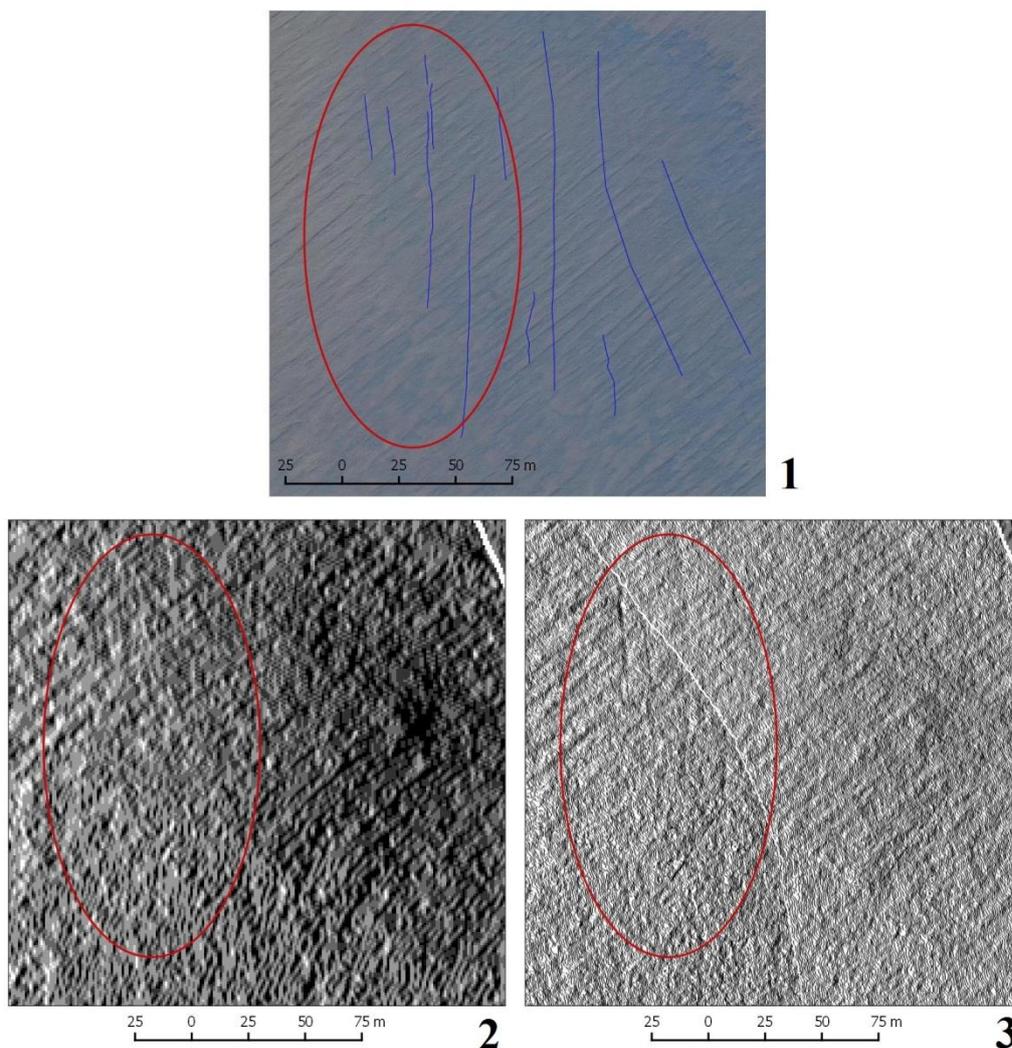


Рисунок 32. Определение трещины шириной до 1 м:

1 – фрагмент ортофотоплана,

2 – гомогенность,  $\theta = 0^\circ$ , разрешение 1 м,

3 – гомогенность,  $\theta = 0^\circ$ , разрешение 25 см

(красным цветом выделена область трещин, синим цветом показано положение трещин)

#### 4.4. Результаты практической части

##### 4.4.1. Оценка эффективности используемых методов

Исходя из результатов, описанных в разделе, под геоморфометрическим методом поиска ледниковых трещин подразумевается расчет трех локальных геоморфометрических величин, а под текстурным анализом понимается расчет текстурного признака Харалика – гомогенности.

Возможность применения каждого метода для исследования трещин оценивалась по следующим критериям:

- Вероятность обнаружения трещин;

- Выявление трещины в зависимости от ее геометрической характеристики;
- Влияние разрешения ЦМП на поиск трещин;
- Наличие дефектов ЦМП и их влияние на результаты геоморфометрического и текстурного анализов.

Для расчета вероятности обнаружения каждым из методов определено, сколько трещин удалось выявить. В таблице 4 для каждого объекта указано, какими рассчитанными характеристиками он был выявлен.

Таблица 4. Выявление трещин разными характеристиками (1 - определена, 0 – не определена)

№ трещины	Длина (м)	Ширина (м)	Категория	Характеристика для выявления			
				Горизонтальная кривизна	Поперечная кривизна	Кривизна горизонтали	Гомогенность
1	123	1.5	слабо-различимая	0	0	1	0
2	77	1.5	слабо-различимая	1	1	1	1
3	883	2.0	слабо-различимая	1	1	1	1
4	191	3.0	заметная	1	1	1	1
5	170	5.0	заметная	1	1	1	1
6	913	7.0	слабо-различимая	0	0	0	1
7	476	8.0	слабо-различимая	1	1	1	1
8	117	0.5	заметная	0	0	0	0
9	99	0.6	слабо-различимая	0	0	0	0
10	644	5.0	слабо-различимая	1	1	1	1
11	247	7.0	слабо-различимая	1	1	1	1
12	501	2.0	слабо-различимая	0	1	0	1
13	300	3.0	слабо-различимая	0	0	0	0
14	155	0.6	заметная	0	0	0	0
15	139	2.0	слабо-различимая	0	0	0	1

С помощью комплекса из трех геоморфометрических величин (горизонтальная, поперечная кривизна и кривизна горизонтали) удалось обнаружить 9 из 15 трещин, а гомогенность определила положение 10. Как и предполагалось, абсолютно все объекты не могут быть найдены. Несмотря на то, что в целом гомогенность выявила больше объектов, одна из необнаруженных ею трещин была определена с помощью кривизны горизонтали. Это означает, что два данных метода могут дополнять друг друга. Вероятность обнаружения трещин представлена в таблице 5.

Таблица 5. Вероятность обнаружения трещин разными методами

Метод анализа	Текстурный	Геоморфометрический	Совместно
Вероятность	66%	60%	73%

Изучение влияния разрешения цифровых моделей поверхности на определение трещин интересно, в первую очередь, потому что от размера пиксела зависит теоретически минимальный размер трещины, которую можно определить. Положение вещей таково: при геоморфометрическом анализе использование модели с разрешением 25 см совершенно невозможно, при текстурном анализе на таких ЦМП можно распознать часть трещины. При этом цифровая модель с разрешением в 50 см оказалась бесполезной, потому что ширина трещин либо настолько мала, что не отображается при размере пиксела цифровой модели 25 см, либо ее размер таков, что она может быть найдена на ЦМП с разрешением 1 м.

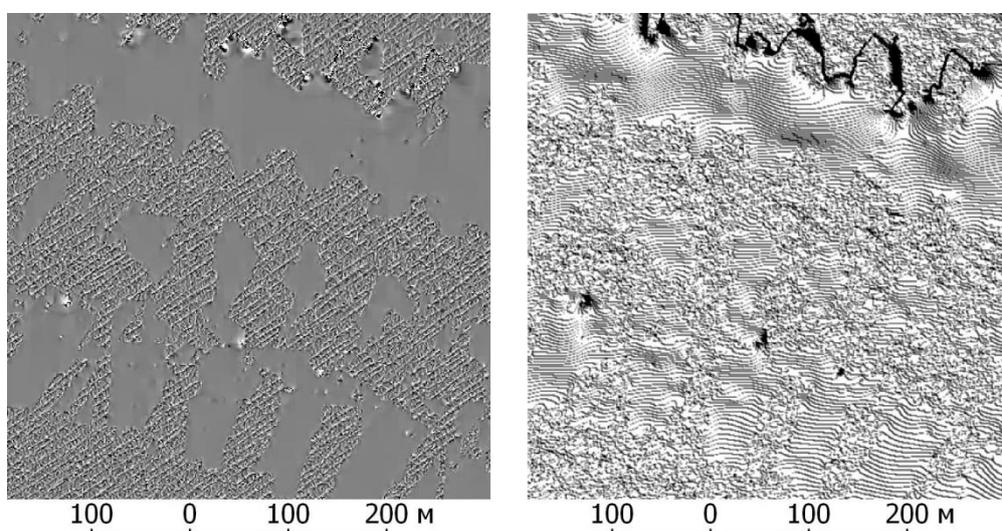
Взаимосвязь между возможностью обнаружения определенным методом скрытой трещины и ее геометрическими характеристиками существует. Согласно таблице можно сделать вывод, что из плохо-различимых не были определены трещины, ширина которых меньше полуметра, даже если они отчетливо видны на ортофотоплане из-за отсутствия явного линеамента. Возможность использовать ЦМП с максимальным разрешением при текстурном анализе не изменило ситуацию. Выбранная для эксперимента узкая трещина не обозначилась, хотя схожие по характеристике соседние трещины проявились.

