

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра кадастра недвижимости, землеустройства и геодезии

**Системы сбора и обработки информации
результатов геодезических изысканий и
дистанционного зондирования**

МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

к выполнению лабораторных и практических работ для студентов
направления 21.04.03 «Геодезия и дистанционное зондирование»
(программа «Инженерная геодезия») всех форм обучения

Воронеж 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1. Теоретические сведения.....	6
1.1. Основы радиолокационной съемки Земли из космоса.....	6
1.1.1. Понятие радиолокации.....	6
1.1.2. Спектральные диапазоны работы радиолокаторов и особенностей взаимодействия с поверхностью	7
1.1.3. Поляризация радиоволн	9
1.1.4. Геометрические особенности радиолокационной съемки	12
1.1.5. Искажения на радиолокационных снимках.....	16
1.2. Интерферометрическая съемка.....	18
1.2.1. Основные понятия интерферометрии	18
1.2.2. Требования к исходным данным для интерферометрической съемки	22
1.2.3. Интерферометрическая обработка радиолокационных снимков для построения цифровых моделей рельефа.....	26
1.2.4. Интерферометрическая обработка радиолокационных снимков для определения смещений земной поверхности.....	33
1.2.5. Технология Persistent Scatterers (PS).....	34
1.2.6. Технология Small Baselines (SBas).....	36
2. Лабораторные работы	37
2.1. Лабораторная работа № 1. Определение зоны затопления по радиолокационным снимкам	37
2.2. Лабораторная работа № 2. Поляриметрическая обработка радиолокационных снимков.....	44
2.3. Лабораторная работа № 3. Создание цифровой модели рельефа по материалам радиолокационной съемки.	55
2.4. Лабораторная работа № 4. Определение деформаций земной поверхности в результате интерферометрической обработки радиолокационных снимков	68
Заключение	78
Библиографический список	79

ВВЕДЕНИЕ

Историю практического применения радиолокационной съемки Земли из космоса открыл запуск космического аппарата SEASAT в 1978 г. За прошедшие 40 лет масштабы данной отрасли значительно увеличились. В 2018 г. на рынок дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) вышли 34 страны (по сравнению с 24 странами в 2008 г.) [1]. Мировая орбитальная группировка космических аппаратов ДЗЗ на текущий момент насчитывает более 400 единиц.

ДЗЗ с применением радиолокационных систем разных частотных диапазонов выгодно отличается от других методов съемки за счет независимости от метеорологических условий и от условий освещения, использования разных поляризационных конфигураций излучаемого и принимаемого сигнала, возможности регистрации объектов, расположенных под снежным, растительным или земным покровом, обнаружения движущихся объектов и др.

За последние два десятилетия наблюдается повышенный интерес многих стран к космическим радиолокационным системам, которые позволяют реализовать все перечисленные выше возможности. Все более широкое распространение получает радиолокационная интерферометрия – метод обработки данных радиолокации, основанный на выделении разности фаз сигналов, отраженных разными участками местности. Он позволяет вычислить путь, пройденный радиоволнами до поверхности Земли, и, соответственно, получить высокоточную информацию как об абсолютных высотах местности, так и о смещениях поверхности.

Цель данного пособия – изложить теоретические основы радиолокационной и интерферометрической съемки и привести практические примеры анализа и интерпретации данных при решении актуальных задач, таких как определение зоны затопления, поляриметрическая обработка, создание цифровой модели рельефа (ЦМР) и определение деформаций земной поверхности.

Учебно-методическое пособие может быть использовано для самостоятельного изучения дисциплины. В процессе выполнения лабораторных работ предполагается использование персональных компьютеров и свободного программного обеспечения Sentinel Application Platform (SNAP), разрабатываемого Европейским космическим агентством.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Основы радиолокационной съемки Земли из космоса

1.1.1. Понятие радиолокации

Радиолокация, или радиолокационная съемка, – это активный метод дистанционного зондирования Земли, который предполагает использование собственного источника излучения электромагнитных импульсов в заданном диапазоне частот электромагнитного спектра.

На борту носителя устанавливается радиолокатор – активный микроволновый датчик, способный передавать радиоволны и принимать их отражения от объектов земной поверхности. Радиолокаторы также называют радары (от англ. Radar – RAdio Detection And Ranging), они работают в импульсном режиме, когда передающая и принимающая антенны попеременно излучают и принимают сигналы перпендикулярно направлению полета. Распространение сигнала вбок относительно траектории носителя обусловлено необходимостью разрешения неоднозначности в распознавании целей, имеющих одинаковую дальность, которая возникает при съемке в надир.

Формирование изображения осуществляется методом сканирования, т. е. переход от одной строки к другой происходит за счет перемещения носителя. Каждый элемент радиолокационного изображения содержит суммарный коэффициент отражения участка поверхности, который показывает мощность возвратившегося к антенне сигнала. Кроме того, по времени прохождения волны до объекта и обратно определяется расстояние до цели. Отраженный от объекта сигнал принимается антенной и после усиления и обработки подается на фоторегистратор. Поскольку объекты местности находятся на разных расстояниях от носителя (имеют разные наклонные дальности), то отраженные от них радиосигналы поступают в приемник в разное время. Положение элемента изображения (пикселя)

определяется временем пробега радиолокационного импульса от РЛС до объекта и обратно.

Таким образом, «полезная» информация на радиолокационном изображении заключена:

- во времени между началом излучения и получением отраженного импульса;
- в форме отраженного импульса;
- в амплитуде и фазе волны.

1.1.2. Спектральные диапазоны работы радиолокаторов и особенности взаимодействия с поверхностью

Радиолокационная съемка выполняется в радиодиапазоне электромагнитного спектра с длинами волн от 1 мм до 1 м. Наиболее часто используемые диапазоны принято классифицировать и обозначать следующим образом (табл. 1).

Таблица 1

Основные диапазоны радиолокационных съемочных систем

Диапазон	Длина волны (см)	Частота (ГГц)
<i>X</i>	2,4–3,8	12,5–8,0
<i>C</i>	3,8–7,5	8,0–4,0
<i>S</i>	7,5–15,0	4,0–2,0
<i>L</i>	15,0–30,0	2,0–1,0
<i>P</i>	30,0–100,0	1,0–0,3

Диапазоны *X*, *C*, *S* и *L* используются для получения данных как с радиолокаторов авиационного, так и космического базирования, в то время как диапазоны *P* применяются только для зондирования с воздуха.

Одно из основных преимуществ радиолокационной съемки – способность проникать через облачный покров – во многом зависит от длины волны. Так, сигнал с длиной волны от 2 см гарантированно проникает через облачность, а при длине волны 3–4 см и больше позволяет выполнять съемку при наличии осадков.

Длина волны также существенно влияет на характеристики обратного рассеяния радиосигнала от подстилающей поверхности. Так, применение диапазонов с относительно длинными волнами (*L*-диапазон) обеспечивает проникновение радиоволн через снежный и растительный покровы и, при определенных условиях, через песок и почву. Более короткие волны (*C*- и *X*-диапазоны) позволяют достигать высокого пространственного разрешения и определять границы небольших объектов на местности, однако излучение в этих диапазонах сильнее взаимодействует с растительным покровом и почвой. На рис. 1 представлены различия в проникающей способности радиоволн различных диапазонов.

В связи с этим при выборе исходных данных следует учитывать характер задачи, которую предстоит решать.

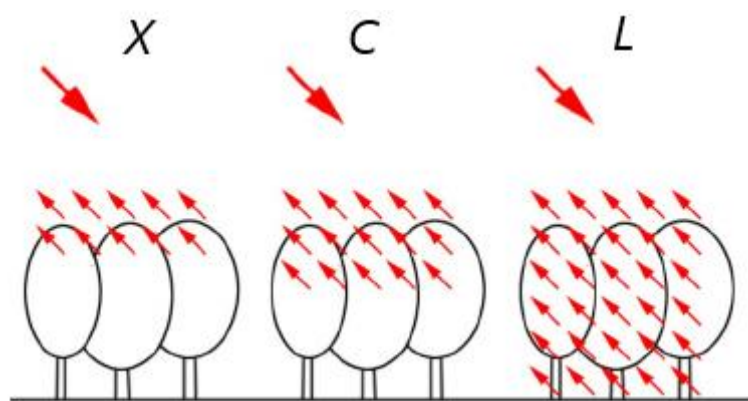


Рис. 1. Глубина проникновения радиоволн различных диапазонов

Глубина проникновения радиолокационного сигнала в почвенный покров во многом зависит от объемного содержания в нем воды, что связано с поглощением и рассеянием электромагнитного излучения. В частности, для сухого песка, снега или почвы глубина проникновения может достигать нескольких метров, в то время как насыщенная влагой почва дает практически полное рассеяние сигнала.

Яркость элемента радиолокационного изображения формируется в зависимости от величины отраженной энергии, вернувшейся обратно к радиолокатору. Эта величина зависит от многих параметров, которые определяются как характеристиками самой съемочной системы (длина

волны и частота сигнала, поляризация, угол обзора и др.), так и характеристики поверхности (тип почвы, рельеф и др.). Многие из этих характеристик взаимосвязаны, поэтому зачастую трудно выделить прямую зависимость влияния той или иной характеристики на яркость изображения. Другими словами, значение яркости объектов на изображении обычно является производной от комбинации нескольких характеристик.

Характеристики, влияющие на параметры изображения, можно разделить на три группы:

- 1) шероховатость земной поверхности;
- 2) геометрия радиолокационного обзора и геометрия поверхности;
- 3) влажность и электрические свойства поверхности.

На рис. 2 показаны различные виды взаимодействия радиосигналов с поверхностью в зависимости от ее шероховатости.

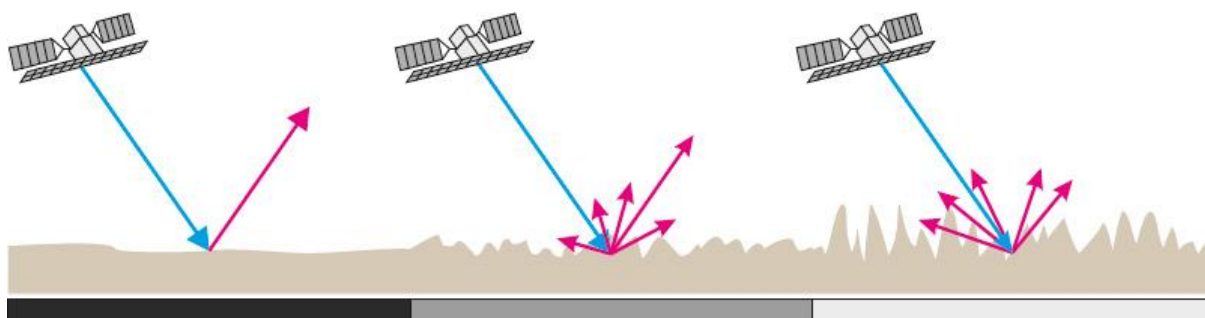


Рис. 2. Характер отражения радиоволн в зависимости от шероховатости поверхности

1.1.3. Поляризация радиоволн

Поляризация – это характеристика электромагнитной волны, описывающая поведение вектора колеблющейся величины в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. Различают два вида поляризационных плоскостей: горизонтальные (H) и вертикальные (V). В зависимости от вида отправленного и принимаемого радиосигнала выделяют простые (одинаковые) поляризации (HH или VV), совместные (двойные) поляризации ($HH + VV$), а также перекрестные или кросс-поляризации (HV или VH).

Современные радиолокационные съемочные системы, как правило, позволяют выполнять съемку во всех возможных комбинациях поляризаций. Выбор той или иной поляризации зависит от решаемой задачи. Например, для изучения растительного покрова предпочтительнее выбрать вертикально-поляризованную волну, которая эффективно взаимодействует с вертикально-расположенными стеблями растительного слоя, в то время как для изучения почв лучше подходит горизонтально-поляризованная волна, которая проникает сквозь растительный слой.

Перекрестные поляризации дают дополнительную информацию о поверхности и расположенных на ней объектах и для некоторых задач являются очень важным фактором. Например, для лесного и сельского хозяйства наличие изображений HV или VH позволяет более достоверно выполнить классификацию различных типов объектов, таких как виды произрастающих сельскохозяйственных культур и породы деревьев.

Различные виды поляризации радиосигнала изображены на рис. 3.

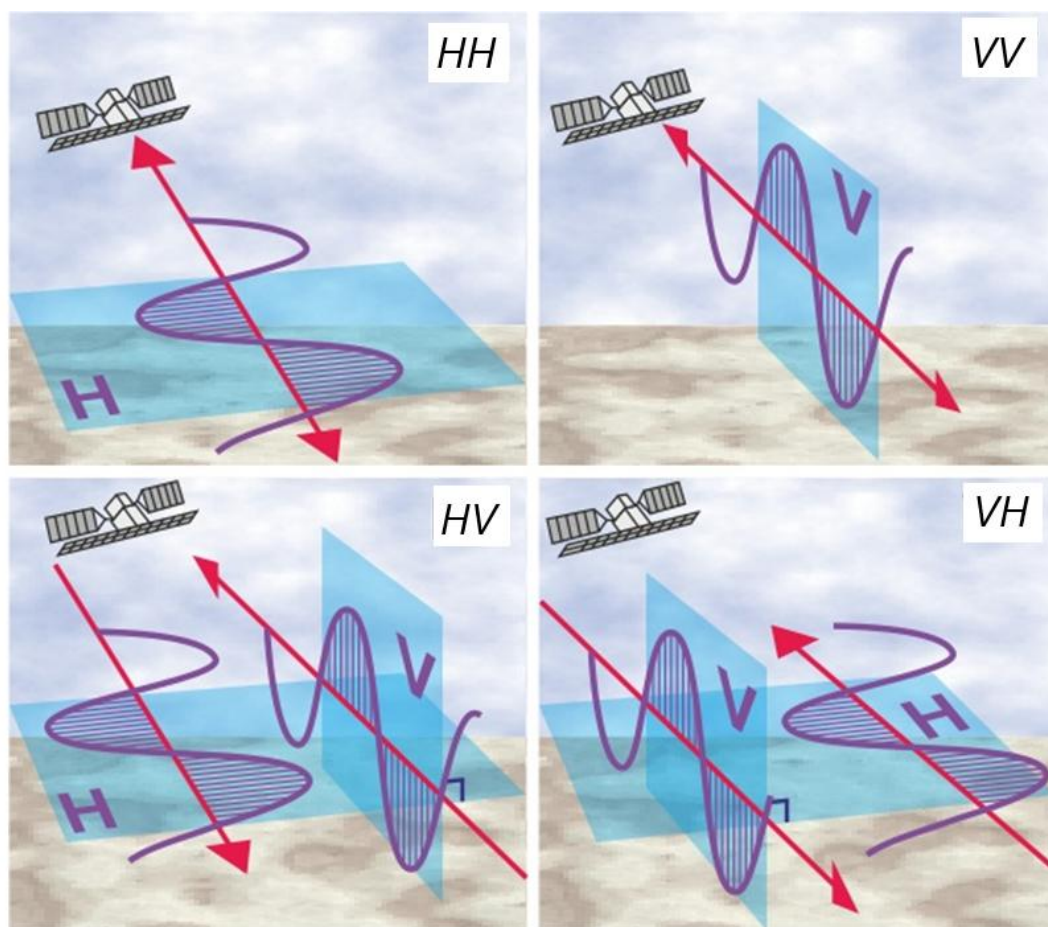


Рис. 3. Различные виды поляризации радиосигнала

Комбинирование поляризаций позволяет улучшить распознавание различных объектов, поэтому важно правильно выбрать вид поляризации.

Обработка радиолокационных снимков, сделанных одновременно в нескольких поляризационных каналах, называется поляриметрической. Уникальная особенность поляриметрических данных состоит в возможности классификации объектов на снимке по физическому типу отражения. Каждый тип отражения по-своему отображается на снимках различной поляризации. Если рассмотреть значения пикселя в каждой из четырех возможных поляризаций (так называемая четырехполяризационная матрицы), то в зависимости от того, в какую область этой матрицы он попадает, ему присваивается определенный класс. На рис. 4 приведен пример радиолокационного снимка, прошедшего поляриметрическую обработку.