Геоморфометрические характеристики позволяют выявить трещины шире 3 метров, более узкие трещины определяются только при их длине от 500 метров. Текстурный анализ независимо от длины может выделить трещину, если ее ширина составляет 2-3 пиксела соответственно разрешению ЦМП.

В последнюю очередь было проверено, насколько ошибки цифровых моделей поверхности, вызванные особенностью обработки результатов аэрофотосъемки, влияют на возможность интерпретации полученных результатов, как морфометрического анализа, так и текстурного. Артефакты ЦМП были разделены на незначительные и значительные. К первой группе относятся мелкие дефекты, которые легко отличаются от форм рельефа и не портят общую картину (рисунок 33). Вторая группа ошибок приводит к невозможности проведения ни текстурного, ни геоморфометрического анализа (рисунок 34). Всего таких областей было 3. Здесь же стоит добавить, что из-за характерных дефектов на краях цифровых моделей в среднем ширина анализируемой территории сократилась на 100 метров по каждому краю.



*Рисунок 33. Пример незначительного дефекта ЦМП (гомогенность)*



*Рисунок 34. Пример значительных дефектов ЦМП*

*(слева – рассчитанная по ЦМП кривизна горизонтали, справа – гомогенность)*

#### 4.4.2. Обнаружение новых трещин

Завершающим этапом практической части стало использование описанных методов анализа рельефа для поиска новых трещин на исследуемом участке (рисунок 35). Всего было найдено 18 объектов длиной от 80 метров до 1 км. Средняя ширина трещин составила 10 м. Так как поиск трещин в данном районе связан с обеспечением безопасности прохождения СГП, было измерено расстояние от оси дороги до ближнего к ней края трещины. Половина трещин находится на расстоянии менее километра до СГП, при этом самая ближняя из них расположена всего в 50 метрах от дороги (таблица 6).



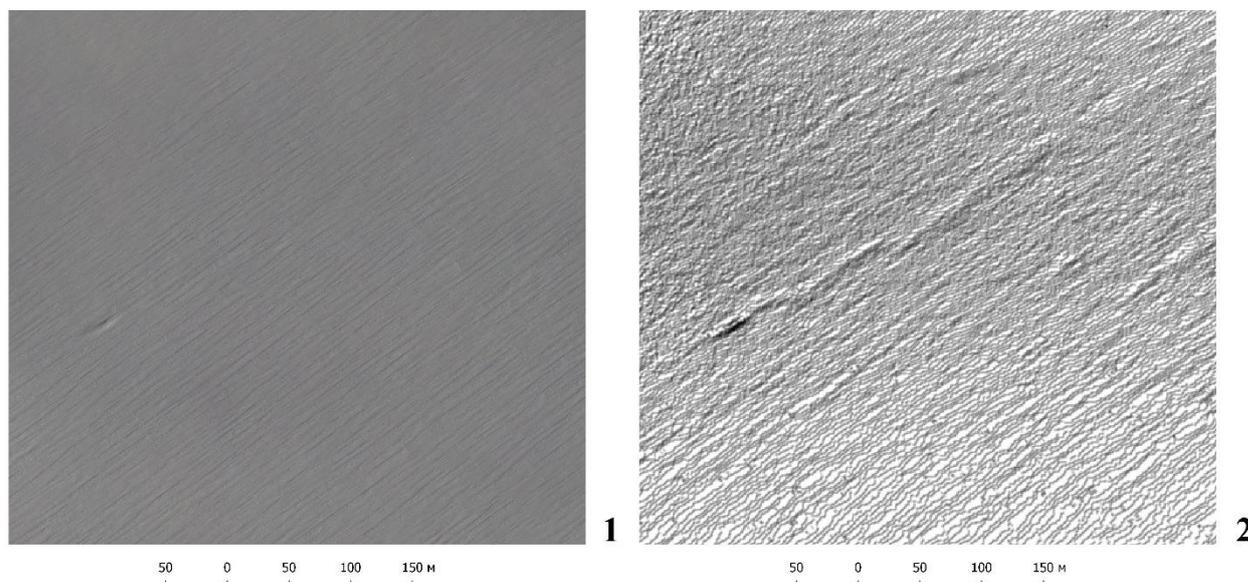
Рисунок 35. Схема расположение найденных трещин

Таблица 6. Характеристики найденных трещин

№	Длина (м)	Ширина (м)	Расстояние до СГП (м)	Широта центроида (° ю.ш.)	Долгота центроида (° в.д.)
1	319	8	1458.8	69.46525	76.26893
2	185	6	1268.4	69.46396	76.28075
3	285	7	1434.2	69.4626	76.27525
4	85	5	1343.5	69.46041	76.28082
5	120	2	1221.0	69.46023	76.28308
6	322	12	677.8	69.57285	76.25495

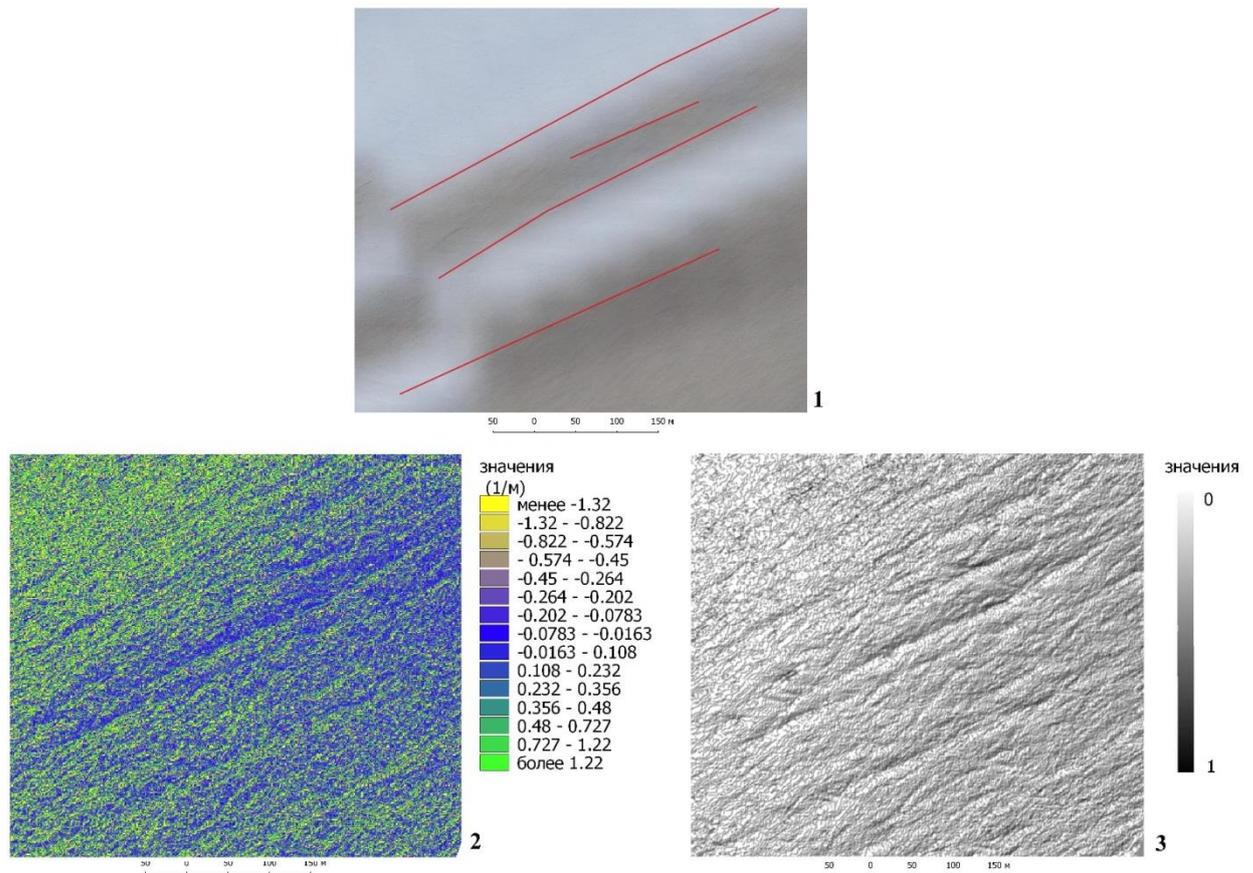
7	1115	10	373.2	69.53393	76.28528
8	930	15	700.8	69.54094	76.31048
9	175	7	550.5	69.56875	76.25538
10	640	20	1643.7	69.57085	76.37607
11	619	11	1002.4	69.65806	76.55022
12	232	12	1229.1	69.65868	76.54793
13	190	12	1223.9	69.66001	76.54977
14	437	13	162.2	69.63652	76.46882
15	423	10	53.6	69.63779	76.4677
16	812	15	152.2	69.63578	76.46726
17	169	10	371.9	69.63518	76.47282
18	471	10	500.5	69.63314	76.47313

Кроме всего прочего, следует отметить следующие два наблюдения. Во-первых, предположение, что трещины, параллельные ветровым формам рельефа, не могут быть обнаружены при текстурном анализе, не оправдалось. Так, трещина №1, расположенная вдоль ветровых форм, может быть определена на гомогенности, рассчитанной под углом  $135^\circ$  (рисунок 36).