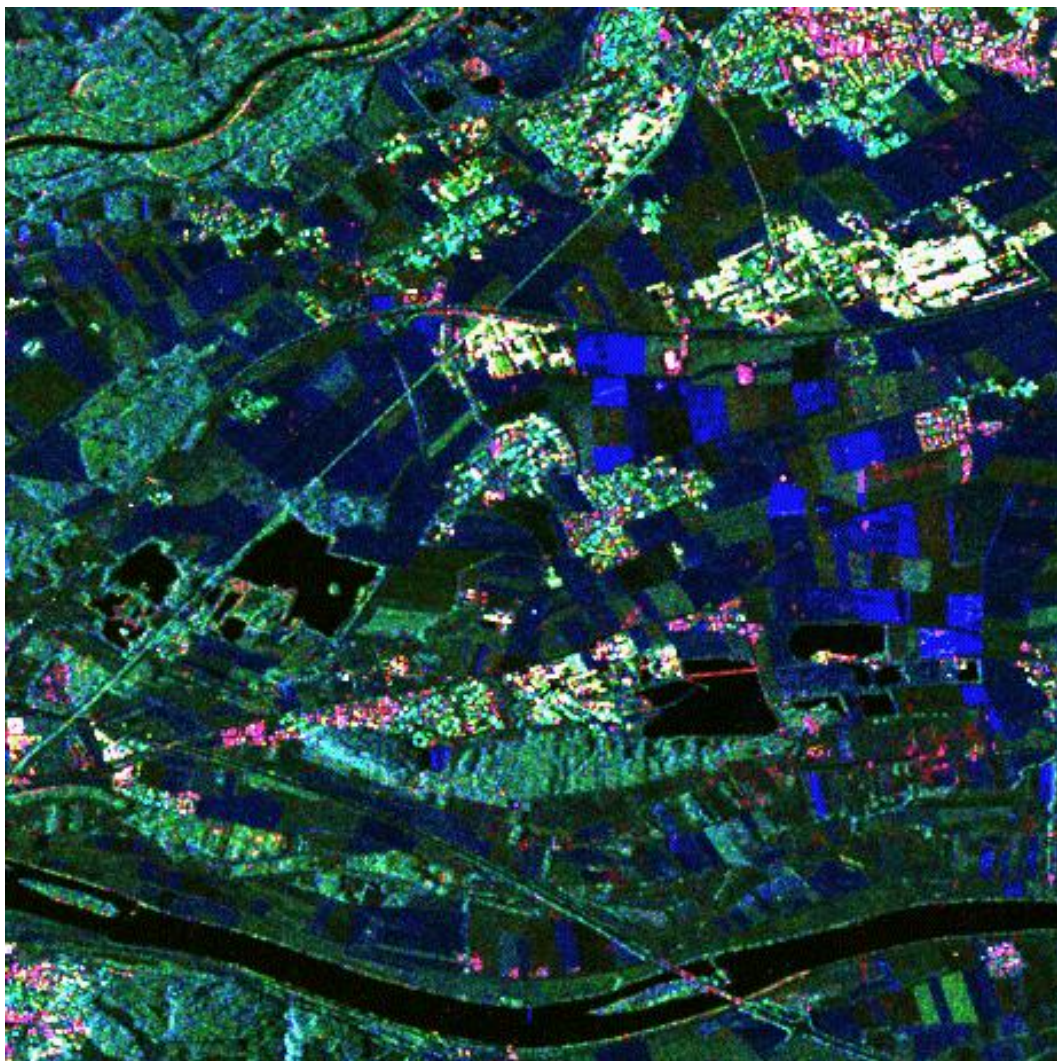


Рис. 4. Результат поляриметрической обработки снимка

1.1.4. Геометрические особенности радиолокационной съемки

Исходя из необходимости применения бокового обзора поверхности при радиолокационной съемке, геометрические параметры снимков значительно отличаются от кадровых и сканирующих систем, обычно применяемых при дистанционном зондировании в оптическом диапазоне. Общим для них будет лишь движение платформы в направлении полета носителя.

Вследствие поступательного перемещения носителя радиолокатор выполняет съемку местности в полосе обзора, параллельной линии полета. Расстояние от точки надира до ближней границы полосы съемки называется ближней дальностью, расстояние до дальней границы называется предельной дальностью.

Основные геометрические параметры радиолокационной съемки приведены на рис. 5.

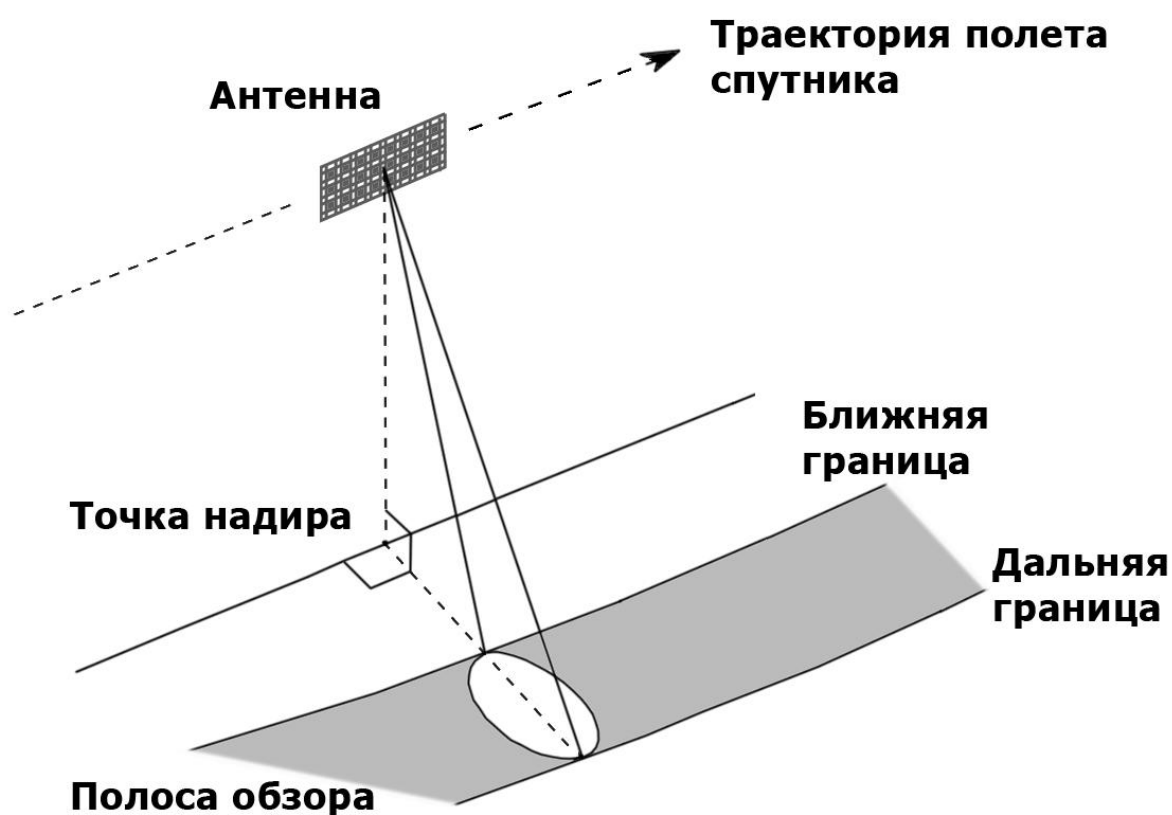


Рис. 5. Геометрические параметры радиолокационной съемки

Принцип бокового обзора предусматривает распространение узконаправленных коротких зондирующих сигналов под заданным углом θ' к нормали в направлении, перпендикулярном прямолинейной траектории движения. Угол падения возрастает по мере движения поперек полосы наблюдения от ближней дальности к предельной дальности. Угол падения θ' равен углу обзора θ (рис. 6).

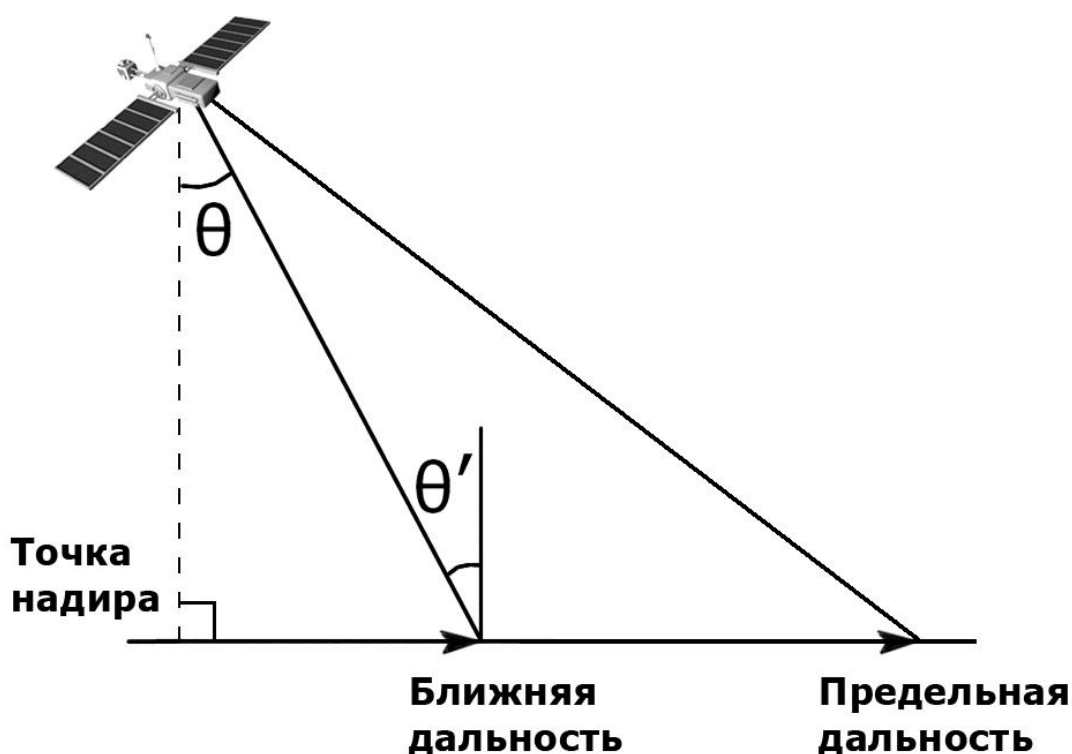


Рис. 6. Углы падения и обзора

Использование развертки по времени препятствует радиолокационной съемке в нади́р и при углах падения меньше 20° , так как в этих случаях отклики от множества близких друг к другу элементов местности возвращаются к радиолокатору практически одновременно. Поэтому ближнюю границу полосы съемки устанавливают на расстоянии около одной трети от высоты полета.

С увеличением угла падения значительно возрастает требуемая мощность излучаемых сигналов. В связи с этим для космических радиолокаторов угол падения, как правило, изменяется в пределах от 20° до 60° .

Формирование радиолокационного снимка происходит в системе координат «дальность» – «азимут», показанной на рис. 7. Координата «дальность» отсчитывается вдоль направления, перпендикулярного к линии полета. Это горизонтальное расстояние вдоль земной поверхности от точки надира до рассматриваемого элемента земной поверхности.

Для вычисления координаты «дальность» используется угол обзора и наклонная дальность – расстояние от антенны до каждого элемента поверхности.

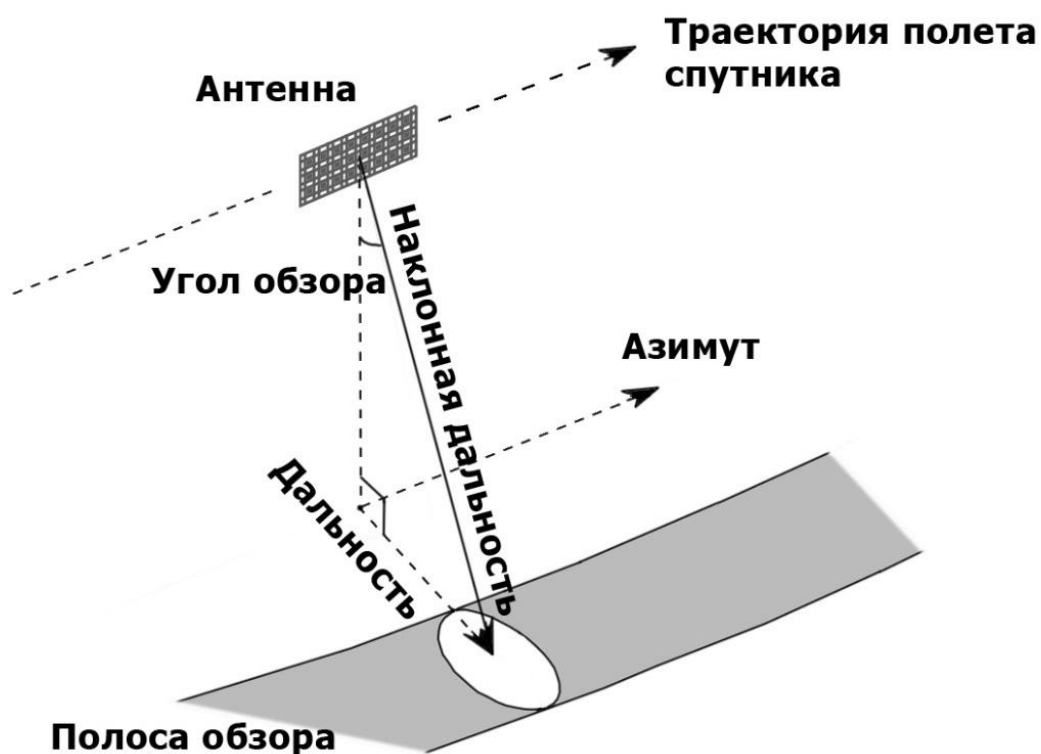


Рис. 7. Координаты в системе бокового обзора

Наклонная дальность рассчитывается по формуле

$$R = \frac{c \cdot t}{2}, \quad (1)$$

где c – скорость распространения сигнала;

t – общее время прохождения сигнала.

Координата «азимут» отсчитывается вдоль линии, параллельной направлению полета.

Формирование кадра происходит за счет движения носителя.

Важной характеристикой радиолокационного изображения является пространственное разрешение – площадь местности, изображаемая на одном пикселе снимка. Чем меньше величина пространственного разрешения, тем более мелкие объекты можно различить на снимке. Оно разделяется на два вида: разрешение по наклонной дальности и разрешение по азимуту.

Величина разрешения по наклонной дальности определяется длительностью зондирующих импульсов, она не зависит от длины волны и вычисляется по формуле

$$RES_{range} = \frac{c \cdot \tau}{2}, \quad (2)$$

где τ – длительность импульса;

c – скорость распространения сигнала.

Отличить два объекта, находящихся на расстоянии, эквивалентном половине длительности импульса, невозможно.

Так, для получения разрешения $1,5$ км длительность импульса должна составлять 10 мкс, что реализуемо.

Для получения разрешения 10 м длительность импульса должна составлять 60 нс, что *нереализуемо* при помощи современных технических средств.

Пространственное разрешение радиолокационных снимков по азимуту зависит от ширины диаграммы направленности антенны и определяется по формуле

$$RES_{azimuth} = \alpha \cdot R = \frac{\lambda \cdot R}{D}, \quad (3)$$

где α – размер апертуры;

R – расстояние до объекта съемки;

λ – длина волны;

D – длина антенны.

Ширина диаграммы направленности антенны обратно пропорциональна размеру антенны и прямо пропорциональна длине волны. Поэтому для достижения высокого пространственного разрешения необходимо использовать антенны большого размера и выполнять съемку в коротковолновом диапазоне. Предельные размеры антенны ограничены грузоподъемностью и габаритами космических летательных аппаратов и ракет-носителей. Например, для получения разрешения 10 м при высоте съемки 600 км требуется антенна размером $D = 0,03 \times 600 \times 1\,000 / 10 = 1\,800$ м, что реализовать невозможно.

Для устранения ограничения по длине антенны и увеличения разрешения в современных радиолокаторах бокового обзора используется специальная регистрация и обработка отраженных радиосигналов – синтезирование апертуры. Это достигается формированием искусственного раскрыва антенны при последовательном перемещении реальной антенны в пространстве, в результате чего полученные сигналы, соответствующие каждому излученному импульсу, могут рассматриваться как элементы, сформированные одной антенной, длина которой соответствует пройденному расстоянию. При этом горизонтальный размер синтезированной антенны обратно пропорционален физическому размеру реальной антенны и может быть очень большим. Таким образом, пространственное разрешение в радиолокаторах с синтезированной апертурой (РСА) может быть достаточно высоким в зависимости от высоты полета летательного аппарата. В настоящее время радиолокационные системы с синтезированной апертурой находят все большее применение в различных сферах, таких как исследование динамических процессов и создание высокоточных цифровых моделей местности.

1.1.5. Искажения на радиолокационных снимках

В силу геометрических особенностей радиолокационной съемки на снимках возникают значительные искажения. Природа этих искажений связана в первую очередь с принципом бокового обзора. Геометрические искажения могут не учитываться только для участков местности с перепадами высот, сопоставимыми с пространственным разрешением РСА.

Принято выделять следующие виды геометрических искажений (рис. 8).

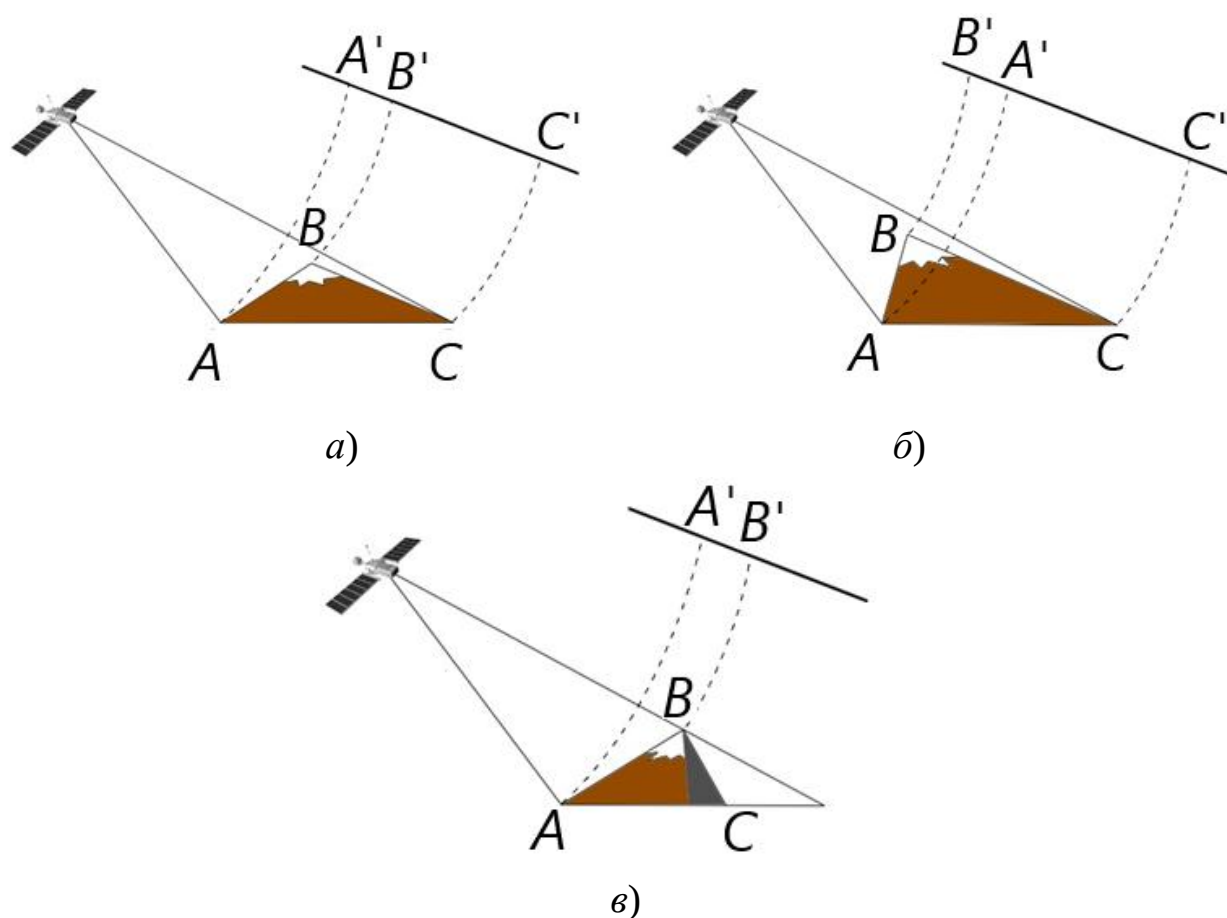


Рис. 8. Виды геометрических искажений на радиолокационных снимках:

a) foreshortening; б) layover; в) radar shadow

1. Эффект перспективного (*foreshortening*) и отрицательного (*layover*) сокращения. Перспективное сокращение возникает из-за того, что при съемке передний склон горы или холма составляет некоторый угол с горизонтальной поверхностью (см. рис. 8, *a*).