*Рисунок 36. Трещина, параллельная ветровым формам рельефа  
1 – фрагмент ортофотоплана, 2 – гомогенность.*

Во-вторых, из-за слишком больших различий в яркости единственного ортофотоплана в южной части района исследования некоторые области не могут быть визуально дешифрированы на наличие трещин. Однако именно в одной из таких областей были обнаружены трещины №19-23, что служит еще одним доказательством преимущества использования анализа ЦМП (рисунок 37).



*Рисунок 37. Выделенная трещина*

*1 – фрагмент ортофотоплана (красным цветом выделены трещины),*

*2- кривизна горизонтали, 3 – гомогенность*

Таким образом, можно утверждать, что предположение, выдвинутое при выборе методов анализа рельефа, оправдалось. Совмещение текстурного и геоморфометрического анализов с учетом особенностей каждого метода анализа, описанных ранее, позволяет выявить скрытые трещины с достаточной точностью. Необязательно вычисление всех морфометрических характеристик и текстурных признаков, достаточно трех видов кривизны при морфометрическом анализе и гомогенности при текстурном.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена методика поиска скрытых ледниковых трещин с использованием цифровых моделей поверхности ледника. Суть заключается в расчете и интерпретации геоморфометрических характеристик. Поскольку в общем виде, морфометрические методы исследования рельефа применяют количественные критерии к анализу форм, традиционные морфометрические величины могут быть дополнены текстурными характеристиками, которые по своей сути тоже основываются на анализе числовых данных. Данная идея и легла в основу разработанной методики. Практической реализацией методики стали обнаруженные скрытые ледниковые трещины.

Выполненный обзор существующих методов исследований ледниковых трещин показал, что для изучения трещин как отдельных объектов наиболее подходящими являются результаты аэрофотосъемки, выполняемые сегодня преимущественно БПЛА. Были проведены геоморфометрический и текстурный анализ цифровых моделей дневной поверхности покровного ледника участка СГП Восток-Прогресс с учетом географических особенностей данного региона. Оценка эффективности применения обоих анализов показала, что трещины удается распознать с вероятностью 73%, а также было найдено еще 18 скрытых ледниковых трещин.

Полученные результаты показывают, что использование данных дистанционного зондирования Земли, а именно аэрофотосъемки является не только безопасным, но и эффективным способом обнаружения ледниковых трещин, в том числе скрытых.

Безусловно, предложенная методика может быть дополнена. Из многообразия методов текстурного анализа был рассмотрен только один. В практической части участвовал ограниченный набор данных ввиду отсутствия их разнообразия. Наконец, ледниковые трещины движутся, и знание об их перемещении также может быть полезным для проведения санно-гусеничных походов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астафуров В.Г., Аксёнов С.В., Евсюткин Т.В. Классификация перистой облачности по данным MODIS с помощью нечеткой нейронной сети//Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014, Том 11, № 4. - С. 265–275
2. Батюков А.М., Разработка и реализация алгоритмов классификации изображений биомедицинских препаратов: дис. к. ф.-м.н. СПбГУ, Санкт-Петербург, 2015 — С.107
3. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. Учебное пособие – М.: Издательство МГУ, 2004. – С.153
4. Грузман И.С., Петрова К.Ю. Обнаружение квазипериодических текстур с использованием характеристик двумерного спектра мощности//Автометрия. 2015, №2 - С. 4-11
5. Епифанцев О.Г., Плетенчук Н.С. Трещиноватость горных пород. Основы теории и методы изучения. Методические рекомендации – Новокузнецк: СибГИУ, 2008 - С.41
6. Кизевальтер Д. С, Раскатов Г. И., Рыжова А. А. Геоморфология и четвертичная геология. (Геоморфология и генетические типы отложений) - М.: Недра, 1981.- С.215
7. Конкин Ю.В., Колесенков А.Н. Распознавание изображений на основе текстурных признаков Харалика и искусственных нейронных сетей // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. №2. - С.117-123
8. Крылов Б.А. Фрактальный анализ полутоновых изображений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики.2003, Том 3, №5 – С. 112-114
9. Лукин В.В, Клепиков А.В., Быстратович А.А. Россия в Антарктике: современное состояние и перспективы // Проблемы Арктики и Антарктики, 2010, Том 84, №1 – С. 53-66
10. Лукин В.В. Российская антарктическая экспедиция на рубеже веков. Связь времен и поколений // Проблемы Арктики и Антарктики, 2014, Том 99, №1 – С.22-39
11. Патана Е.И. Статистический анализ и кластеризация основных текстурных функционалов // Известия ЮФУ. Технические науки. № 4. Тематический выпуск "Интеллектуальные САПР", 2008. – С. 192-198.
12. Пигаль А.С., Пигаль П.Б. Применение вейвлет-преобразования для анализа кардиосигналов: предварительные результаты исследования // Здоровье для всех, 2014, №1 – С.9-14.
13. Попов С. В., Поляков С.П. Георадарное лоцирование трещин в районе российских антарктических станций Прогресс и Мирный (Восточная Антарктида) в сезон 2014/15

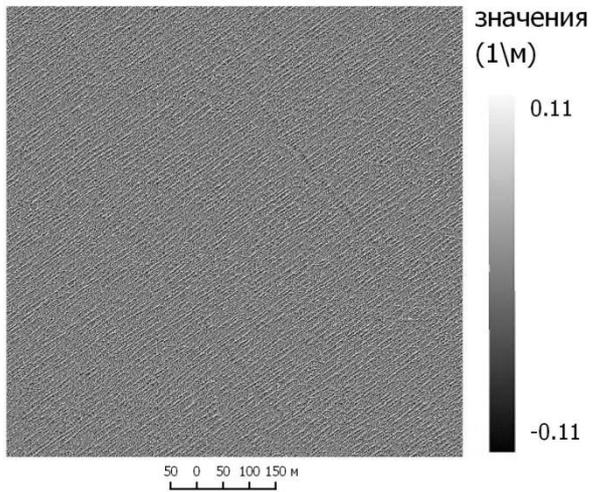
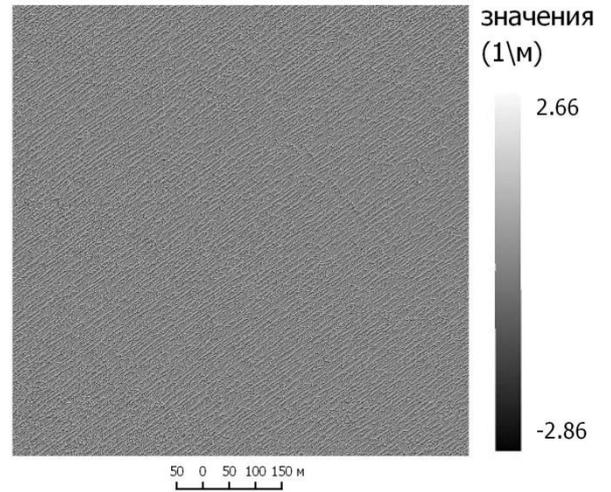
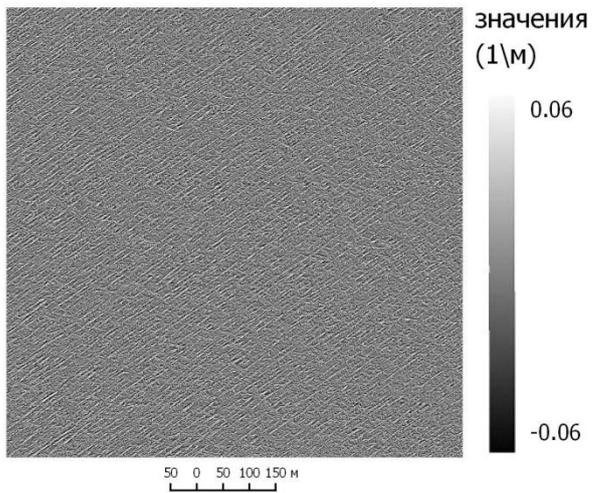
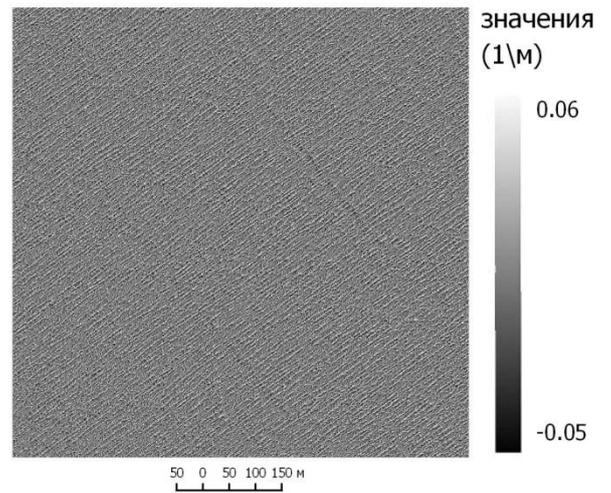
- года. // КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ, 2016, Том XX, № 1 – С. 90-98.
14. Прэртт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. — Кн. 2 — С. 480
  15. Саватюгин Л.М., Преображенская М.А. Российские исследования в Антарктике. Т. I. Первая – двадцатая советская антарктическая экспедиция. - СПб.: Гидрометеоздат, 1999. – С.337
  16. Фисенко В. Т., Фисенко Т. Ю. Компьютерная обработка и распознавание изображений. Учебное пособие - СПб.: СПбГУИТМО, 2008. – С.192
  17. Флоринский И.В. Теория и приложения математико-картографического моделирования рельефа: дисс. д.т.н.. ИМПБ РАН, Пущино, 2010 – С.267
  18. Флоринский И. В. Иллюстрированное введение в геоморфометрию // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время, 2016, Том 11, № 1: Система планета Земля
  19. Фраленко В. П. Методы текстурного анализа изображений, обработка данных дистанционного зондирования Земли // Программные системы: теория и приложения: электрон. научн. журн. 2014, Том 5, № 4(22) - С. 19–39
  20. Шарый П.А., Шарая Л.С., Использование морфометрических статистик для описания внутренней геометрии равнинных и горных местностей // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2003, Том 5. № 2 - С. 278–286.
  21. Шарый П.А. Геоморфометрия в науках о земле и экологии, обзор методов и приложений // Известия Самарского научного центра РАН. 2006, Том 8, №2 – С. 458-473
  22. Шитова О.В, Пухляк А.Н., Дроб Е.М. Анализ методов сегментации текстурных областей изображений в системах обработки изображений// Научные ведомости. 2014, Том 30, № 8 - С. 182-188
  23. Яковлева Е.В., Нестерова Е.П. Сравнительный анализ методов характеристик Лавса и матриц совпадений в задачах сегментации текстурных изображений // Прикладная радиоэлектроника. 2009, Том 8, №2 – С. 181-187.
  24. Яковлева Е.В., Панченко И.А. Применение энергетических характеристик Лавса для сегментации изображений // БИОНИКА ИНТЕЛЛЕКТА. 2007, Том 67, № 2 - С. 94–98
  25. XXVII КСДА Заключительный отчет тридцать седьмого Консультативного совещания по Договору об Антарктике, 2014, Буэнос-Айрес
  26. Bhardwaj, A., Sam, L., Martin-Torres, F., Kumar, R. UAVs as remote sensing platform in glaciology: Present applications and future prospects. // Remote Sensing of Environment