Поскольку радиолокатор измеряет наклонную дальность, то склон *AB* будет изображаться более коротким, чем в действительности, в то время как его длина по координате «наклонная дальность» равна *A'B'*. Величина сокращения зависит от крутизны склона и угла падения радиолокационного луча. Максимальное сокращение наблюдается, когда луч падает на склон перпендикулярно его поверхности, тем самым лучи достигают

всех его точек одновременно. Длина склона по координате «наклонная дальность» при этом оказывается равной нулю.

Перспективное сокращение переходит в отрицательное сокращение (layover), когда вершина горы или холма *B* по координате «наклонная дальность» оказывается ближе к радиолокатору, чем основание *A* (см. рис. 8, б). Соответственно сигнал, отраженный от вершины, будет зафиксирован раньше, чем сигнал, отраженный от начала склона. В результате изображение вершины на радиолокационном снимке окажется ближе к радиолокатору. Эффекты сокращения и отрицательного сокращения на радиолокационном изображении выглядят очень похоже. Отрицательное укорачивание возникает при малых углах падения у ближнего края полосы изображения и в горных районах с крутыми склонами.

2. *Эффект радиолокационной тени (radar shadow)*. Вследствие прямолинейности распространения радиолокационных импульсов в горных районах имеются участки, которых радиоволны не достигают, и от которых не может отразиться энергия сигнала. Такие участки на снимке кажутся черными и встречаются прежде всего на склонах гор, наклоненных от антенны (см. рис. 8, в). Радиотени могут отмечаться и на наклоненных к антенне склонах вследствие особенностей рельефа. Рис. 8, в показывает, что величина радиотеней зависит от угла визирования, высоты полета и высоты объекта съемки и увеличивается от ближней к дальней зоне снимка.

В связи с этим при подборе радиолокационных снимков требуется принимать во внимание в первую очередь характер рельефа исследуемой территории. Эффекты перспективного и отрицательного сокращения исправляются в ходе ортотрансформирования снимка с применением цифровой модели рельефа. Для устранения эффекта радиотеней рекомендуется использовать снимки, полученные с разных витков орбиты.

1.2. Интерферометрическая съемка

1.2.1. Основные понятия интерферометрии

Рассмотрим основные понятия, связанные с интерферометрической съемкой.

Интерферометрия – метод измерений, использующий эффект интерференции электромагнитных волн. *Интерференция* – взаимное увеличение или уменьшение результирующей амплитуды двух или нескольких когерентных волн при их наложении друг на друга (рис. 9).

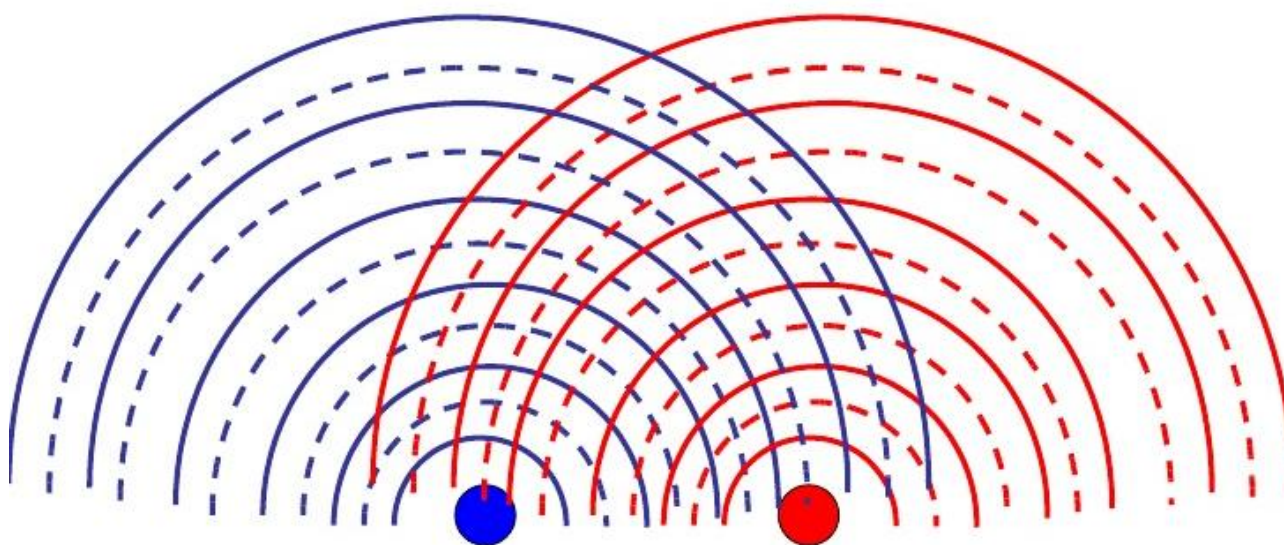


Рис. 9. Интерференция волн

Интерферометрическая обработка предполагает получение нескольких когерентных измерений одного и того же объекта на земной поверхности со сдвигом в пространстве приемной антенны радиолокатора.

Когерентность – согласованность нескольких колебательных или волновых процессов во времени, проявляющаяся при их сложении. Колебания когерентны, если разность их фаз постоянна во времени, и при сложении колебаний получается колебание той же частоты.

Технология интерферометрической съемки основана на том, что съемочная система, на которой установлен радар с синтезированной апертурой, может отснять одну и ту же территорию под углами съемки, незначительно отличающимися друг от друга. При этом появляется возможность сравнить отклик сигнала от одной и той же точки, полученный при разном положении антенны (рис. 10).

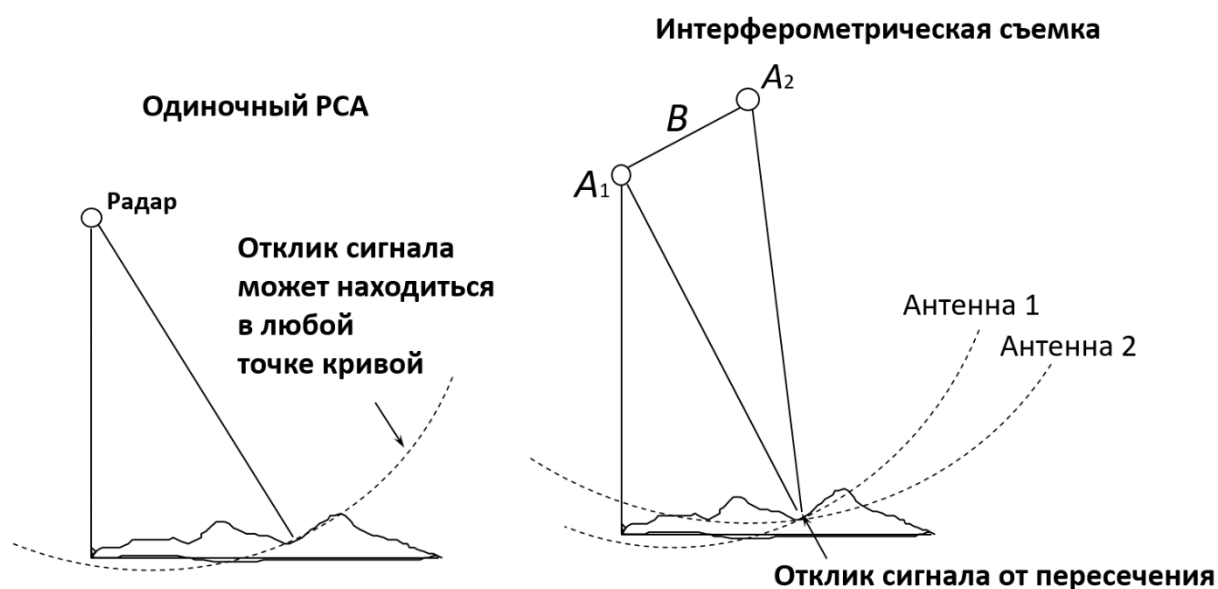


Рис. 10. Принцип интерферометрической съемки

Основные геометрические параметры, характеризующие интерферометрическую съемку, приведены на рис. 11.

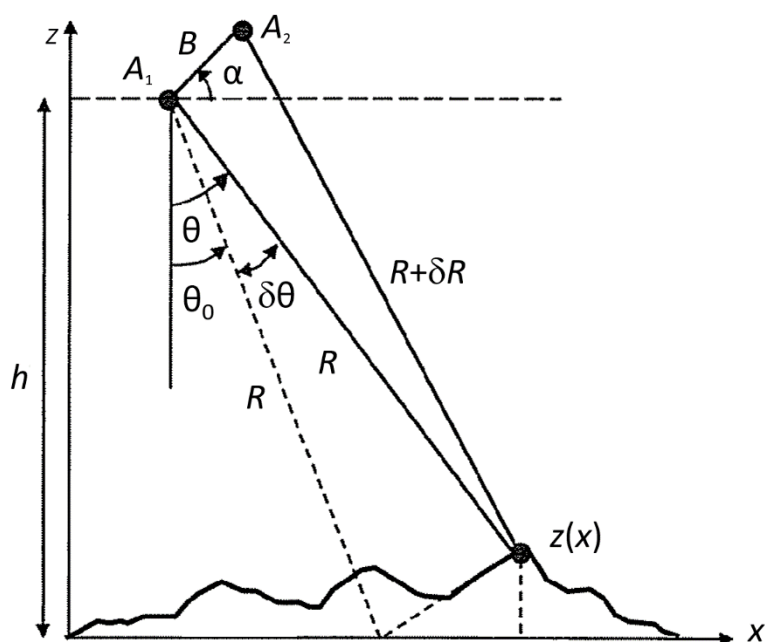


Рис. 11. Геометрия интерферометрической съемки:

A_1 и A_2 – антенны радиолокатора; B – пространственная базовая линия; θ – угол обзора; R – наклонная дальность; h – высота съемки; α – угол наклона базовой линии

Интерферометрическая съемка может быть реализована различными способами:

- два РСА закреплены на одном и том же носителе с фиксированной базой (однопроходная схема);
- носитель с одним РСА выполняет повторную съемку с одной и той же орбиты через определенный временной промежуток;
- два носителя перемещаются на одинаковом расстоянии. При этом один спутник ведет активное излучение, и оба принимают отраженный сигнал (например, при помощи спутников TanDEM-X).

Первые съемки земной поверхности с использованием схемы с фиксированной базовой линией, получившие одновременно полностью когерентные пары снимков, были осуществлены в 2000 г. в ходе проекта Space Shuttle под названием Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). В течение 10 дней было отснято около 80 % поверхности земной суши. При этом два снимка формировались одновременно, что исключало влияние неоднородности среды распространения и факторы временной декорреляции. Однако недостатком метода являлась ограниченная длина базовой линии, что не позволяло создавать модели рельефа с ошибками менее 10 м. Увеличение размера базовой линии до сотен метров при сохранении схемы однопроходной синхронной интерферометрии было возможно только при использовании двух космических аппаратов на одной орбите (или очень близких орбитах).

Такой вариант был успешно реализован в проекте под названием TDX (TanDEM-X: TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement), начало которого относится к 2010 г. Два идентичных космических аппарата типа TerraSAR-X были сведены на близкие орбиты, благодаря чему величина базовой линии смогла изменяться от 100 до 1 000 м. Проект миссии TDX был разработан в расчете на сбор необходимой информации для построения глобальной модели рельефа в течение трех лет совместной работы двух космических аппаратов. В 2016 г. были опубликованы результаты, из которых следовало, что построена глобальная цифровая модель рельефа, на которой высоты имеют абсолютную величину ошибки не более 10 м, а относительные ошибки разности высот не превышают 4 м.

Несмотря на то, что данный способ дает более точные результаты и реализуется за короткий период времени, он является дорогостоящим, поэтому в настоящее время наиболее часто применяется метод двухпроходной интерферометрической съемки с использованием одного и того же съемочного аппарата.

1.2.2. Требования к исходным данным для интерферометрической съемки

Выполнение интерферометрической обработки радиолокационных снимков возможно только при соблюдении ряда условий.

Главным условием получения интерференционной картины является съемка идентичными по характеристикам радиолокационными системами либо одним и тем же радиолокатором. При этом необходимо обеспечить выполнение съемки при незначительно отличающихся углах наклона из близких точек пространства.

Величина пространственной базовой линии (расстояние между положениями приемных антенн во время съемки) должна выбираться в зависимости от решаемой задачи. Исходя из теоретических расчетов, точность создания цифровой модели местности тем выше, чем больше длина базовой линии. Но следует принимать во внимание, что чрезмерно большие базовые линии приводят к снижению когерентности. Если задача заключается в выявлении смещений земной поверхности, то, напротив, предпочтительнее использовать интерферометрические пары с минимальной базовой линией, так как теоретически на интерферограмме, построенной из одной точки пространства, отобразятся только смещения. Существует предельно-допустимая длина пространственной базовой линии, при которой возможно создание интерферограммы. Это значение может быть рассчитано для каждого диапазона длин волн по формуле

$$B_{critical} = \frac{\lambda \cdot R}{RES_{azimuth} \cdot \cos^2 \theta}, \quad (4)$$

где λ – длина волны;

R – наклонная дальность;

$RES_{azimuth}$ – пространственное разрешение по азимуту;

θ – угол обзора.

В соответствии с формулой (4) при обработке данных L -диапазона величина базовой линии может быть на порядок больше, чем для данных C -диапазона.

Если съемка выполняется одним и тем же спутником, необходим как можно меньший временной промежуток во избежание появления изменений, снижающих корреляцию. В случае выполнения мониторинга смещений и деформаций рекомендуется подбирать пары снимков за схожие даты и сезоны.

Несмотря на то, что радиоизлучение проникает через облачность, влияние облачности все равно присутствует и, соответственно, вносятся изменения в распространение отправленного и отраженного сигналов, особенно если облака насыщены влагой.

Наряду с наличием облачности важным фактором является состояние подстилающей поверхности. Например, если первый снимок из интерферометрической пары получен при малооблачной сухой погоде, а второй – при влажной погоде, то корреляция этих снимков будет низкая. То же самое относится к наличию и состоянию снежного покрова, растительности и т. п.

Таким образом, для повышения вероятности достижения хорошего результата требуется тщательно подходить к вопросу подбора данных. В первую очередь необходима оценка пространственной базовой линии и временного промежутка между съемками. Для интерферометрической обработки можно использовать данные, получаемые при соблюдении вышеописанных условий, но для того чтобы получить более качественные результаты, рекомендуется использовать не пары, а серии изображений. При использовании интерферометрических серий (от четырех изображений) существенно повышается вероятность достижения полного и качественного результата, поскольку даже при тщательном выборе данных нельзя гарантировать их высокую когерентность по всему полю изображения из-за различных факторов, а при использовании цепочек данных эта проблема частично решается.

Например, для полупустынной территории, почти лишенной растительности, значения когерентности будут в целом выше и однороднее, чем для залесенных территорий. Так как значительная часть территории России покрыта лесами, рекомендуется использовать:

- цепочки данных, в том числе и разносезонные;
- данные, получаемые в L -диапазоне, так как большая длина волны обладает большей проникающей способностью, а следовательно, состояние растительного покрова оказывает меньшее влияние на уровень когерентности;
- поляриметрические наборы данных.

В целом для интерферометрии наиболее подходят данные с параллельной поляризацией, максимальный уровень когерентности имеют данные VV поляризации, HH – чуть ниже. При выполнении специальной обработки поляриметрических пар данных (HH , VV , HV , VH) удастся повысить суммарный уровень когерентности за счет вычисления когерентности по четырем поляризациям.

На снимках горных территорий со сложным рельефом при проведении радиолокационной съемки практически всегда присутствуют тени, а также другие эффекты, что сильно снижает качество выходной продукции. Устранить влияние этих эффектов можно за счет использования интерферометрических цепочек данных, получаемых с разных орбит – восходящей и нисходящей. Таким образом, при комбинировании итоговых цифровых моделей информация обо всех склонах будет полной.

Обобщая данные рекомендации, можно сделать следующие выводы по требованиям к исходным данным для интерферометрической обработки.

1. Если целью интерферометрической обработки радиолокационных снимков является создание цифровой модели местности, то наиболее предпочтительным является применение данных, полученных в диапазонах L , S и C .

2. При выборе между различными диапазонами предпочтение следует отдавать тем, у которых длина волны больше ввиду того, что взаимодействие с растительным покровом у них будет минимальным.

3. Съемочные системы, работающие в коротковолновых (C и X) диапазонах, сильнее подвержены влиянию тропосферных эффектов, в то вре-

мя как S - и L -диапазоны практически от них свободны. Но следует учитывать возможное появление ионосферных эффектов на снимках L -диапазона.

4. Пространственное разрешение снимков при решении задачи восстановления рельефа будет влиять на точность определения высот только в том смысле, что можно использовать более длинную базу. Кроме того, повышение разрешения позволяет получить более пространственно-детальный рельеф.

5. Использование сигналов с согласованной поляризацией (HH или VV) более предпочтительно для интерферометрической обработки, нежели использование снимков, полученных с перекрестной поляризацией (HV или VH). При выборе типа согласованной поляризации предпочтение обычно отдается вертикально-вертикальной поляризации.

6. С точки зрения времени проведения съемок, наиболее подходящим сезоном представляется осень, когда изменения характеристик поверхности, обусловленные растительным покровом, минимальны. Интервал между съемками желательно выбирать как можно меньшим. Если интервал между доступными съемками составляет год или более, целесообразно выбирать снимки, сделанные в один и тот же сезон. Нежелательно для интерферометрической пары комбинировать снимки, полученные в разных сезонах, особенно зимой и летом.

7. Выбор оптимальной геометрии съемки производится исходя из минимизации эффектов сжатия отклика от поверхности на снимке и затенения отдельных участков рельефом. Предварительную оценку этих эффектов можно сделать по топографической информации на участок съемки.

8. При выборе базовой линии между интерферометрическими съемками нужно иметь в виду задачу обработки. Если речь идет о восстановлении рельефа, то большие значения базы позволяют улучшить разрешение по высоте выходной ЦМР, однако при этом детали рельефа могут маскировать фазовую компоненту, обусловленную подвижками поверхности. Поэтому при решении задач, связанных с дифференциально-интерферометрической обработкой, база выбирается как можно меньшей.

1.2.3. Интерферометрическая обработка радиолокационных снимков для построения цифровых моделей рельефа

Технология интерферометрической обработки радиолокационных данных предполагает получение нескольких когерентных измерений одного и того же участка земной поверхности со сдвигом в пространстве приемной антенны радиолокатора. Рассмотрим случай выполнения интерферометрической съемки с некоторого базиса B , в результате которой из двух точек пространства A_1 и A_2 измерены наклонные дальности r_1 и r_2 до объекта на земной поверхности.

Найдем связь между рельефом и разностью фаз. Разность наклонных дальностей от антенн A_1 и A_2 :

$$\Delta r = r_2 - r_1 = \sqrt{r_1^2 + B^2 - 2r_1 \cdot B \cdot \sin(\theta - \alpha)} - r_1, \quad (5)$$

где B – базис интерферометрической съемки;

θ – угол обзора;

α – угол между базовой линией и местной горизонталью.

Угол θ связан с расстоянием от носителя до Земли r и местным радиусом Земли R , описывающим рельеф.

Разность фаз при двукратном прохождении расстояний r_1 и r_2 равна:

$$\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r. \quad (6)$$

Выражение (6), связывающее разность фаз и локальный радиус Земли, позволяет создать цифровую модель рельефа, в которой каждый элемент (пиксель) поверхности имеет определенную высоту. Разность фаз пропорциональна проекции базы на линию между точкой A_1 и зондируемым элементом земной поверхности.

Методика интерферометрической обработки пары радиолокационных изображений с целью получения ЦМР в общем случае состоит из следующих базовых шагов (рис. 12).

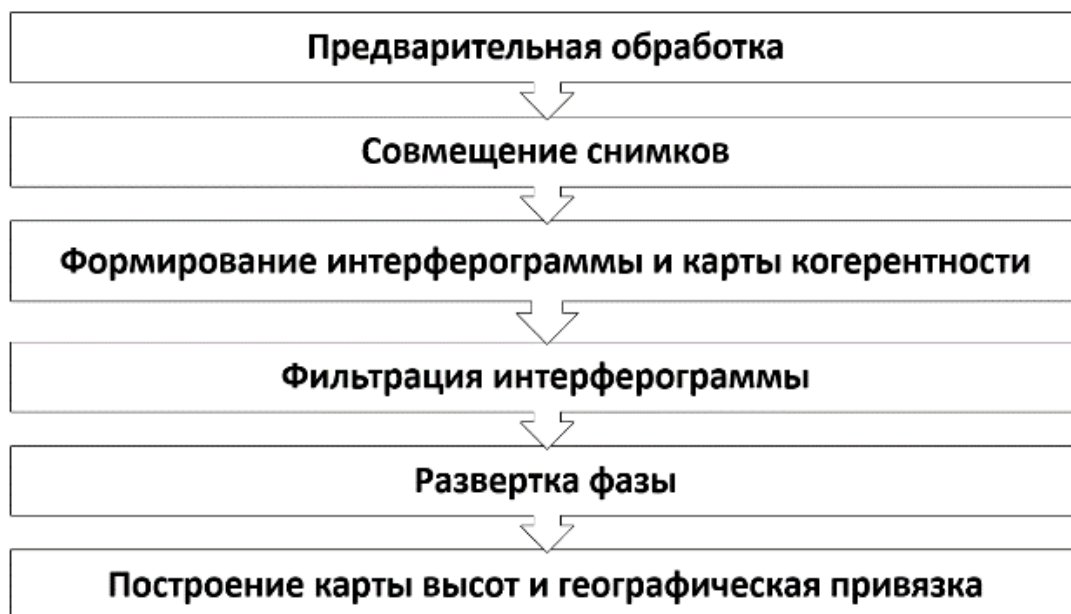


Рис. 12. Методика обработки снимков для построения ЦМР

Предварительная обработка заключается в считывании файлов снимков и файлов, содержащих информацию о точных орбитах спутников-носителей радаров, а также выделение на снимках исследуемой области.

Для построения качественной интерферограммы и определения с ее помощью высот или смещений поверхности, необходимо, чтобы два изображения обладали высокой когерентностью (условие интерференции), а также были совмещены геометрически с высокой точностью.

Ограничением для возможности интерферометрической обработки пары (или цепочки) радарных снимков являются пространственная и временная базы. В частности, при превышении некоторого критического значения базовой линии $B_{critical}$ интерферометрическая обработка становится в принципе невозможной вследствие пространственной декорреляции снимков. *Временной базой* называют промежуток времени, прошедший между съемкой изображений, составляющих интерферометрическую пару. За этот период могут произойти изменения рельефа, растительности, влажности, шероховатости и других свойств отражающей поверхности, что снижает когерентность обрабатываемых снимков. Однако для временной базы нет четко сформулированных критических значений, подобных тем, что существуют для пространственной базы.

После проверки условия для $B_{critical}$ выполняется *совмещение* (англ. coregistration) снимков.

В схеме двухпроходной интерферометрии снимки, полученные на разных витках, будут смещены и повернуты друг относительно друга. Совмещение изображений с точностью выше размера элемента изображения необходимо для расчета интерферограммы. Чем точнее совмещены изображения, тем выше будет отношение сигнал/шум и тем меньше будет фазовых ошибок на интерферограмме. Главная цель совмещения изображений (рис. 13) – пересчет раstra вспомогательного изображения в проекцию основного изображения с помощью аффинного преобразования. При этом предполагается, что траектории платформ РСА на интервале съемок практически параллельны и аффинного преобразования достаточно для пересчета раstra вспомогательного изображения в основное с достаточной точностью.

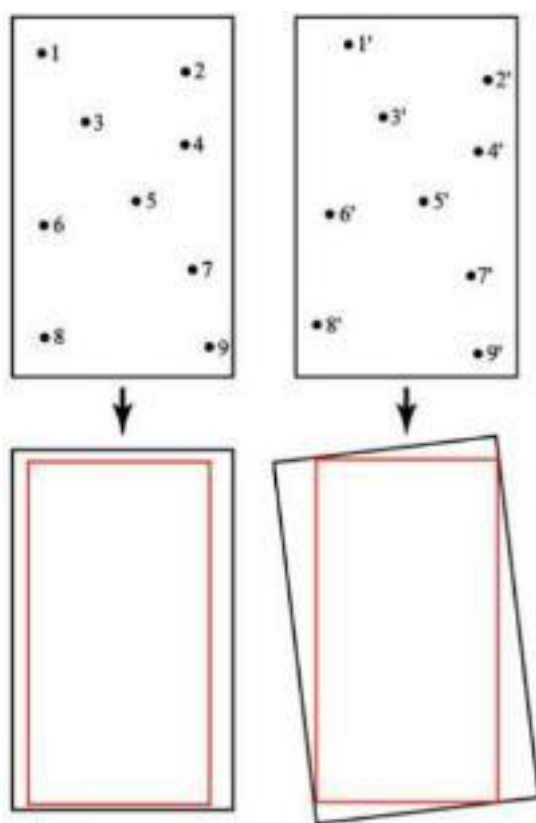


Рис. 13. Принцип совмещения изображений
(область пересечения основного и вспомогательного изображений
показана красным прямоугольником)

Аффинное преобразование является комбинацией линейных преобразований, сопровождаемых переносом изображений. Любое аффинное преобразование плоскости можно описать при помощи троек однородных координат и матриц третьего порядка. После того, как найдены три идентичные точки, рассчитываются параметры аффинного преобразования. На этом процесс совмещения может быть завершен. Однако для уточнения параметров преобразования пользователь может продолжить набор точек. Поскольку аффинные параметры уже известны, при установке точки на основном снимке включается режим автоматического поиска координат соответствующей точки на вспомогательном изображении. Таким образом, точка автоматически устанавливается на позицию, найденную с помощью параметров аффинного преобразования.

Далее формируется интерферограмма как результат комплексного поэлементного перемножения основного снимка и вспомогательного снимка, геометрически совмещенного с основным.

В результате определяется интерферометрическая фаза (разность фаз) Φ .

Результирующая фаза Φ , полученная в ходе интерферометрической обработки фазовых слоев изображений интерферометрической пары, состоит из следующих компонентов:

$$\Phi = \Phi_{topo} + \Phi_{def} + \Phi_{atm} + \Phi_{noise}, \quad (7)$$

где Φ_{topo} – фазовый набег за счет обзора рельефа под двумя разными углами;

Φ_{def} – фазовый набег за счет смещения поверхности, произошедшего между съемками;

Φ_{atm} – фазовый набег за счет различия длин оптических путей из-за преломления в среде распространения сигнала;

Φ_{noise} – изменения фазы в результате электромагнитного шума.

Для получения цифровой модели рельефа необходимо устранить интерференционные полосы, возникающие вследствие изменения разности фаз за счет изменения наклонных дальностей. Устранение выполняется

с использованием средней высоты рельефа, получаемой с помощью любой имеющейся ЦМР. Тогда результирующая интерферограмма будет описывать только высоту рельефа.

Фильтрация интерферограммы. Фазовый шум, присутствующий на промежуточных и конечных продуктах интерферометрической обработки радиолокационных данных, состоит, как правило, из нескольких компонент, в число которых входят шумы аппаратуры РСА, канала распространения радиоволн, системы обработки и пространственно-временной декорреляции снимков.

Наличие фазового шума приводит к ухудшению разрешения по высоте в случае использования интерферометрической обработки для создания ЦМР или к ошибкам определения смещений поверхности в задачах дифференциальной интерферометрии.

Подавление фазового шума может быть выполнено на нескольких этапах обработки, что обуславливается как применяемыми методами фильтрации, так и решаемыми задачами.

Необходимо отметить, что при фильтрации неизбежно происходит ухудшение пространственного разрешения обрабатываемого изображения. Поэтому при задании параметров алгоритма фильтрации желательно принимать во внимание этот факт и избегать слишком интенсивной фильтрации интерферограммы.

Развертка фазы (phase unwrapping или развертывание фазы). Зафиксированная на интерферограмме фаза находится в интервале от $-\pi$ до π , но ее действительное значение может далеко выходить за эти пределы.

Развертка фазы позволяет восстановить истинное ее значение посредством добавления или вычитания кратного 2π числа к фазе таким образом, чтобы сделать соответствующую фазовую картину максимально гладкой.

Существует много методов развертки фазы, каждый из которых по-своему устраняет имеющуюся противоречивость исходных данных, имеет свои преимущества и недостатки. На практике, выбирается такой метод, который обеспечивает наиболее высокую точность решения задачи при заданных требованиях к объему оперативной памяти и времени поиска решения.

Методы развертки фазы принято классифицировать (по характеру работы с интерферограммой) на локальные и глобальные методы. Глобальные методы работают сразу со всеми значениями интерферограммы. Локальные методы для формирования оценки абсолютной фазы в данной точке используют лишь значения на интерферограмме, лежащие в окрестности этой точки.

Самым простым является метод фринговых линий, но он работает лишь в случае идеальных интерферограмм, когда все фринги легко распознаются и не имеют свободных концов.

Метод наименьших квадратов дает оптимальное решение задачи, только если искомое поле абсолютной фазы не содержит разрывов, а шум адекватно описывается аддитивной гауссовой моделью с некоррелированными сечениями. Единичный разрыв абсолютной фазы дает в решении локальную ошибку, величина которой убывает обратно пропорционально расстоянию до разрыва. В среднем метод наименьших квадратов дает заниженную оценку градиента абсолютной фазы.

В методе функций Грина оценка абсолютной фазы является результатом осреднения по всем возможным путям интегрирования, благодаря чему метод является наиболее устойчивым по отношению к присутствию шума.

Универсального рецепта по выбору того или иного метода развертки фазы и настройке значений его параметров не существует. Тем не менее, можно сформулировать ряд общих рекомендаций, следование которым позволяет получить хороший результат обработки в большей части случаев.

Разрывы фазы на интерферограмме могут быть обусловлены влиянием фазового шума. Показателем интенсивности фазового шума на интерферограмме служит когерентность: чем выше значение когерентности, тем ниже интенсивность фазового шума и наоборот. В случае низкой средней когерентности интерферограммы (менее 0,45) целесообразно применять глобальные методы, такие как метод наименьших квадратов или метод функций Грина. Эти методы позволяют получить полное (без областей неразвернутых значений) решение с минимальной среднеквадратической ошибкой. Но решение, полученное этими методами, может со-

держат значительные локальные ошибки, обусловленные областями низкой когерентности на интерферограмме. В случае высокой средней когерентности интерферограммы (более 0,45) целесообразно использовать локальные методы, например, метод растущих пикселей. Для этого метода рекомендуется в качестве центра роста выбрать пиксель в области высокой когерентности.

Еще один источник разрывов фазы на интерферограмме – нарушение условия Найквиста – Котельникова вследствие превышения частотой следования фрингов частоты дискретизации. Наиболее часто это происходит в условиях съемки местности с резкими перепадами высоты и большой величиной базовой линии. Разрывы фазы такого рода наиболее аккуратно устраняются методом вставки ветвей отсечения или методом оптимизации сетевого потока.

Пересчет абсолютных значений фазы в высоту. Значения абсолютной фазы, полученные после развертки, можно трансформировать в абсолютные либо в относительные значения высоты.

Абсолютные фазовые значения на этапе развертки определяются с точностью до некоторой константы, одинаковой для каждой точки изображения, поэтому для нахождения абсолютных значений высот рельефа необходимо задать возвышения над опорным эллипсоидом для некоторого набора наземных опорных точек. Желательно, чтобы наземные опорные точки были распределены по обрабатываемому фрагменту изображения равномерно.

Для пересчета абсолютной фазы в относительные значения высоты необходимо лишь указать точку, относительно которой производится пересчет. Результатом пересчета является матрица высот, для которой сохранены разности высот между двумя соседними.

Матрица абсолютных или относительных высот, полученная на этапе пересчета абсолютных фазовых значений в высоту, на этапе геокодирования трансформируется в географическую систему координат (широта – долгота – высота над опорным эллипсоидом (WGS-84)) и превращается в конечный результат двухпроходной интерферометрической обработки – цифровую модель рельефа.

1.2.4. Интерферометрическая обработка радиолокационных снимков для определения смещений земной поверхности

Методика интерферометрической обработки радиолокационных снимков с целью получения смещений земной поверхности включает аналогичные шаги, рассмотренные в методике для построения ЦМР (рис. 14).

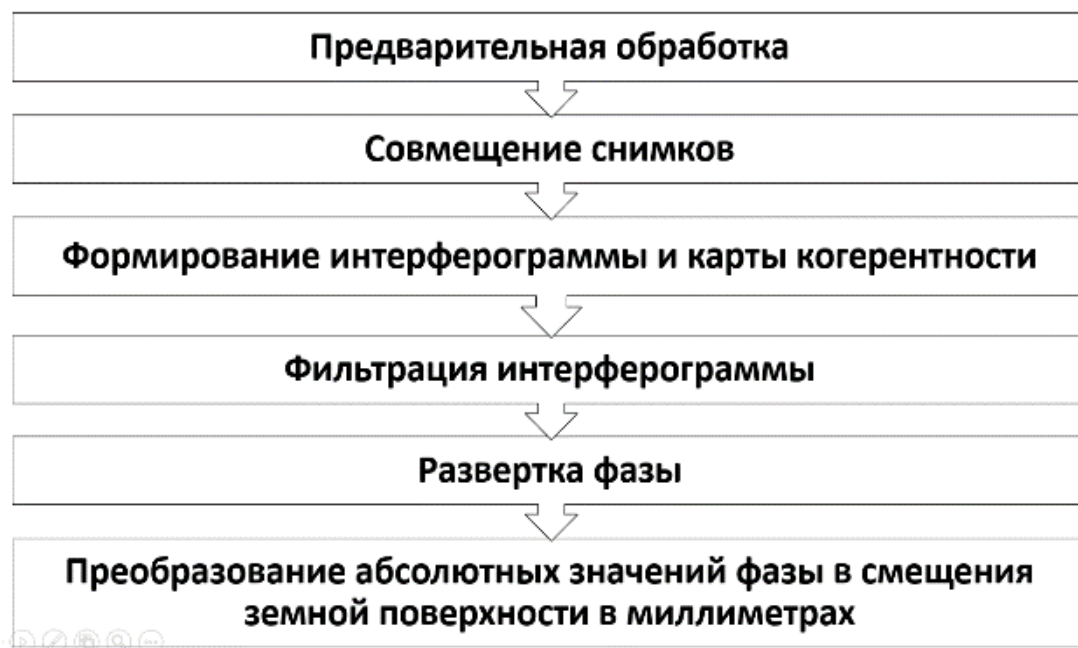


Рис. 14. Методика интерферометрической обработки снимков для определения смещений земной поверхности

Основное отличие заключается в разделении компонентов фазы. Если предположить, что условия съемки основного и вспомогательного снимков были одинаковыми, а ошибки измерений пренебрежимо малы, то для определения изменения фазы, вызванного смещением поверхности Земли, необходимо устранить только влияние рельефа.