- 2016, No175 - P.196-204.
27. Colgan, W., Rajaram H., Abdalati W., McCutchan C., Mottram R., M. S. Moussavi M. S., and Grigsby S. Glacier Crevasses: Observations, Models, and Mass Balance Implications // *Reviews of Geophysics* 2016, V 54, № 1 – P. 119–161.
  28. Crocker, R. I., Maslanik, J. A., Adler, J. J., Palo, S. E., Herzfeld, U. C., & Emery, W. J. A sensor package for ice surface observations using small unmanned aircraft systems // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 2011, V 50, №4 - P.1033–1047.
  29. Dąbskia, M., Zmarzb, A., Pabjanekb, P., Korczak-Abshirec, M., Karszniab, I., Chwedorzewska, K.J. UAV-based detection and spatial analyses of periglacial landforms on Demay Point (King George Island, South Shetland Islands, Antarctica) // *Geomorphology* 2017, V 290, №1 – P. 29-38.
  25. Dikau, R., Brabb, E.E., Mark, R.M. Landform classification of New Mexico by computer // *Open File Report 91-634. U.S. Geological Survey, 2011 - P.15*
  26. Dinesh, S. Analysis of surface textures of physiographic features extracted from multiscale digital elevation models via grey level co-occurrence matrix // *Journal of Geodesy and Geoinformation*, 2013, V 2, №9 – P. 19-28.
  27. Florinsky, I.V., Bliakharskii, D.P. Detection of crevasses by geomorphometric treatment of data from unmanned aerial surveys // *Remote Sensing Letters* 2019, V 10, №4, - P. 323-332.
  28. Glasser, N., Scambos, T. A structural glaciological analysis of the 2002 Larsen B Ice-Shelf collapse // *Journal Glaciology* 2008, V 54, №184 – P. 3–16.
  29. Hall-Beyer, M. GLCM Texture: A Tutorial v. 3.0 March 2017, 2017 – P. 75
  30. Hengl, T., Reuter, H.I. (eds). *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science* 2008, V 33 – P. 772
  31. Holt, T., Glasser, N., Quincey, D. (2013), The structural glaciology of southwest Antarctic Peninsula Ice Shelves (ca. 2010) // *Journal Maps* 2013, V 9, №4 – P. 37–41.
  32. Huang XL., Tang G.A., Liu K. Influence of DEM Resolution on the Extraction of Terrain Texture Feature // *Journal of Geoinformation Science* 2015, V 17, №7 - P.822–829.
  33. Liu, K, Tang, G.A., Jiang, S. Research on the classification of terrain texture from DEMs based on BP neural network // *Geomorphometry org*, 2013
  34. Liu, Y., Cheng, X., Hui, F., Wang, X., Wang, F, and Cheng, C. Detection of crevasses over polar ice shelves using Satellite Laser Altimeter // *Science China Earth Science* 2014, V 57 №6 – P.1267–1277.
  35. Pike, R.J., Acevedo, W., Card, D.H. Topographic grain automated from digital elevation models // *Proceedings of the Ninth International Symposium on Computer Assisted Cartography. ASPRS/ASCM, Baltimore, MD 1989 — P. 128–137.*

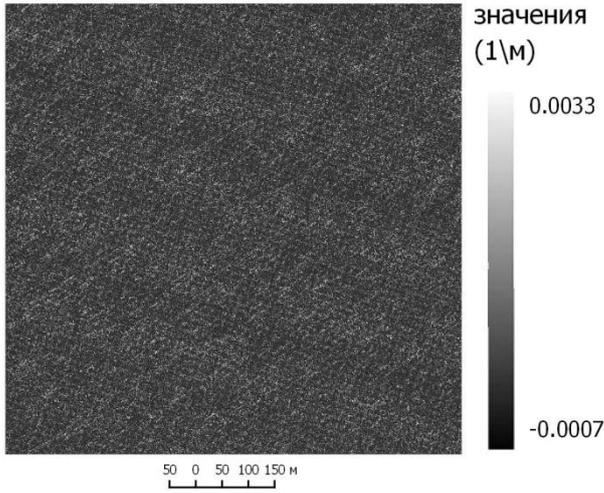
36. Ryan, J. C., Hubbard, A. L., Box, J. E., Todd, J., Christoffersen, P., Carr, J. R., Snooke N. UAV photogrammetry and structure from motion to assess calving dynamics at Store Glacier, a large outlet draining the Greenland ice sheet // *The Cryosphere* 2015, V 9 №1 - P. 1–11.
37. Xu, T., Yang, W., Liu, Y., Zhou, C., Wang, Z. Crevasse Detection in Antarctica Using ASTER Images // *Image Analysis and Recognition*, 2011, V 6754. - P.370-379.

Интернет-источники

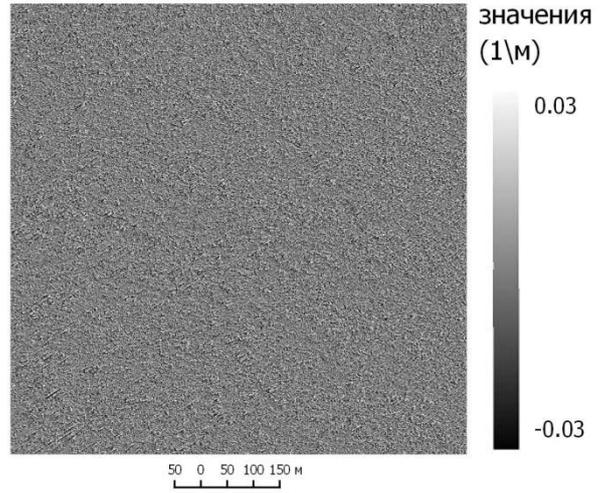
37. <http://www.mining-enc.ru/> – Горная энциклопедия под редакцией Козловского
38. [http://www.saga-gis.org/saga\\_tool\\_doc/2.2.3/a2z.html](http://www.saga-gis.org/saga_tool_doc/2.2.3/a2z.html) – описание работы модулей SAGA GIS

*Геоморфометрические характеристики**Участок №6**Поперечная кривизна**Кривизна горизонтали**Вертикальная кривизна**Горизонтальная кривизна*