Сделать это можно разными способами. Например, если существует достаточно точная цифровая модель рельефа данной местности, то с ее помощью можно смоделировать Φ_{topo} и затем вычесть из формулы (7). Можно также построить другую интерферограмму для данной местности и вычесть ее из первой. Результатом вычитания будет изменение фазы за счет смещения поверхности в период между съемками интерферограмм.

Полученная разностная интерферограмма называется дифференциальной, а сам способ – *дифференциальной интерферометрией*.

Завершающим этапом обработки является преобразование абсолютных значений фазы в смещения земной поверхности в миллиметрах и их географическая привязка.

1.2.5. Технология Persistent Scatterers (PS)

Основная проблема, возникающая при интерферометрической обработке пар радиолокационных снимков для определения деформаций земной поверхности, заключается в наличии фазовых шумов и атмосферных артефактов, которые не могут быть устранены на основании измерений, выполненных только по одной паре снимков. Для их исключения необходимо рассматривать серию многопроходных интерферометрических пар снимков.

Среди методов интерферометрической обработки многопроходных цепочек наиболее известными являются методы Persistent Scatterers (PS) и Small Baselines (SBas).

Исходными данными являются 20–40-проходные интерферометрические серии снимков. Результатом обработки являются не только результирующая карта смещений, но и графики развития смещений во времени для каждой точки этой карты (т. е. анализ динамики происходящих смещений). Для этих методов характерна повышенная чувствительность к малым смещениям, к выявлению трендов смещений. К преимуществам данного метода также можно отнести меньшую зависимость от величины базовой линии (поскольку смещения достоверно выявляются даже при больших базовых линиях) и упрощение процедуры развертки фазы. К недостаткам можно отнести необходимость наличия значительного количества точек, обладающих высокой когерентностью. Такая плотность постоянных отражателей достигается на застроенных территориях и на территориях без растительности.

Интерферометрия постоянных рассеивателей радарного сигнала (PS). Этот вариант радарной интерферометрии характеризуется максимально возможной точностью оценки смещений (2–4 мм по высоте).

Исходными данными для обработки должны являться не менее 30 снимков одной и той же территории за разные даты, сделанных в одной и той же геометрии съемки спутникового радиолокатора.

Программой автоматически выбирается основное изображение, на которое автоматически с точностью до $1/100$ пикселя корегистрируются остальные снимки интерферометрической цепочки. Далее программа строит так называемые интерферограммы (комплексно поэлементно перемноженные фазовые слои радарных снимков) по каждой паре снимков. Затем для каждой пары оцениваются величины когерентности (меры корреляции фаз радарных снимков). Также для каждой пары строятся карты величин стандартных отклонений амплитуд снимков.

Затем программой определяются точки – постоянные (или устойчивые) рассеиватели радарного сигнала. Для выбора точек используется несколько порогов (порог корреляции амплитуд, порог когерентности, порог пространственного и временного отклонений величин смещений первой итерации и т. д.). После того, как постоянные рассеиватели определены, для них выполняется процедура оценки фазовых разностей и мультивременной развертки фазы для точечных целей. Именно в разности фаз каждого снимка «зашифрована» величина смещений за период между съемками этих снимков.

Таким образом, для каждой из выбранных точек восстанавливается хронология изменения фазы во времени, которая затем математически пересчитывается в смещения в миллиметрах. Дополнительно в процессе обработки применяется специальный фильтр, удаляющий возможное влияние атмосферы на интерферометрическую фазу.

Результатом обработки является векторный файл точек, в атрибутах которых записаны:

- смещения, вычисленные для каждой даты съемки;
- среднегодовая скорость смещений;
- суммарная величина смещений;
- когерентность;
- высота над эллипсоидом WGS-84.

Основным недостатком данной технологии является ее применимость только для застроенных территорий, а также для отдельных зданий и со-

оружений при съемке в высоком разрешении. Полностью автоматизированный метод PS позволяет добиться максимальных точностей замера смещений и деформаций зданий и сооружений (от 2 до 4 мм по высоте), а также позволяет изучать смещения и деформации в динамике, однако он применим в большей степени к застроенным территориям и требует в качестве исходных данных не менее 30 снимков.

1.2.6. Технология *Small Baselines (SBas)*

Технология интерферометрии малых базовых линий (SBas). Полуавтоматизированный метод SBas характеризуется меньшей точностью, чем PS, и более высокими требованиями к квалификации пользователя. Его преимуществом является возможность работы в незастроенных территориях. Кроме того, для его работы требуется меньшее количество снимков (метод будет работать и по 12–15 снимкам). Это достигается за счет того, что формируемые интерферометрические пары могут быть перекрестными.

Технология включает следующие шаги:

- автоматическое совмещение снимков;
- измерение координат опорных точек;
- расчет интерферограмм;
- инверсия полученных перекрестных во времени развернутых фаз с восстановлением последовательной во времени истории смещений.

В результате восстанавливается хронология смещений от первого снимка цепочки до последнего.

2. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

2.1. Лабораторная работа № 1

Определение зоны затопления по радиолокационным снимкам

Цель работы: обработка разновременных снимков со спутника Sentinel-1 для выявления зоны затопления и ее визуализации в виде псевдоцветного композитного изображения.

Используемое оборудование, материалы и программное обеспечение:

- 1) персональный компьютер;
- 2) программное обеспечение ESA SNAP Toolbox;
- 3) пара разновременных снимков Sentinel-1.

Задачи работы:

- 1) закрепить пройденный материал, посвященный физическим свойствам радиоволн и их взаимодействию с водной поверхностью;
- 2) изучить методику выявления зоны затопления и ее визуализации в виде псевдоцветного композитного изображения.

Порядок выполнения работы

1. Выполнить загрузку исходных данных в программу SNAP и выбрать область интереса.

Загрузку данных можно осуществить двумя способами:

- 1) с помощью команды *Open Product* главного меню *File*;
- 2) путем перетаскивания архива с данными в окно *Product Explorer*.

Далее необходимо визуализировать амплитудные изображения (*Amplitude_VV*) путем двойного нажатия в раскрывающемся списке каналов *Bands* (рис. 15).

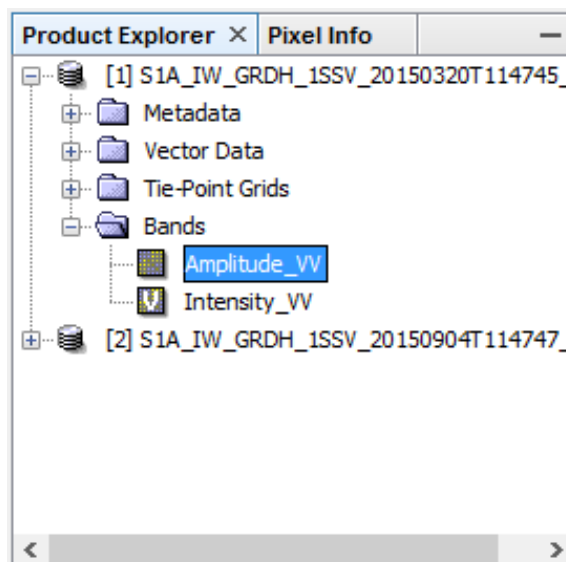


Рис. 15. Окно программы SNAP с исходными данными

Для работы удобнее расположить окна рядом друг с другом с помощью команды *Tile evenly* из меню *Window* и синхронизировать перемещение с помощью кнопки  (*Synchronize views across multiple image window*) в окне *Navigation*. После этого можно произвести выбор области интереса – территории, охватывающей разливы вдоль реки, как показано на рис. 16.

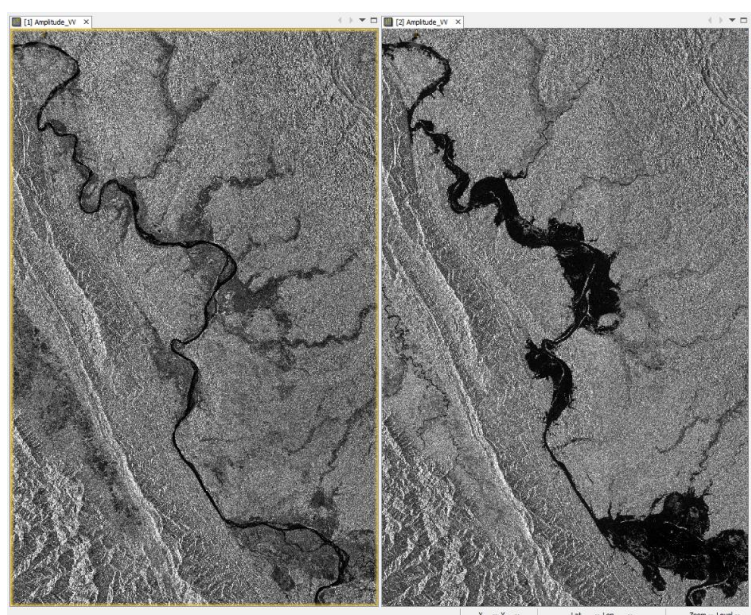


Рис. 16. Выбор области интереса

Изображение водной поверхности на снимке соответствует черному цвету, поскольку происходит практически полное отражение радиоволн от невозмущенной водной глади.

Обрезка изображения осуществляется с помощью команды *Subset* из меню *Raster* (рис. 17).

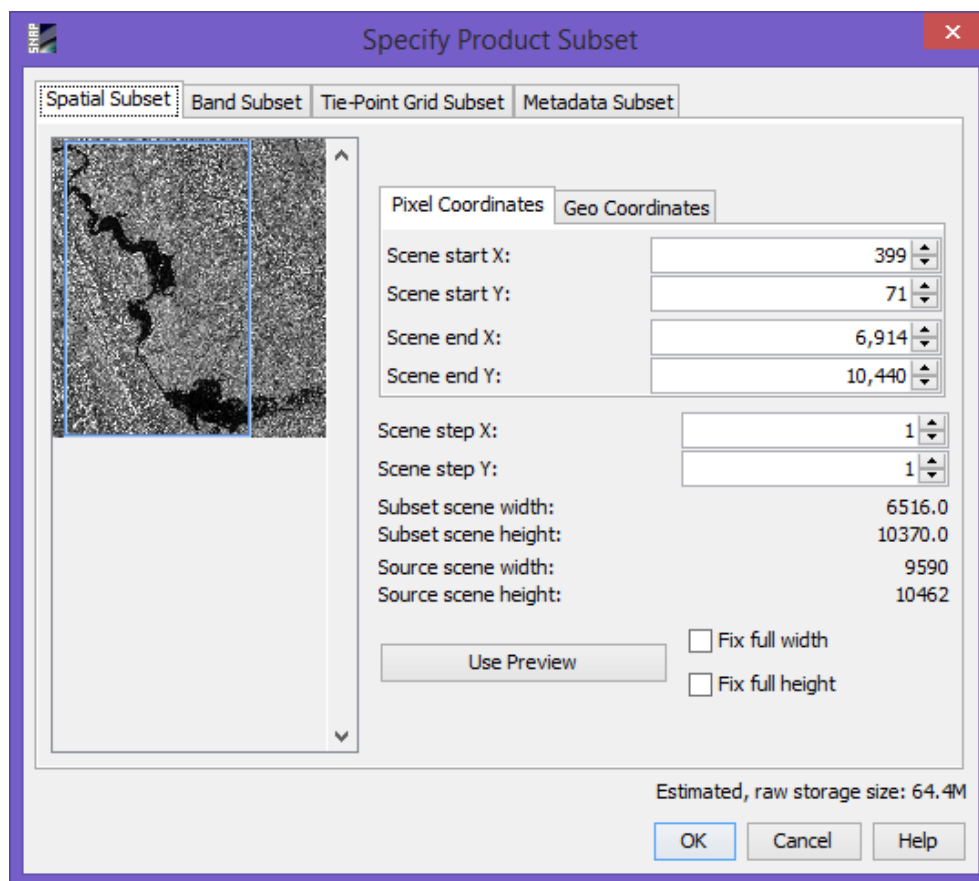


Рис. 17. Выбор области интереса

Для сохранения выбранных фрагментов снимков необходимо воспользоваться командой *Save Product* из меню *File*, добавив к имени файла индекс «_sгор».

2. Выполнить предварительную обработку снимков.

В ходе предварительной обработки выполняется несколько операций.

Первая операция – некогерентное накопление (multilooking). Эта операция подразумевает усреднение изображения путем суммирования соседних отсчетов, способствующее уменьшению спекл-шума. При этом

также понижается разрешение исходного снимка для большей скорости обработки. Процедура выполняется с помощью команды *Multilooking* из меню *Radar*.

В параметрах обработки в графах Number of Range Looks и Number of Azimuth Looks необходимо указать 3 (рис. 18).

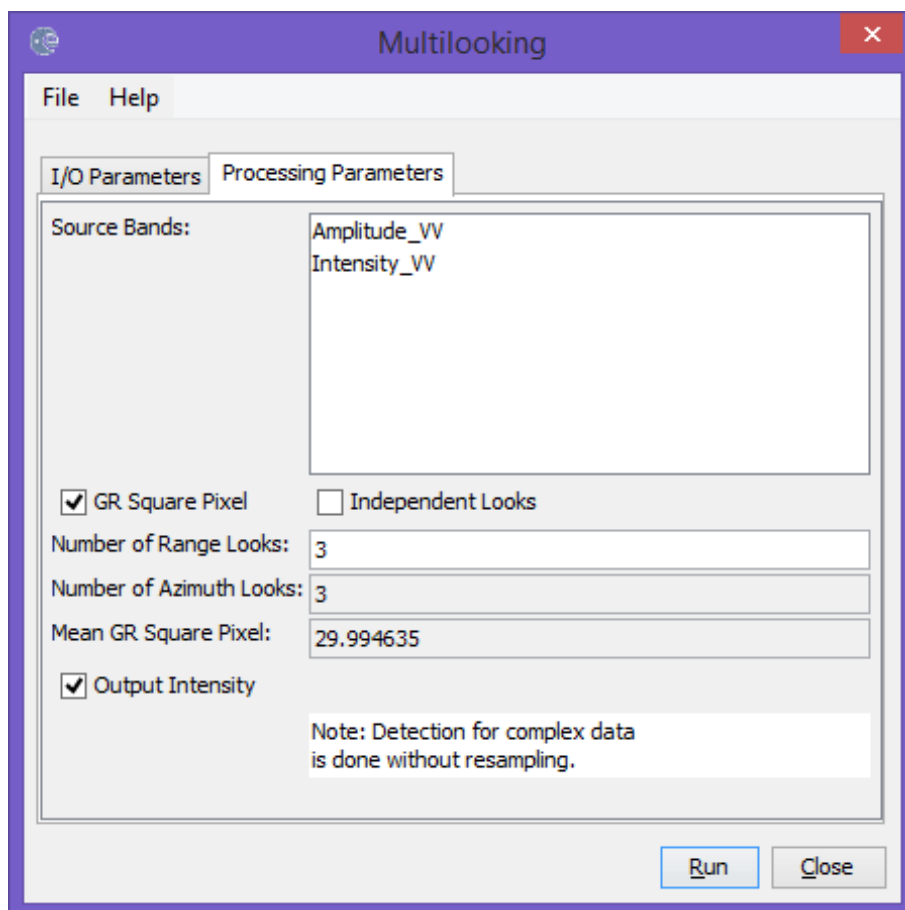


Рис. 18. Параметры Multilooking

Далее выполняется радиометрическая калибровка с помощью команды *Calibrate* из меню *Radar – Radiometric*.

3. Произвести исправление геометрических искажений с помощью цифровой модели рельефа SRTM.

Исправление геометрических искажений выполняется трансформированием снимка (устранение геометрических искажений, вызванных рельефом) и переводом в заданную картографическую проекцию. Для этого

применяется команда *Radar – Geometric – Terrain Correction – Range-Doppler Terrain Correction* (рис. 19).

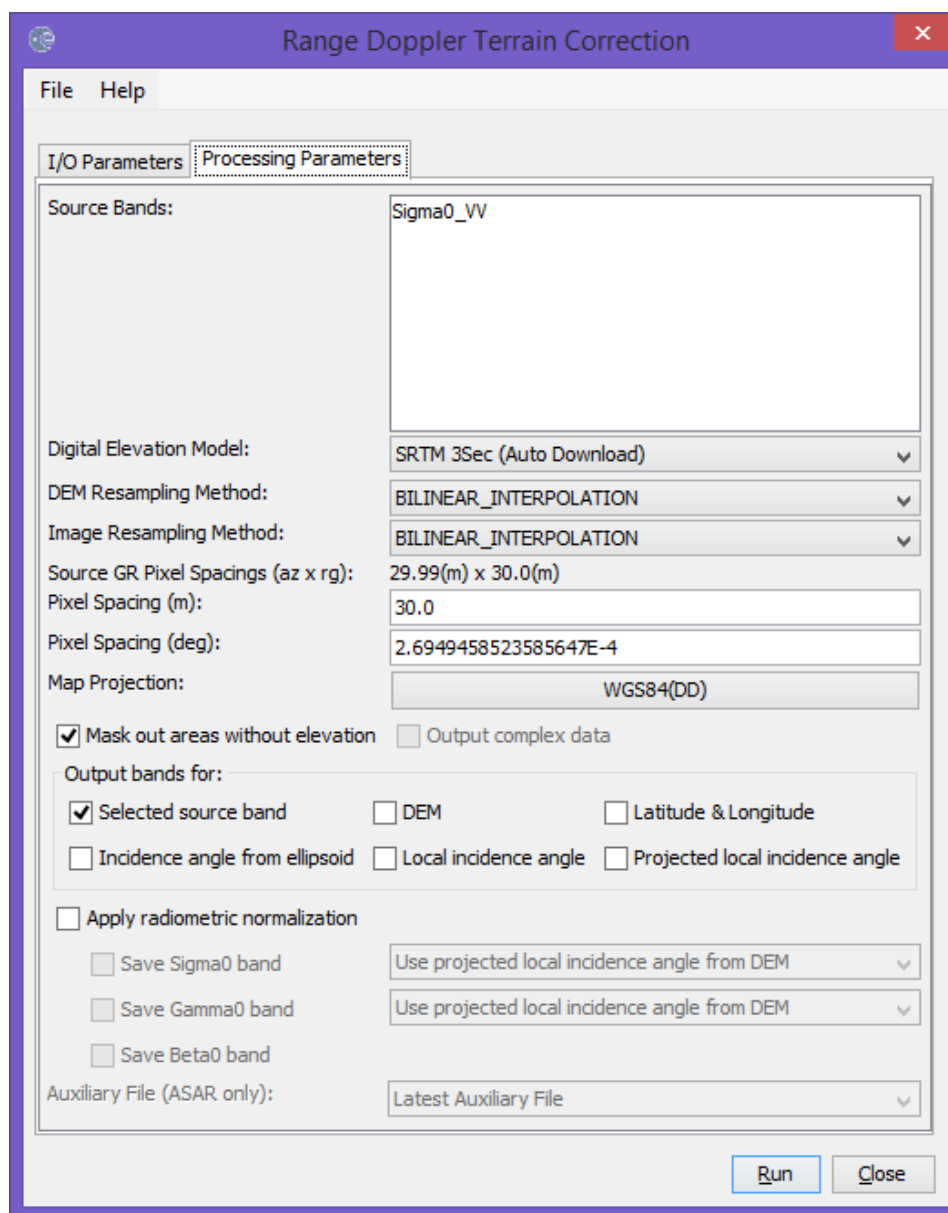


Рис. 19. Параметры Range-Doppler Terrain Correction

Далее выполняется преобразование значений амплитуды радиосигнала в децибелы (дБ): в окне *Product Explorer*, из контекстного меню выбрать команду *Linear to/from dB*. Затем для преобразованного диапазона также из контекстного меню выполнить команду *Convert Band*, чтобы сохранить виртуальный канал. Повторить процедуру для другого снимка.

После преобразования гистограмма будет соответствовать нормальному закону распределения. Далее работа осуществляется только с данными в дБ-диапазонах (*Sigma0_VV_db*) (рис. 20).

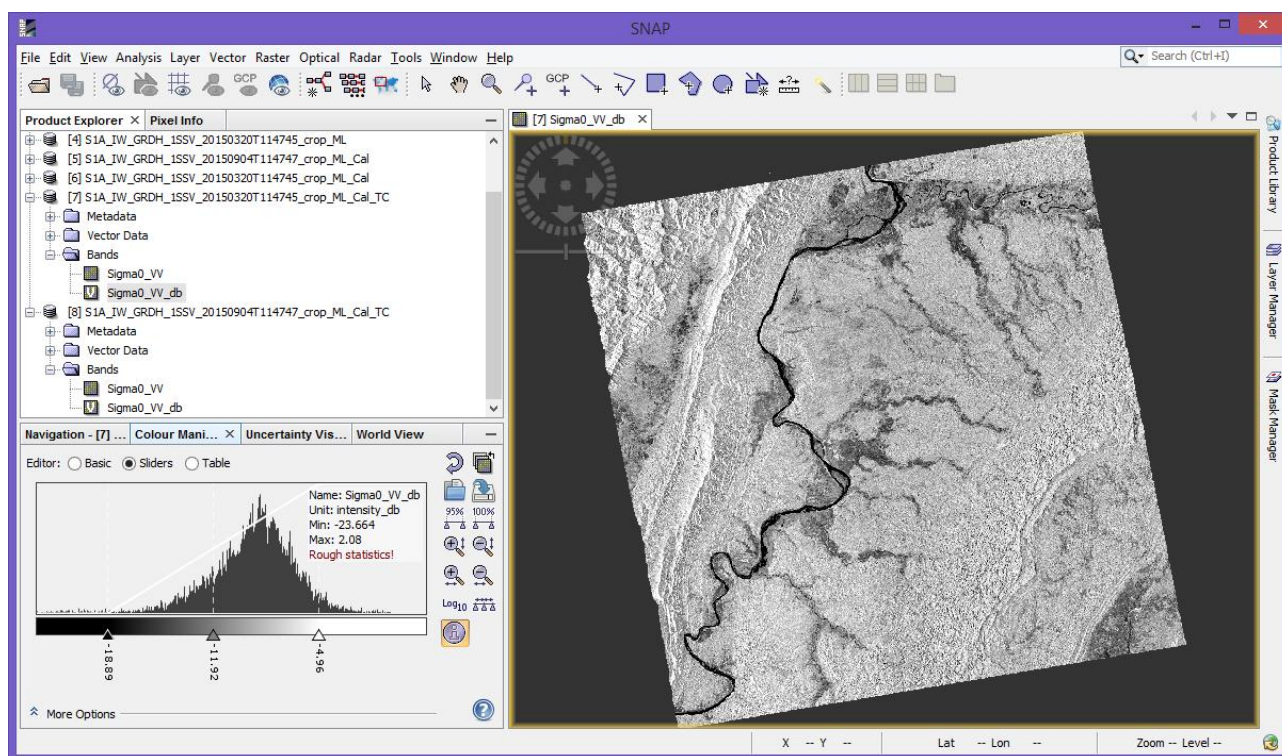


Рис. 20. Результат преобразования гистограммы

4. Объединить снимки в псевдоцветное композитное изображение (рис. 21) для того, чтобы выделить водную поверхность и зоны затопления.

Для объединения снимков необходимо выполнить команду *Radar – Coregistration – Stack Tools – Create Stack*. Объединение снимков в псевдоцветное композитное изображение выполняется с помощью команды *Window – Open RGB image window*.

В окне выбора каналов в качестве красного используется слой с изображением, полученным после разлива, а в качестве зеленого и синего – слой до разлива.

На итоговом RGB-снимке зоны затопления будут выделены красным цветом. До затопления они были сухими, и их отражающая способность была выше. После затопления отражающая способность снизилась.

Поэтому значения red-канала в этих зонах преобладают над остальными каналами.

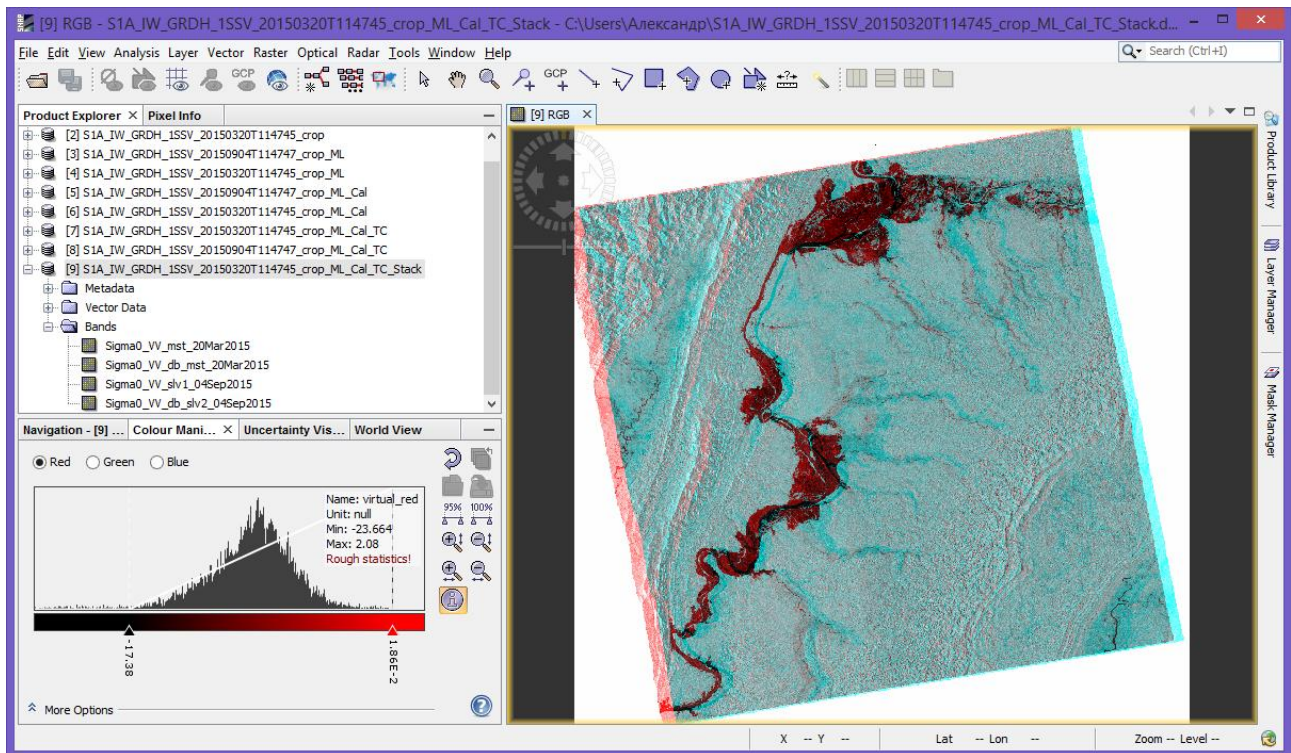


Рис. 21. Композитное изображение

Контрольные вопросы

1. Какие форматы данных могут быть использованы для работы с радиолокационными снимками?
2. Перечислите основные этапы предварительной обработки радиолокационных снимков.
3. Что такое некогерентное накопление?
4. В чем заключается эффект перспективного сокращения?
5. Как проявляется эффект отрицательного сокращения?
6. Каково влияние эффекта радарной тени?
7. Какие модели рельефа могут использоваться для коррекции снимков?

2.2. Лабораторная работа № 2

Поляриметрическая обработка радиолокационных снимков

Цель работы: поляриметрическая обработка радиолокационного снимка и последующая классификация.

Использование радарных снимков, сделанных одновременно в двух и более поляризационных режимах, позволяет классифицировать различные типы отражающей поверхностей за счет создания цветных композитных радарных изображений.

Используемое оборудование, материалы и программное обеспечение:

- 1) персональный компьютер;
- 2) программное обеспечение ESA SNAP Toolbox;
- 3) радиолокационный снимок, полученный в виде полно-поляризованной матрицы.

Задачи работы:

- 1) закрепить пройденный материал, посвященный поляризации радиоволн и их взаимодействию с различными объектами;
- 2) изучить методику классификации результатов поляриметрической обработки.

Порядок выполнения работы

1. Выполнить загрузку исходных данных в программу SNAP (рис. 22).

Используя кнопку *Open Product*, указать расположение Vancouver Fine Quad Frame 1 RADARSAT-2 product. Выбрать файл product.xml file и нажать *Open Product*. Для отображения каждого канала необходимо сделать двойной щелчок на канале Intensity. Используя *Zoom in* и перемещая изображения с помощью колеса мыши, найти территорию аэропорта. На рис. 22 показаны загруженные снимки в окне *Products View*, представленные четырьмя каналами в различных вариантах поляризации.

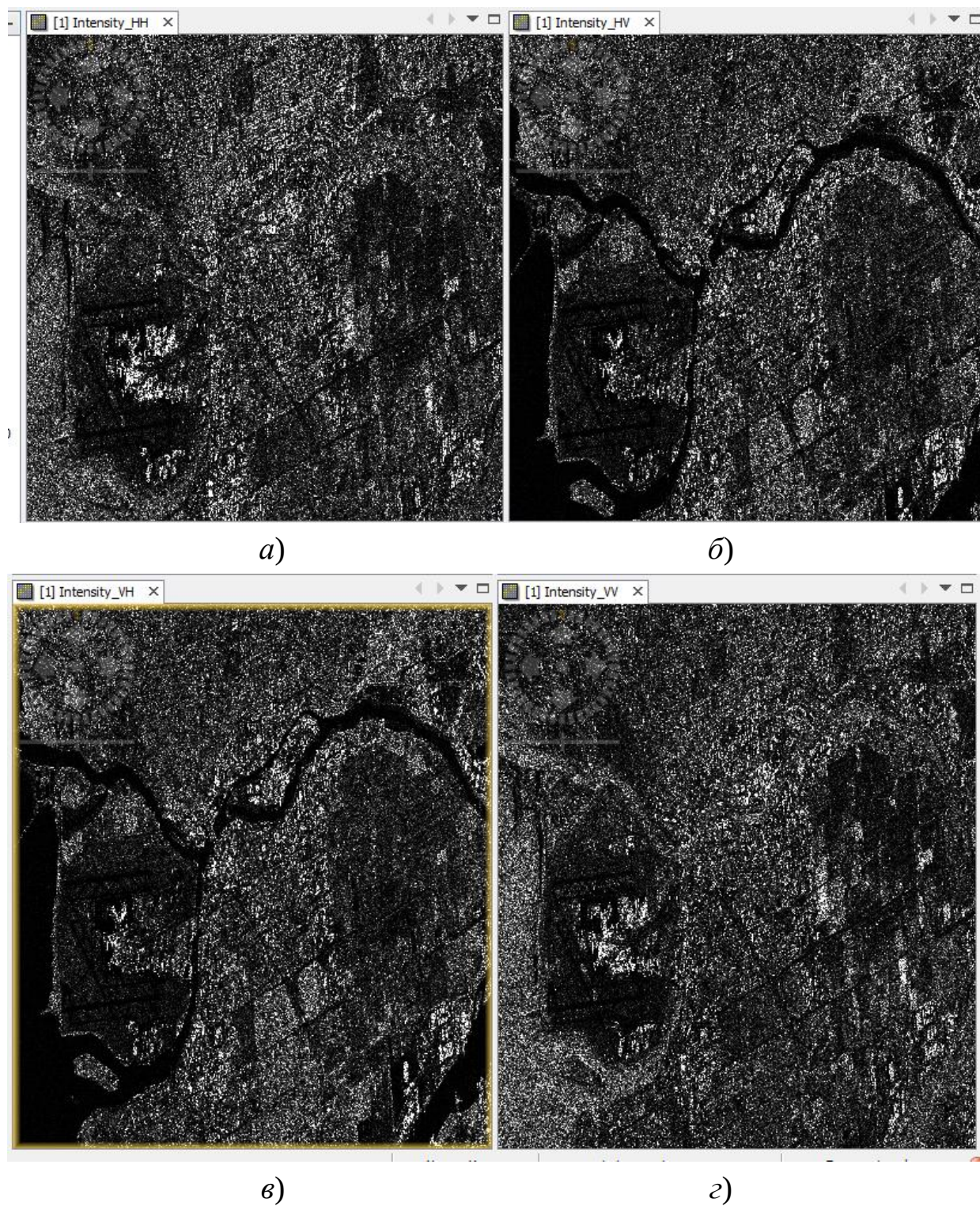


Рис. 22. Варианты поляризации исходного снимка:

а) HH; б) HV; в) VH; г) VV

Для уменьшения объема обрабатываемых данных можно создать набор конкретной территории. Выбрав требуемый участок и масштаб облас-

ти интереса щелчком правой кнопки мыши, выполнить из контекстного меню команду *Spatial Subset from View*.

Поскольку значения пикселей снимка должны корректно представлять отраженный от поверхности сигнал, необходима калибровка с помощью команды *Calibrate* из меню *Radar – Radiometric*. Тип входного продукта и необходимые меры коррекции в ходе процесса определялись программой автоматически. Результат калибровки показан на рис. 23.

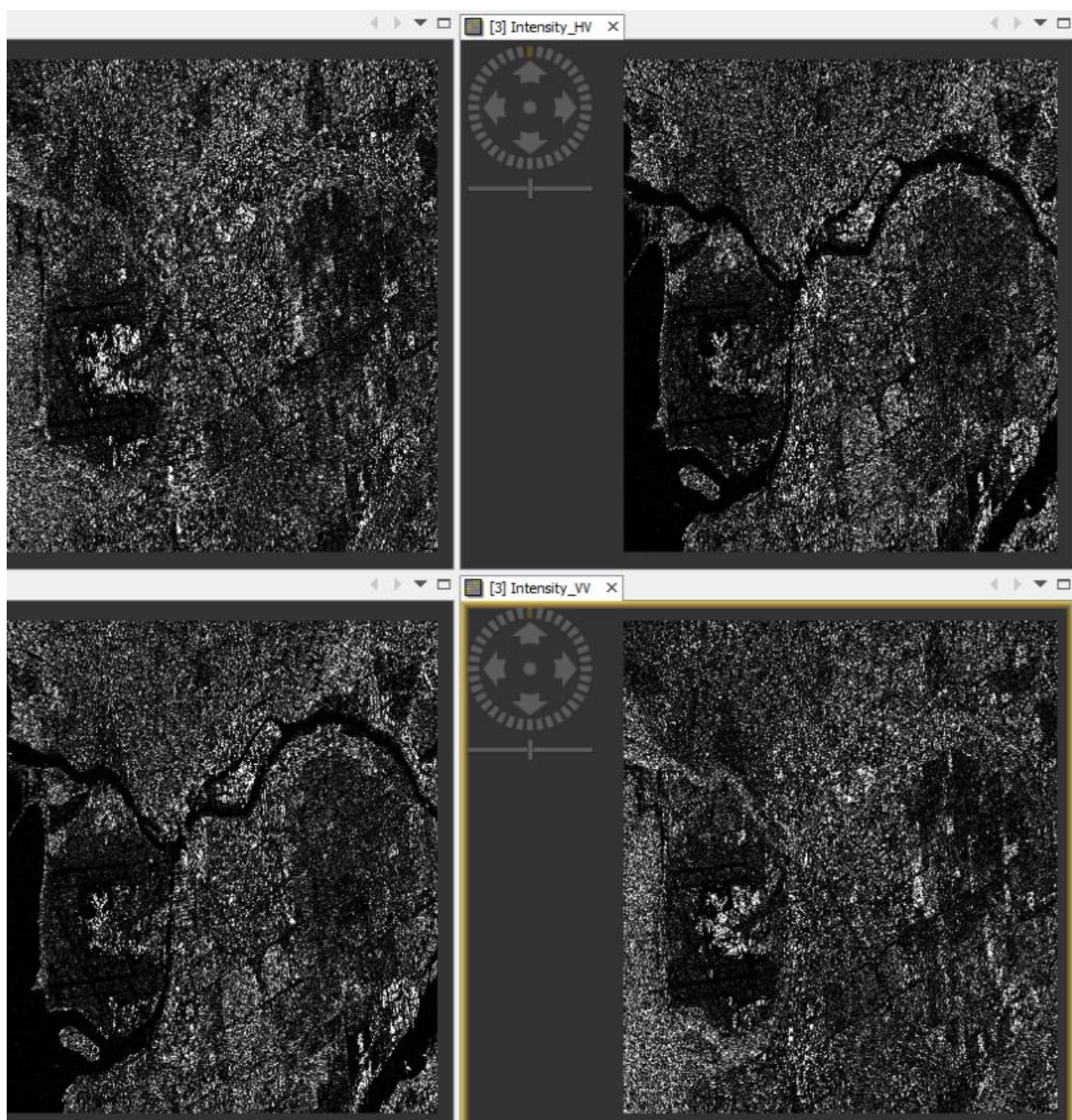


Рис. 23. Результат калибровки снимка

Для дальнейшей поляриметрической обработки продукта необходимо выполнить преобразование в ковариационную матрицу. Для этого создается набор данных, так как именно этот тип данных является входным для операции Polarimetric Matrix Generation (рис. 24).