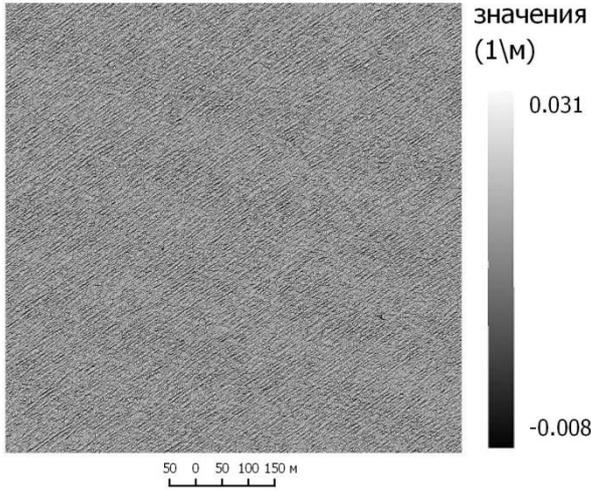
*Аккумуляционная кривизна*



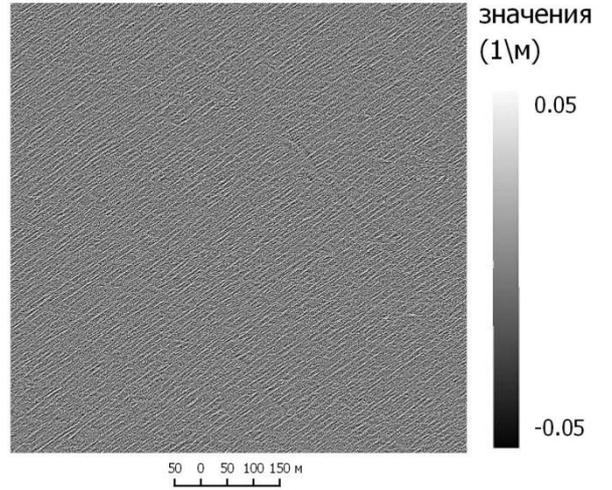
*Разностная кривизна*



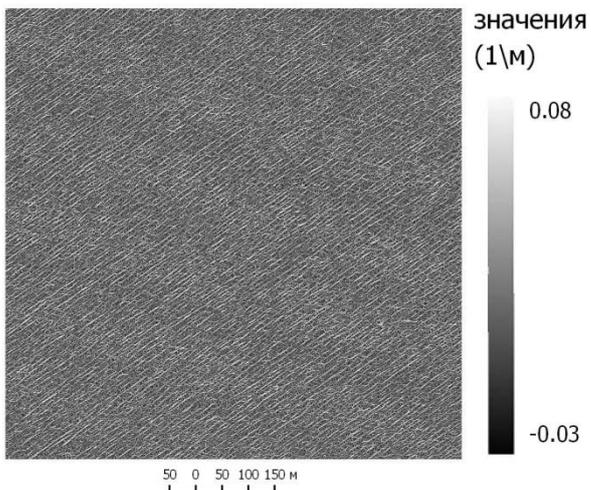
*Минимальная кривизна*



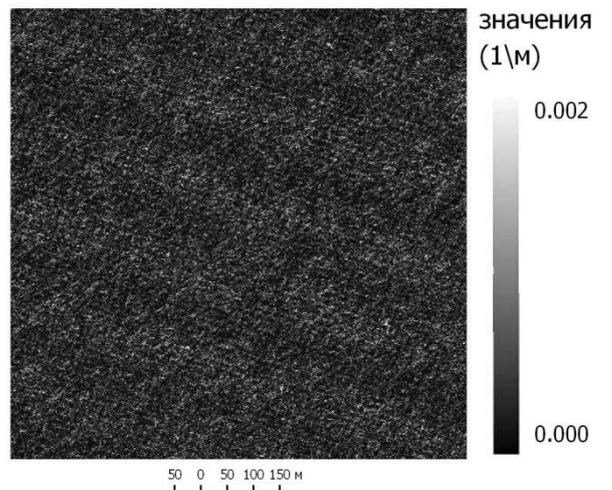
*Средняя кривизна*



*Максимальная кривизна*

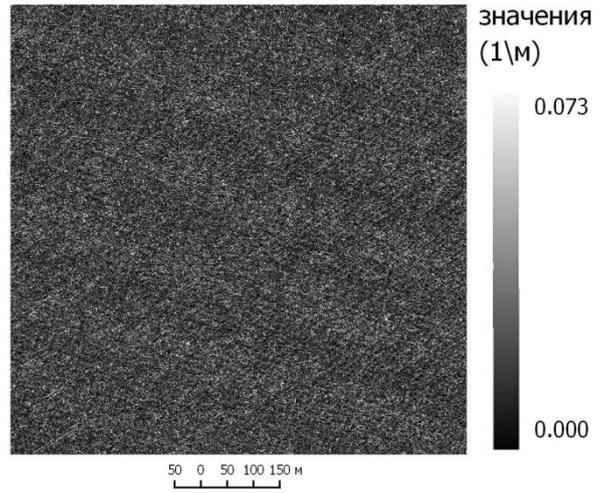
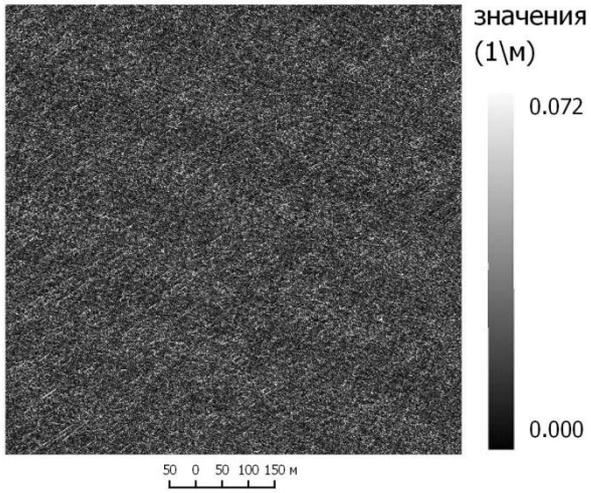