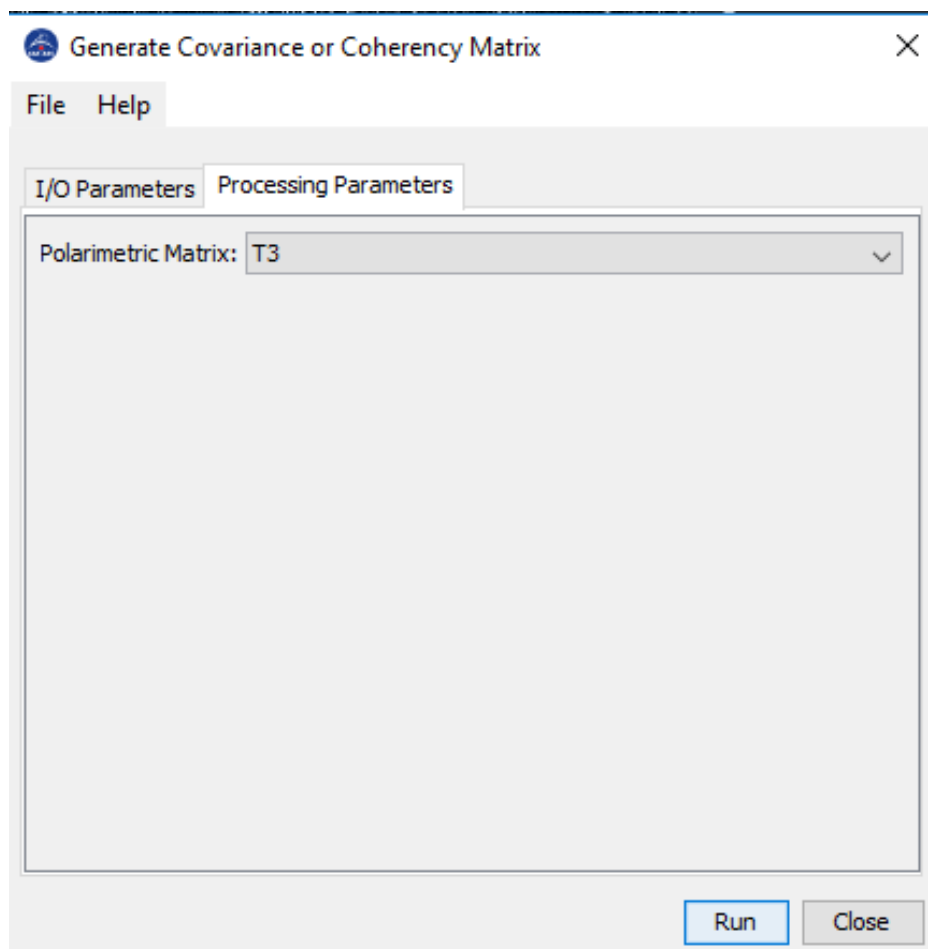


Рис. 24. Параметры Matrix Generation

В качестве ковариационной матрицы выбрать матрицу T3, элементами которой являются новые каналы, полученные при обработке. Выбор ковариационной матрицы T3 является предпочтительным, потому что ее элементы имеют физическую интерпретацию (odd-bounce, even-bounce, diffuse и т. д.). Результат преобразования показан на рис. 25.

Следующим шагом является удаление спекл-шума на изображении с помощью фильтрации.

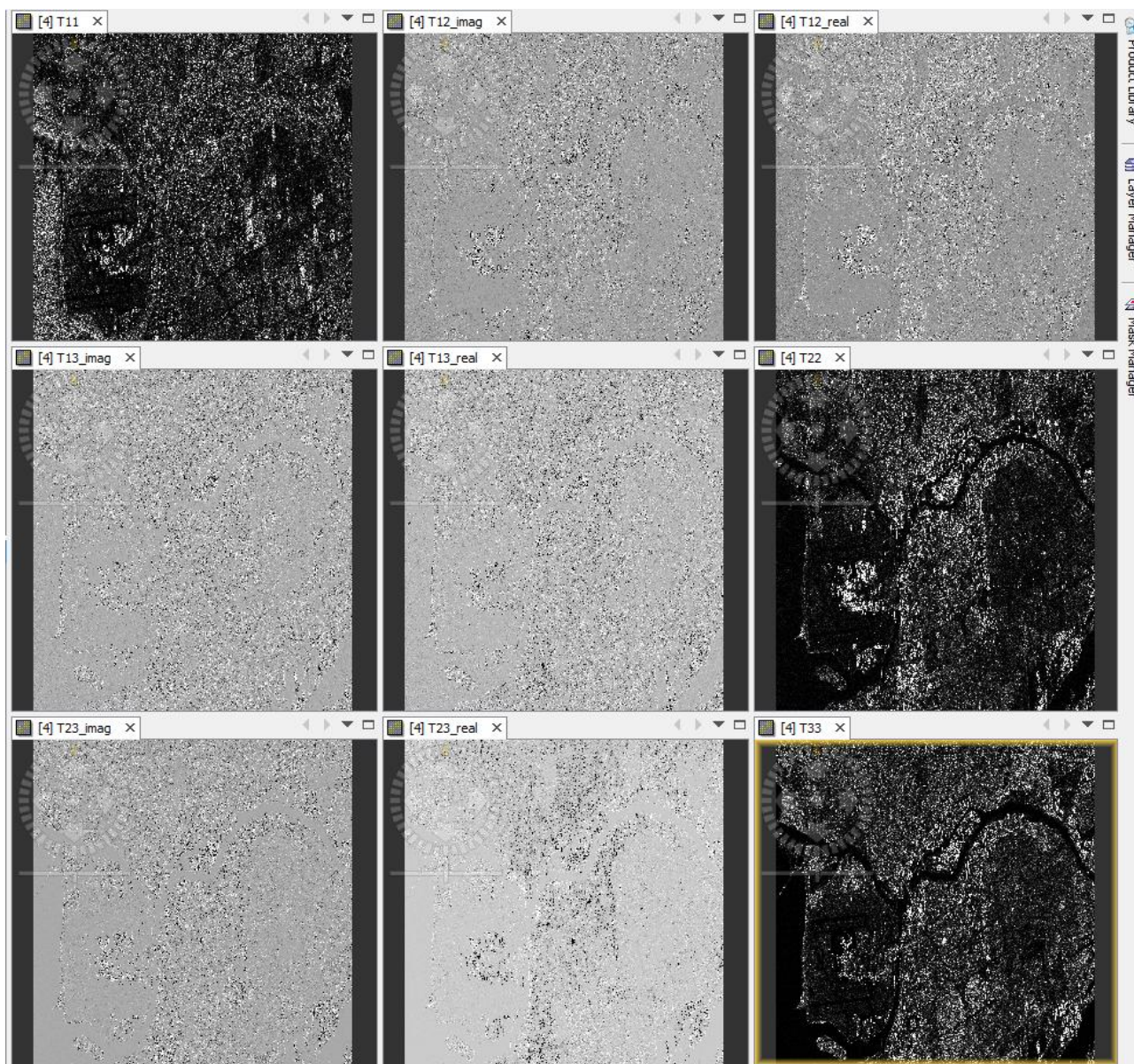


Рис. 25. Ковариационная матрица T3

Для работы со снимками с одиночной поляризацией достаточно применять обобщенные спекл-фильтры из меню *SAR Processing*. Однако для данных с полной поляризацией существуют поляриметрические спекл-фильтры, которые используют преимущества всех каналов и сохраняют информацию в комплексном виде. В параметрах меню *Polarimetric Speckle Filter* в качестве спекл-фильтра выбрать *Refined Lee*, работу которого можно рассмотреть на примере элемента матрицы T11 (рис. 26).

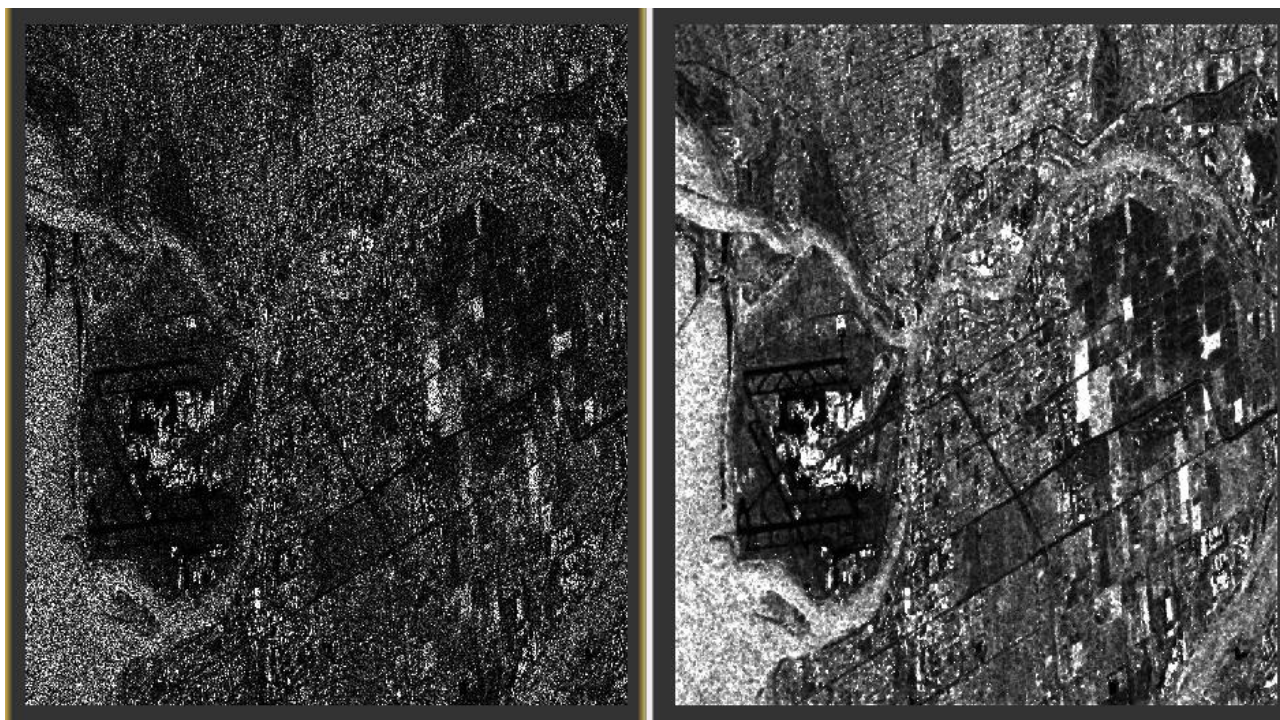


Рис. 26. Элемент T11 до и после фильтрации

Для получения информации о процессах рассеивания необходима поляриметрическая декомпозиция, т. е. выделение на основе суммарных сигналов, представленных на изображениях в разных поляризациях, участков, где преобладает определенный известный механизм отражения сигнала: однократное (плоскость), двойное (здания, вертикальные объекты, не меняющие поляризации) и объемное (растительный покров, меняющий поляризацию на противоположную).

В результате декомпозиции получают 3–4 новых изображения, где бóльшим или меньшим значением яркости закодированы физические свойства объектов местности. В качестве первого варианта обработки необходимо создать набор Freeman-Durden decomposition (рис. 27), состоящий из трех каналов.

Полученное цветное изображение показывает рассеивание сигнала поверхности в синем цвете от взлетно-посадочных полос аэропорта, дорог и водных поверхностей. Здания порождают эффект переотражения и показаны красным. Растительность создает объемное отражение, показана зеленым.

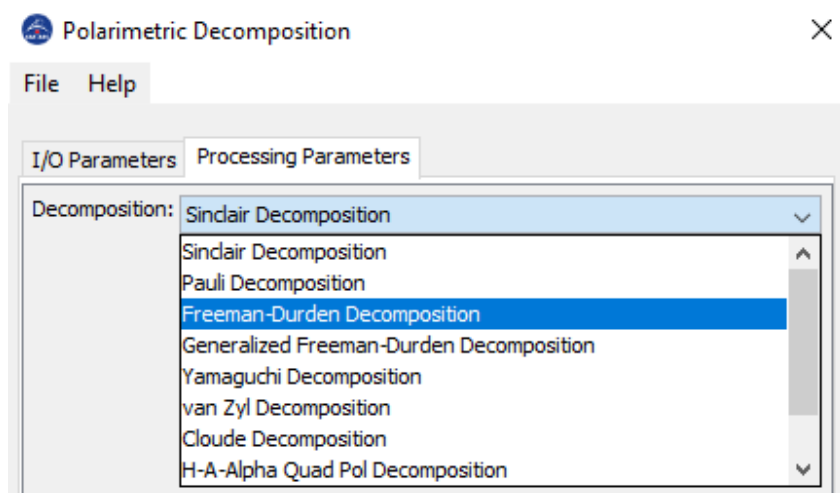


Рис. 27. Выбор метода декомпозиции

В ходе проведения операции необходимо сначала получить разложенное по слоям изображение (рис. 28), и лишь потом с помощью опции *Open RGB-Image Window* соединить их в единый результат (рис. 29).



Рис. 28. Поканальное представление снимка

Полученное цветное изображение показывает рассеивание сигнала поверхности. Синим цветом выделено отражение от промышленных объектов, дорог и водных поверхностей. Красным цветом на изображении показаны здания, зеленым – растительность. Стоит отметить, что здания по-

рождают эффект переотражения, так как создают угол с земной поверхностью, близкий к прямому.



Рис. 29. RGB-изображение после Freeman-Durden decomposition

Используя в качестве входного изображения ТЗ после фильтрации спекл-шумов, повторить обработку для всех остальных декомпозиций и сравнить результаты.

Для эксперимента были изучены и другие методы поляриметрической декомпозиции: Sinclair Decomposition, Pauli Decomposition, Yamaguchi Decomposition, Van Zyl Decomposition, Cloude Decomposition, H-A-Alpha Decomposition и Touzi Decomposition. Для каждого нового метода обработки входными данными являлась матрица ТЗ после фильтрации. Сравнить результаты можно, рассмотрев рис. 30.

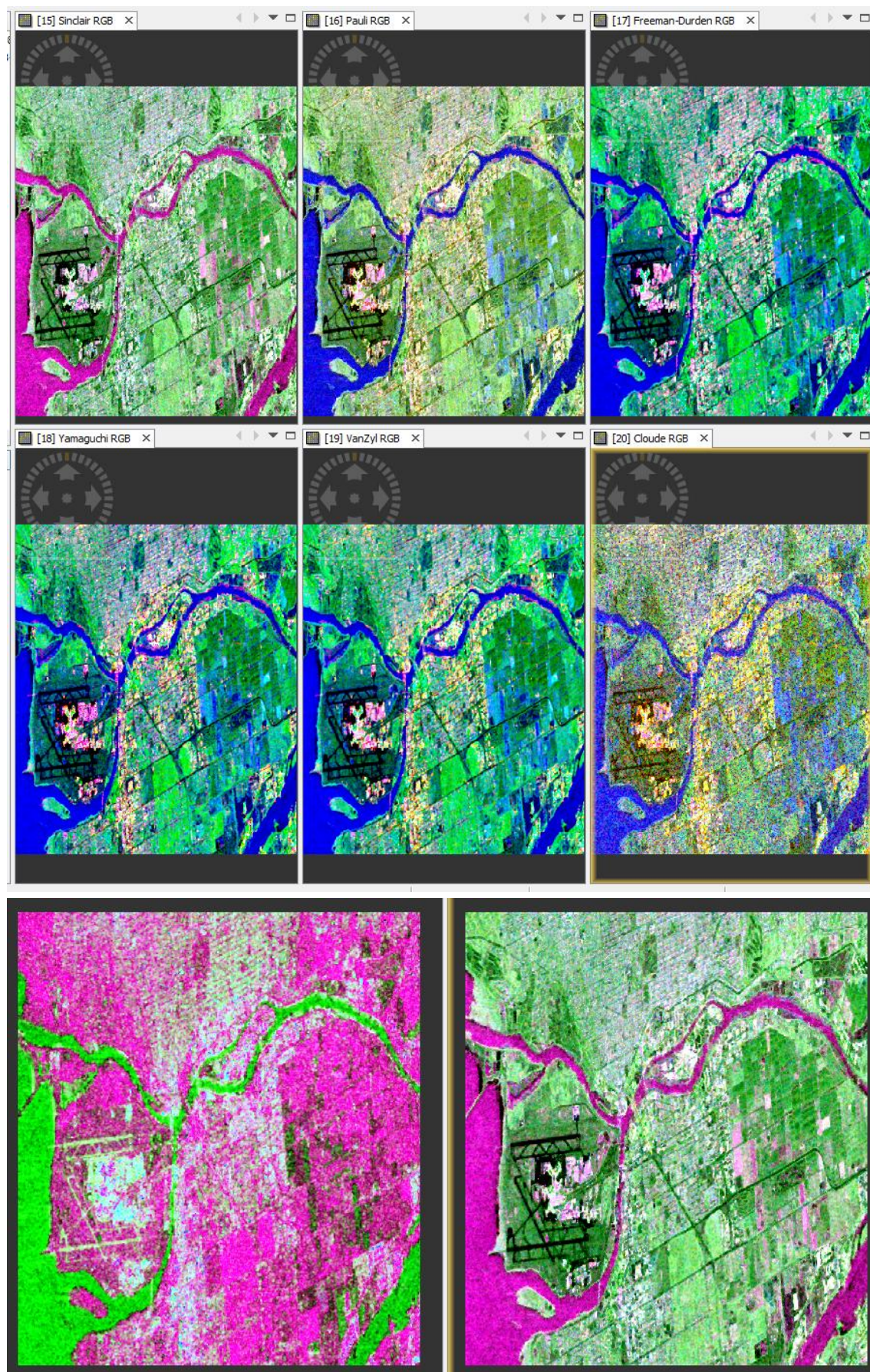


Рис. 30. RGB-результаты различных методов декомпозиции

Следующим инструментом поляриметрической обработки является неуправляемая классификация, объединяющая сходные пиксели в классы. В параметрах проведения данного автоматизированного процесса выбрать метод Unsupervised Wishart Classification (рис. 31).