*Кольцевая кривизна*

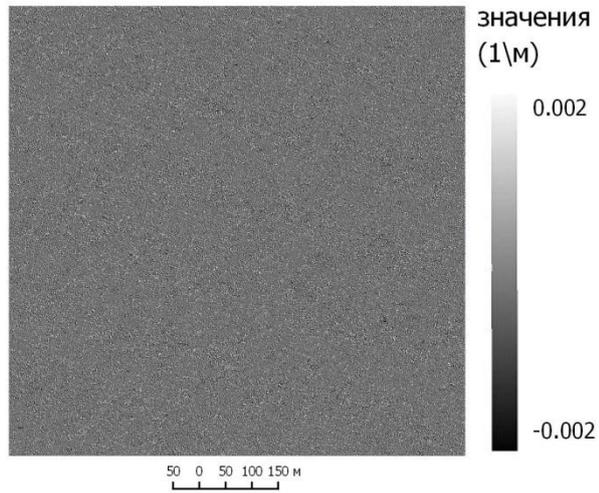


*Избыточная вертикальная кривизна*

*Избыточная горизонтальная кривизна*



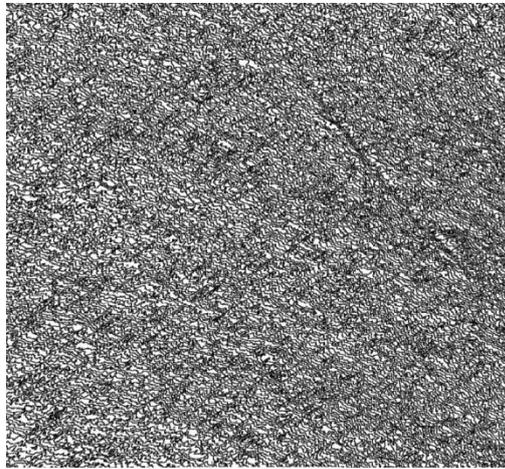
*Гауссова кривизна*



Статистические признаки Харалика

Участок №6

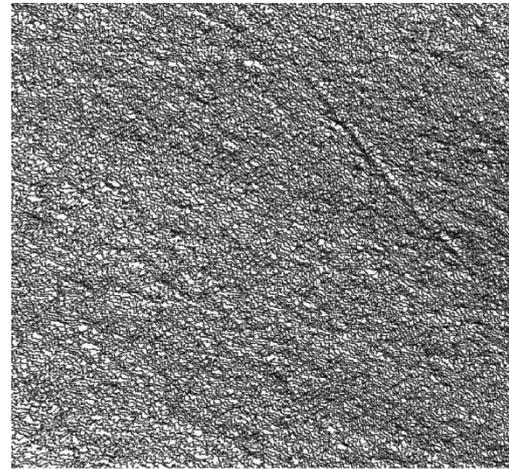
Однородность



значения

0

1



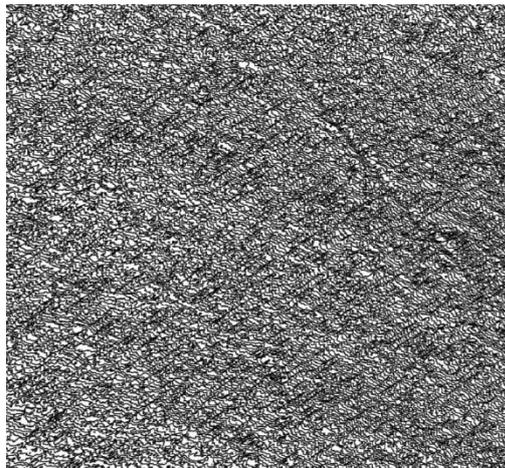
значения

0

1

направление – 0 °

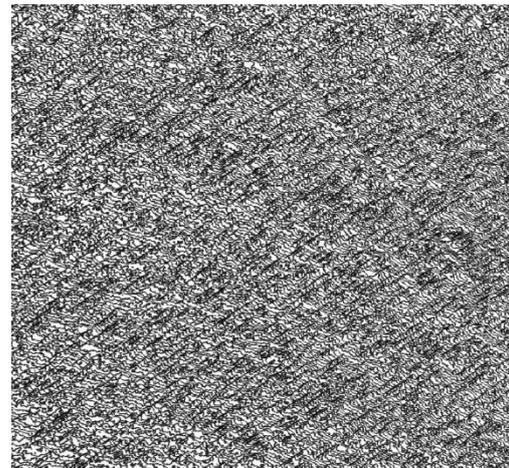
направление – 45 °



значения

0

1



значения

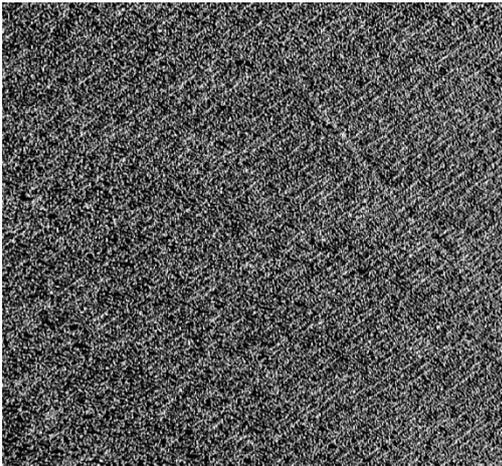
0

1

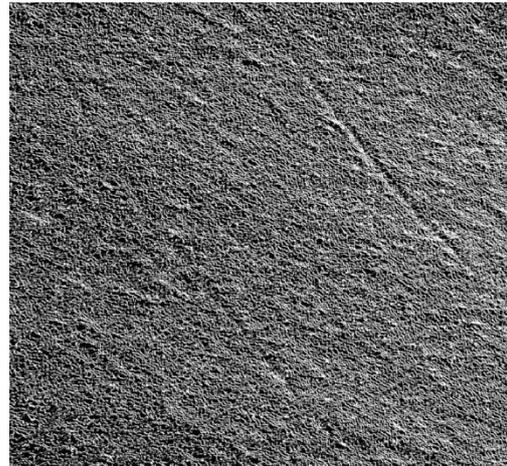
направление – 90 °

направление – 135 °

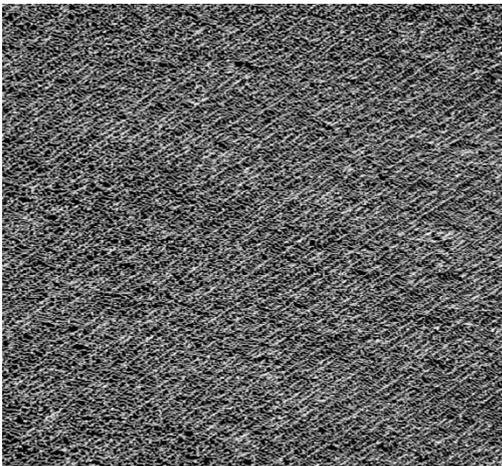
*Контраст*



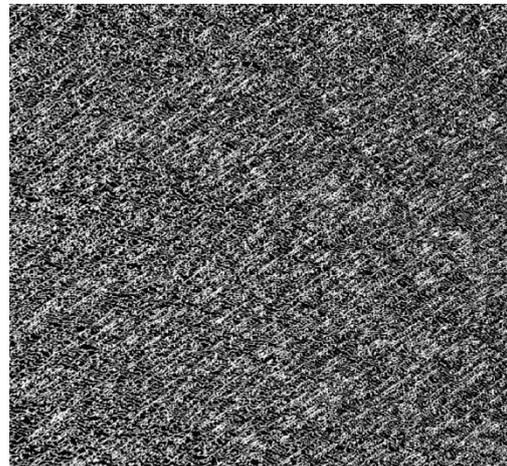
направление –  $0^\circ$



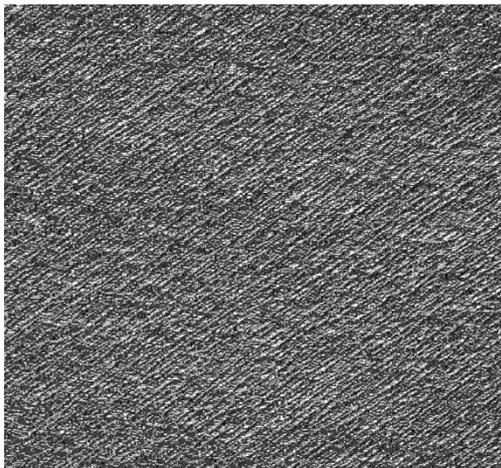
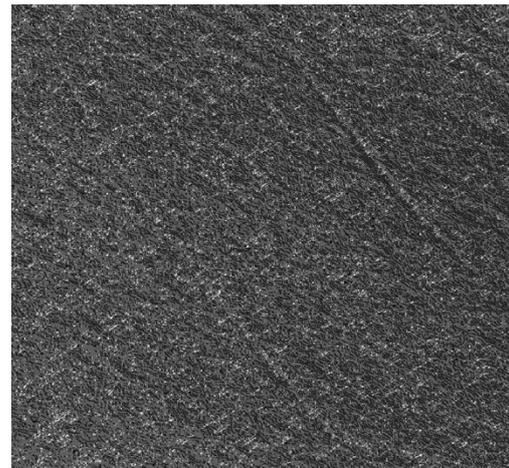
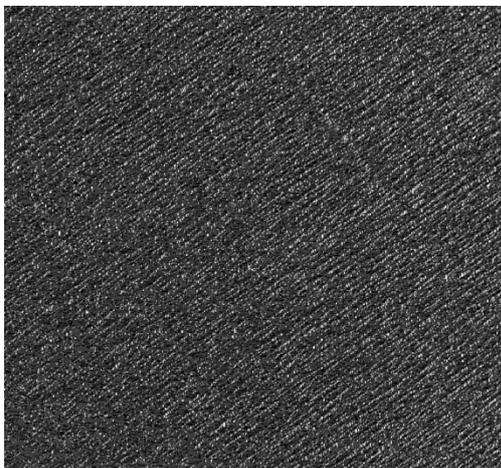
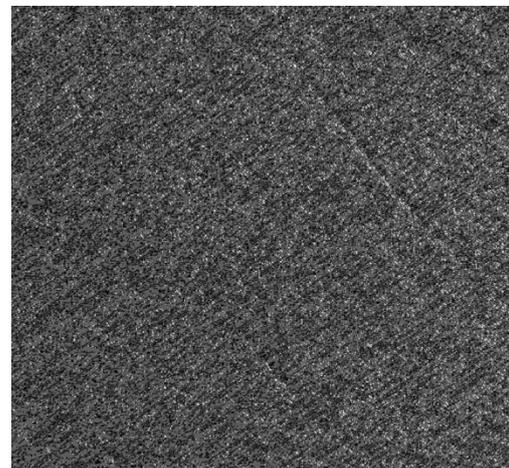
направление –  $45^\circ$

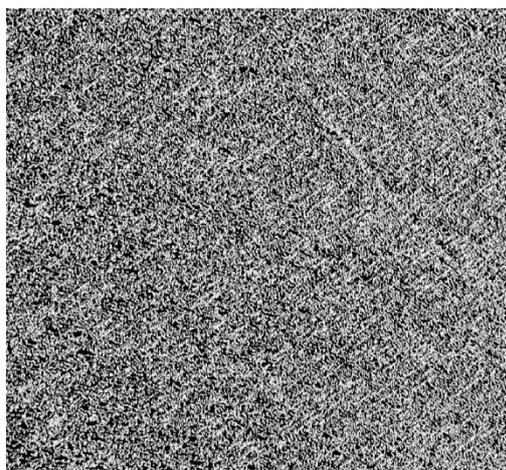


направление –  $90^\circ$

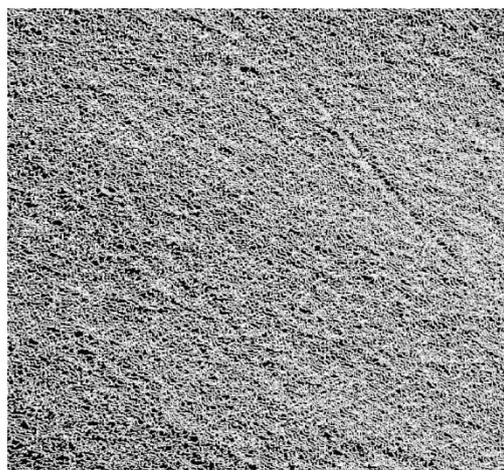


направление –  $135^\circ$

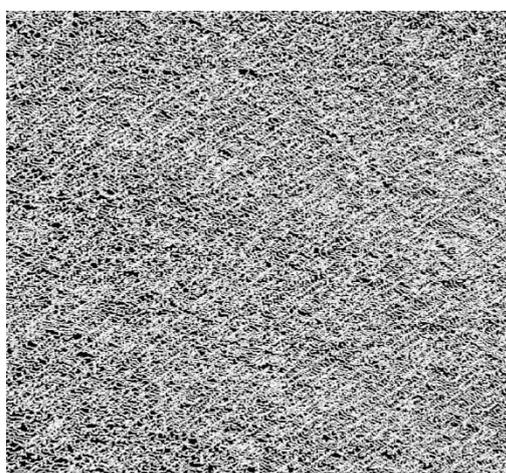
*Корреляция*направление –  $0^\circ$ направление –  $45^\circ$ направление –  $90^\circ$ направление –  $135^\circ$

*Энтропия разностей*

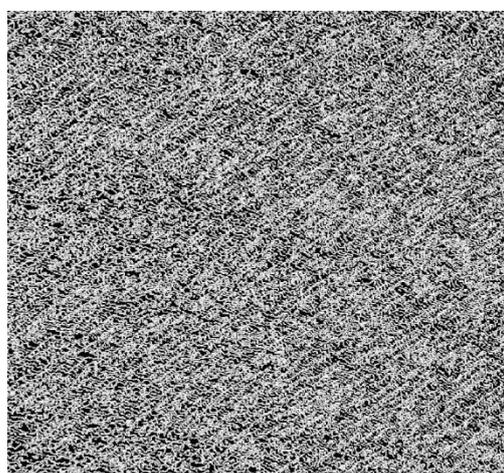
50 0 50 100 150 м

направление  $-0^\circ$ 

50 0 50 100 150 м

направление  $-45^\circ$ 

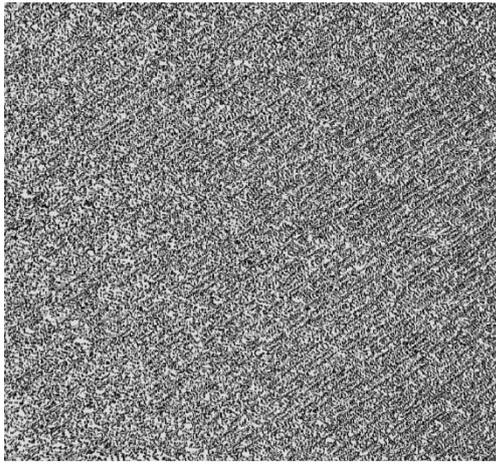
50 0 50 100 150 м

направление  $-90^\circ$ 

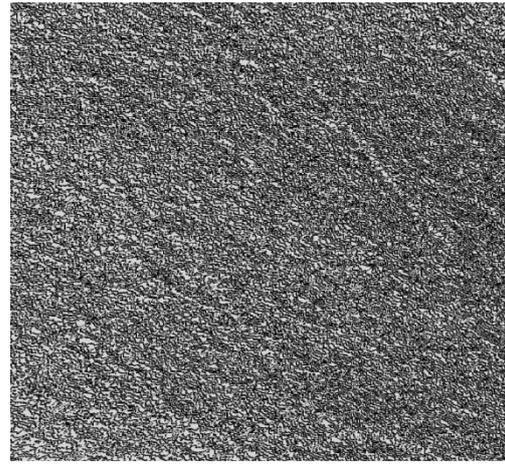
50 0 50 100 150 м

направление  $-135^\circ$

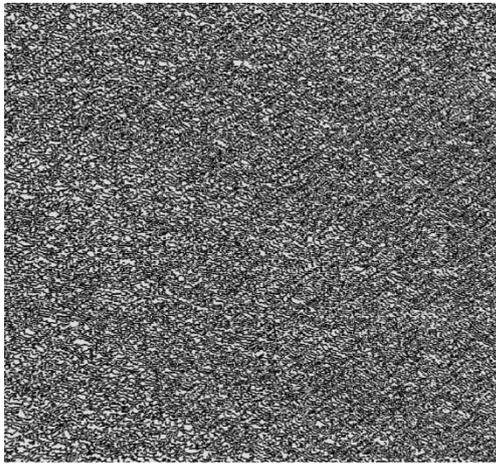
*Дисперсия по разности*



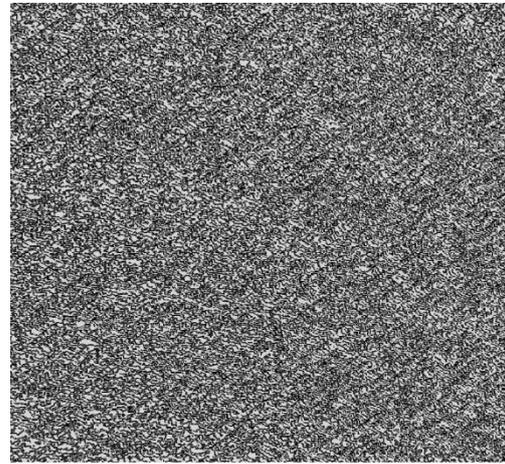
направление – 0 °



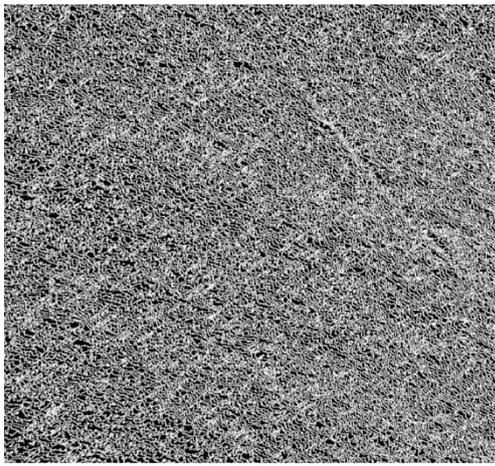
направление – 45 °



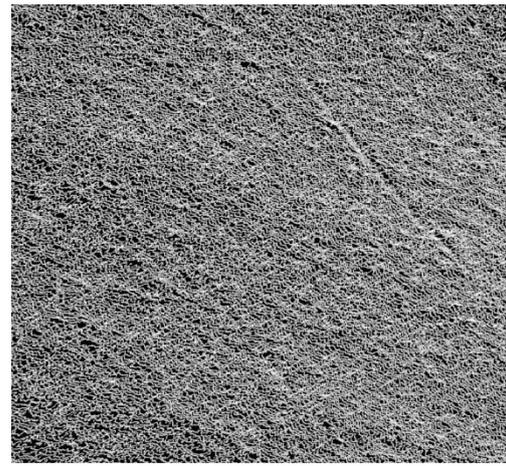
направление – 90 °



направление – 135 °

*Энтропия*

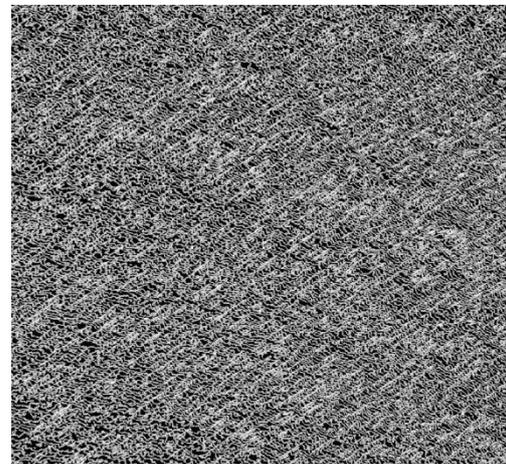
направление – 0 °



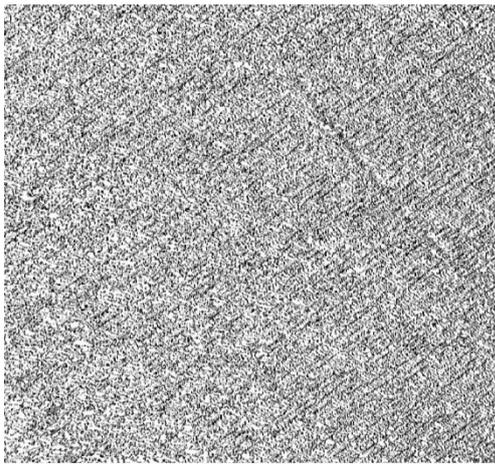
направление – 45 °



направление – 90 °



направление – 135 °

*Гомогенность*

значения

0

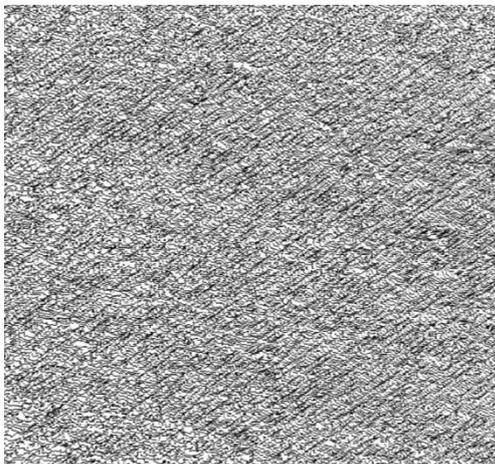
1



значения

0

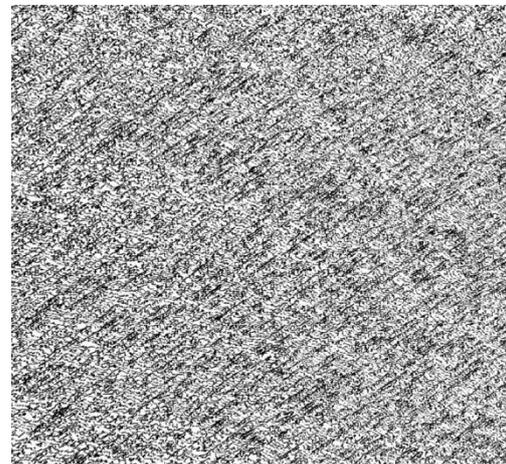
1

направление  $-0^\circ$ направление  $-45^\circ$ 

значения

0

1

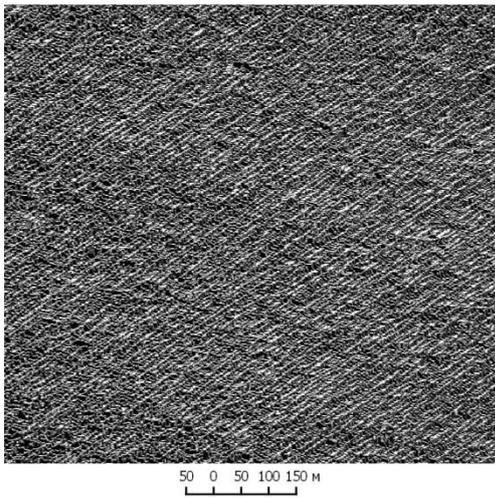


значения

0

1

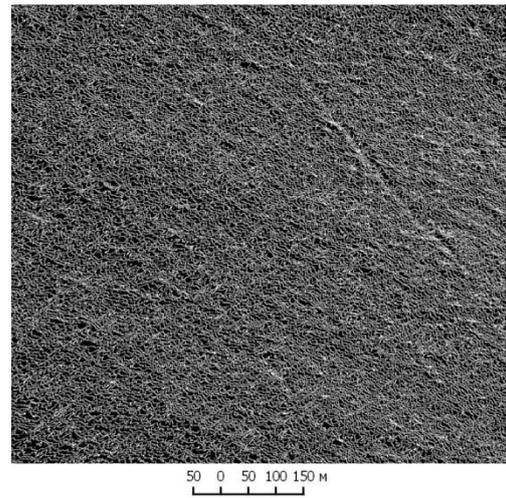
направление  $-90^\circ$ направление  $-135^\circ$

*Среднее по суммам*

значения

0

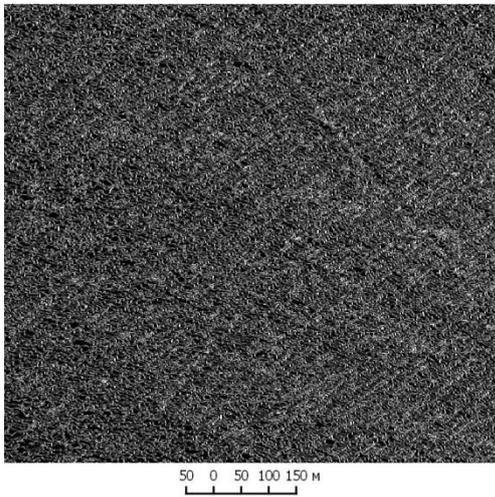
1



значения

0

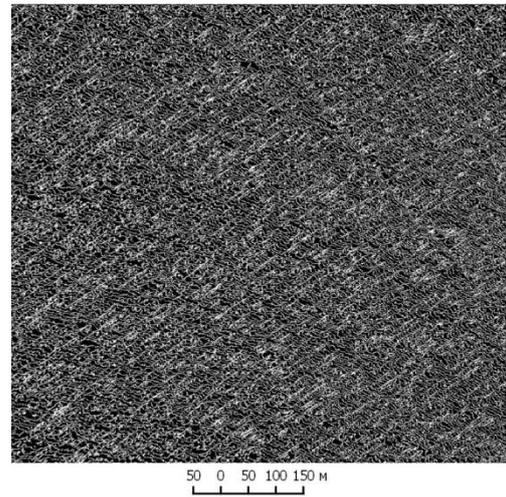
1

направление  $-0^\circ$ направление  $-45^\circ$ 

значения

0

1

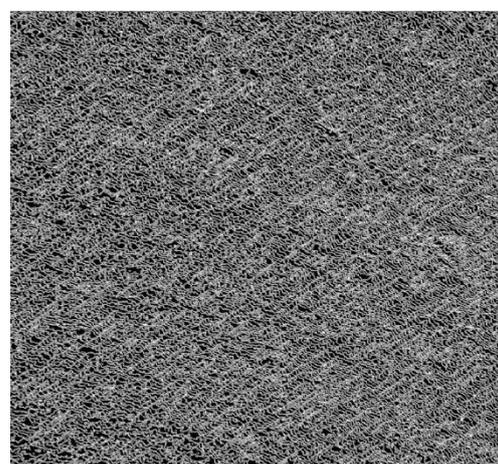


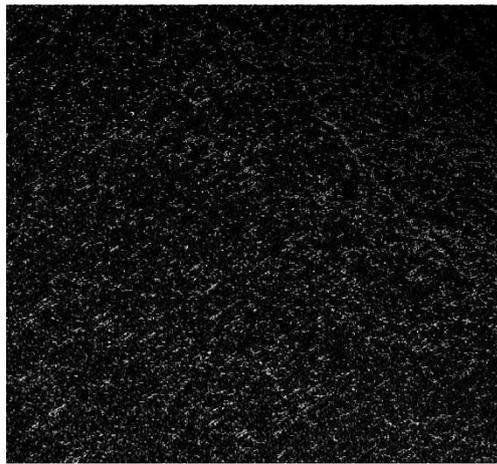
значения

0

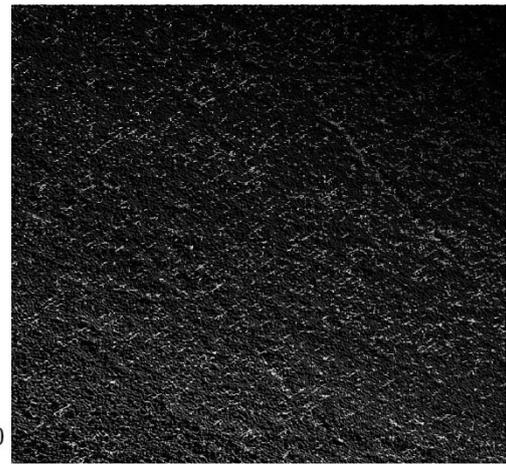
1

направление  $-90^\circ$ направление  $-135^\circ$

*Суммарная энтропия*направление  $-0^\circ$ направление  $-45^\circ$ направление  $-90^\circ$ направление  $-135^\circ$

*Дисперсия по суммам*

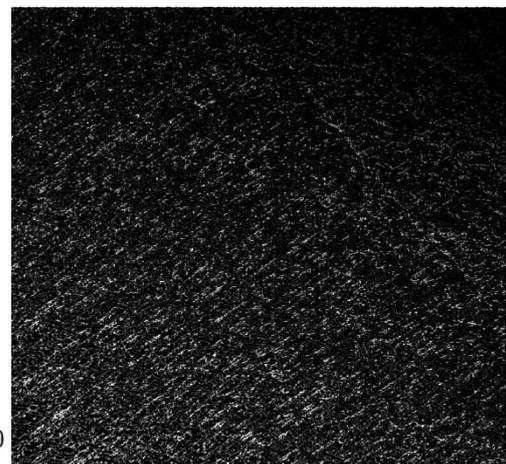
направление – 0 °



направление – 45 °

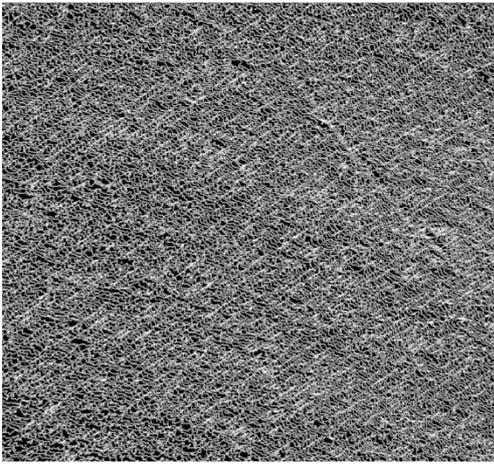


направление – 90 °



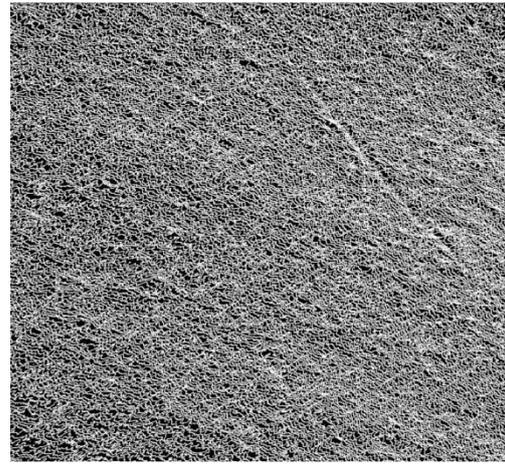
направление – 135 °

*Дисперсия*



50 0 50 100 150 м

направление – 0 °



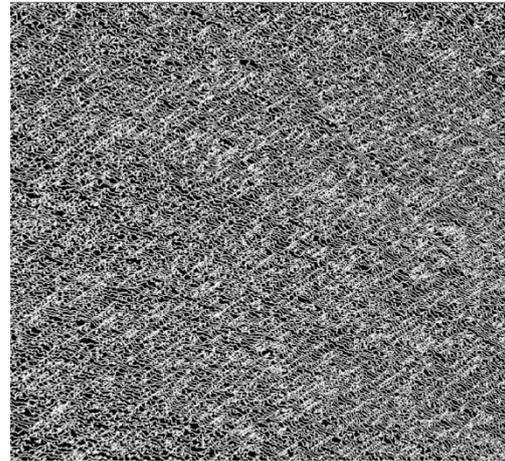
50 0 50 100 150 м

направление – 45 °



50 0 50 100 150 м

направление – 90 °



50 0 50 100 150 м

направление – 135 °