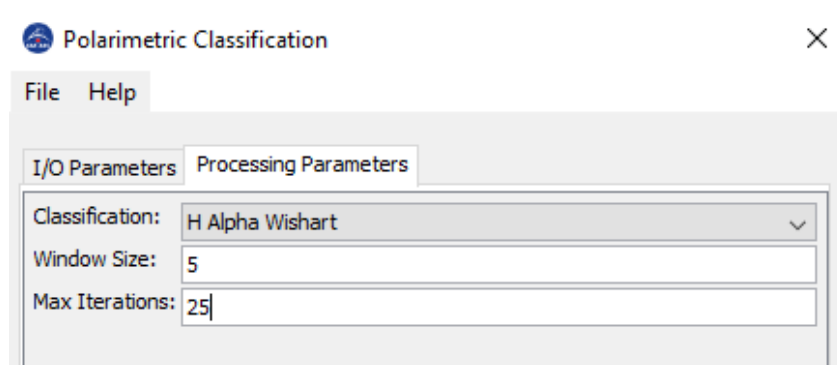


Рис. 31. Параметры неуправляемой классификации

После выполнения классификации изображение разделяется на 9 классов (рис. 32), среди которых достаточно хорошо выделяются водные объекты, дороги и территории сельскохозяйственной обработки.

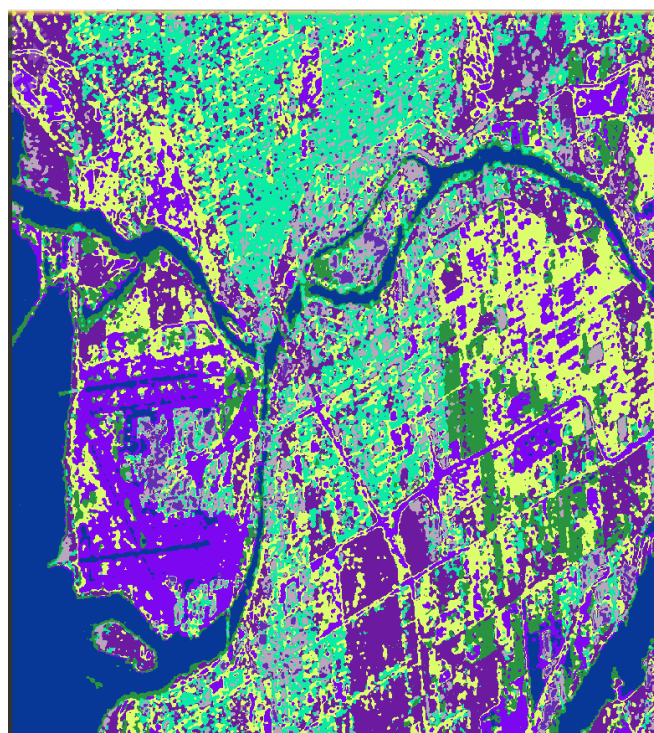


Рис. 32. Классифицированное изображение

Таким образом, созданная на основе полученной ранее классификации растровая карта выглядит следующим образом (рис. 33).

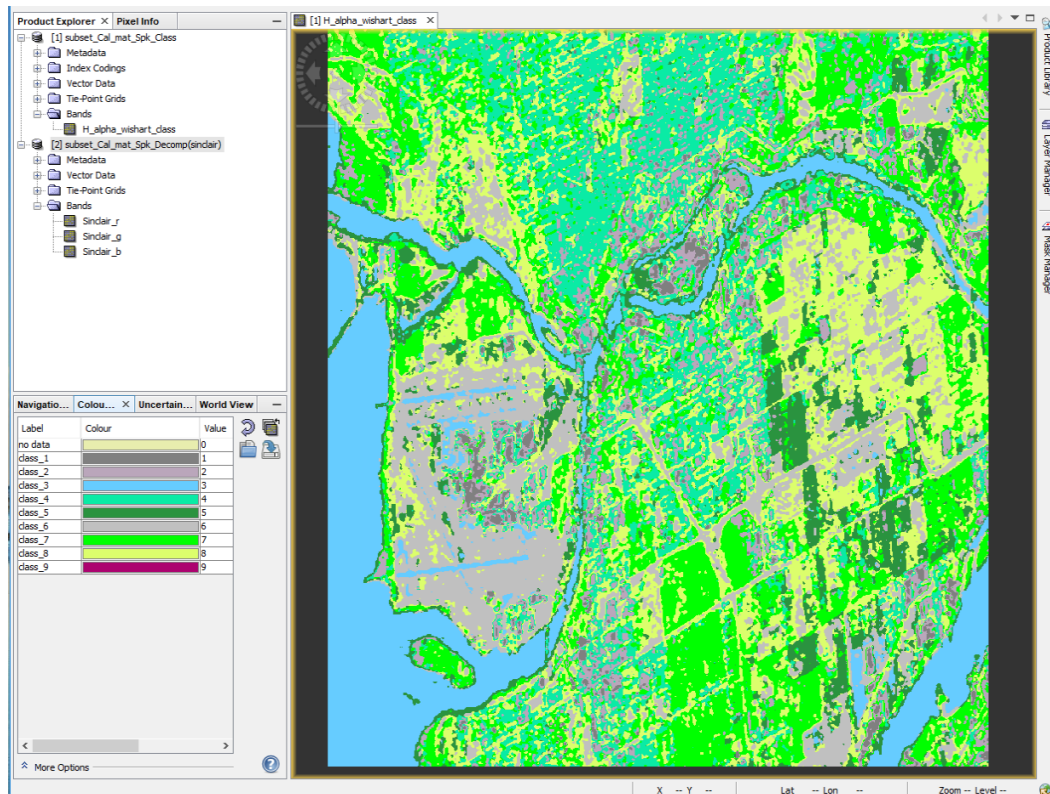


Рис. 33. Растровая карта

Контрольные вопросы

1. Что такое спекл-шум и почему он присутствует на изображениях РСА?
2. За счет чего происходит сглаживание спекл-шума при суммировании независимых радиолокационных изображений?
3. Каким образом можно получить независимые радиолокационные изображения?
4. Каким образом осуществляется локальная фильтрация в режиме «скользящего окна»?
5. Какова основная особенность, присущая всем адаптивным алгоритмам фильтрации?
6. Как работает медианный фильтр?
7. Каким образом можно оценить спекл-шум на изображении?

2.3. Лабораторная работа № 3

Создание цифровой модели рельефа по материалам радиолокационной съемки

Цель работы: создание цифровой модели рельефа путем интерферометрической обработки радиолокационных снимков.

Используемое оборудование, материалы и программное обеспечение:

- 1) персональный компьютер;
- 2) программное обеспечение ESA SNAP Toolbox;
- 3) пара снимков Sentinel-1, составляющих интерферометрическую пару.

Задачи работы:

- 1) закрепить пройденный материал, посвященный интерферометрической обработке радиолокационных снимков;
- 2) изучить методику интерферометрической обработки радиолокационных снимков.
- 3) выполнить оценку точности созданной цифровой модели рельефа

Порядок выполнения работы

В качестве исходных данных предоставлена интерферометрическая пара снимков, полученных с помощью спутника ERS-1. Съемка выполнена методом двухпроходной интерферометрии с одной орбиты на разные даты. Съемка охватывает территорию вулкана Этна, расположенного на восточном побережье Сицилии, и частично акваторию Ионического моря.

На рис. 34 показана исходная пара снимков.

В набор исходных данных уже включены точные эфемериды для спутника ERS.

Первым шагом обработки является совмещение изображений, в ходе которого происходит автоматический поиск связующих точек и трансформирование вспомогательного раstra (slave) в проекцию основного (master).

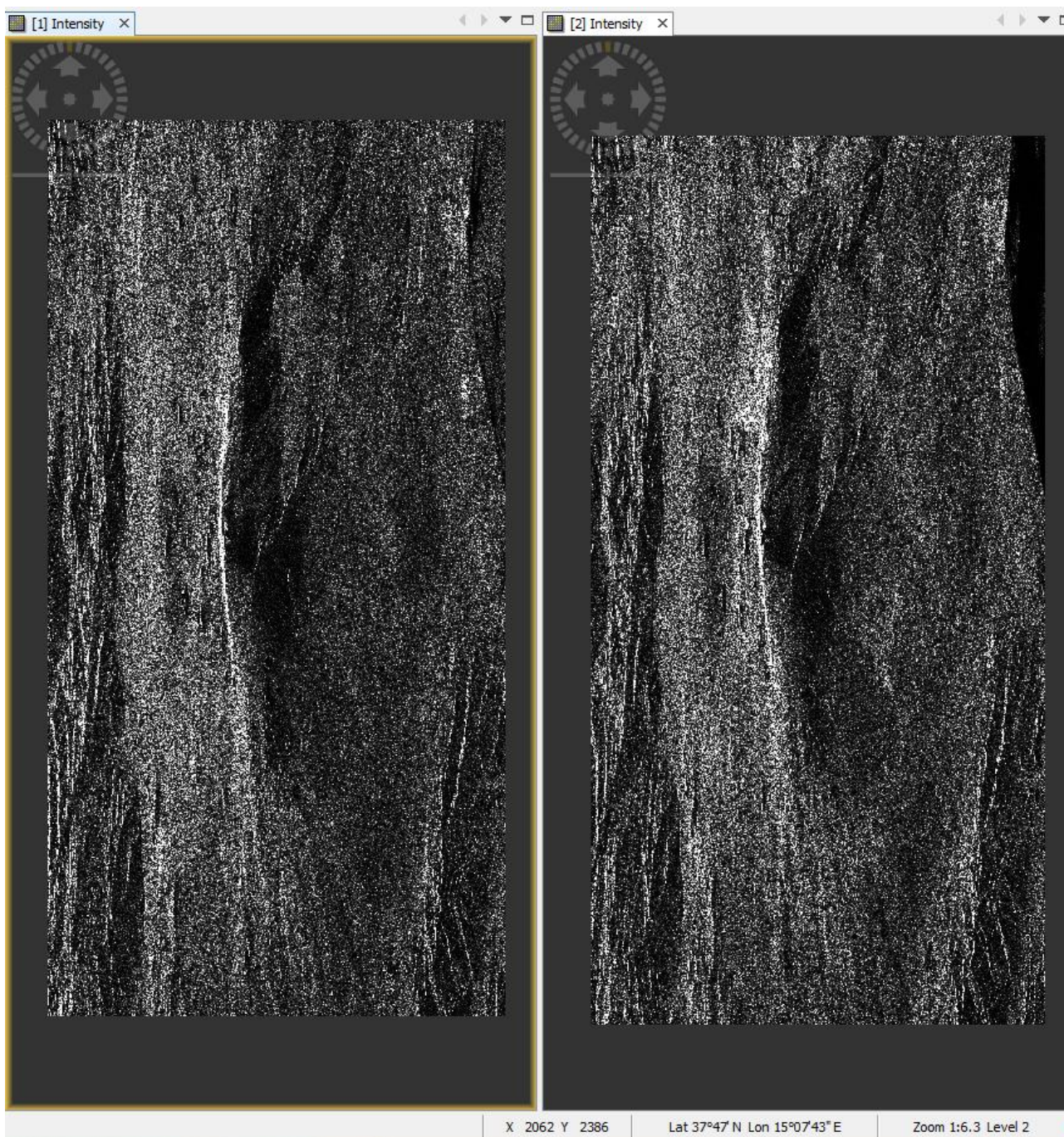


Рис. 34. Интерферометрическая пара снимков

Параметры, используемые при запуске процесса Coregistration, показаны на рис. 35.

Результат совмещения снимков представляет собой объединенный поканально набор данных, включающий два амплитудных изображения и два фазовых, которые совмещены с подпиксельной точностью.

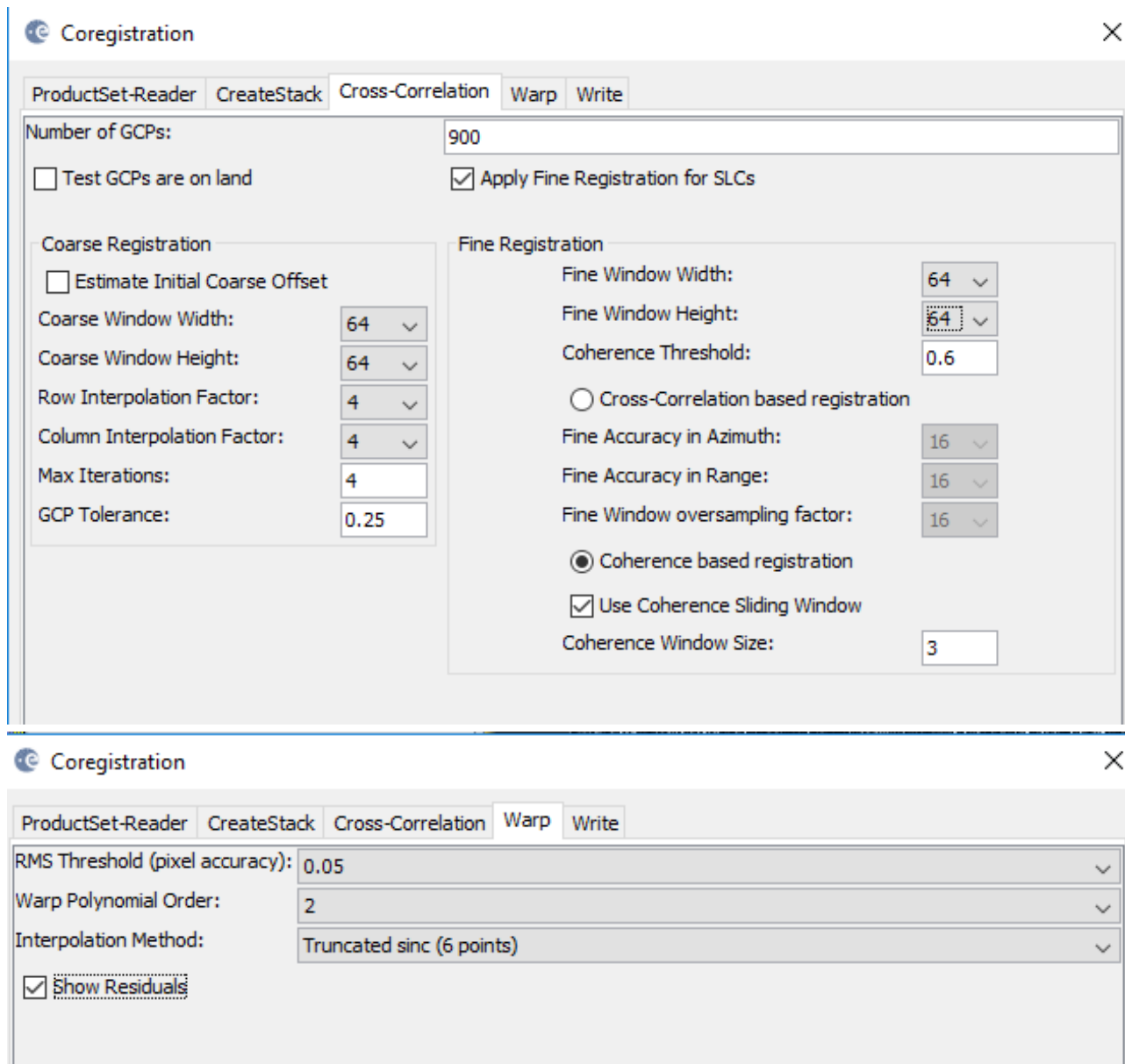


Рис. 35. Параметры совмещения снимков

На рис. 36 приведен результат трансформирования вспомогательного изображения.

Далее с помощью менеджера слоев (Layer Manager) необходимо отобразить результат автоматического поиска и измерения соответственных точек. Новый слой создается с помощью команды *GSP Movement Vector* из меню Tie-Point Grid.



Рис. 36. Результат совмещения снимков

На рис. 37 показан наложенный на снимки векторный слой, содержащий связи между ними (выделены красным цветом). Величина вектора показывает значение ошибки совмещения снимков, приведенной к заданному масштабу.

На данном этапе можно осуществить просмотр псевдоцветного композитного изображения.

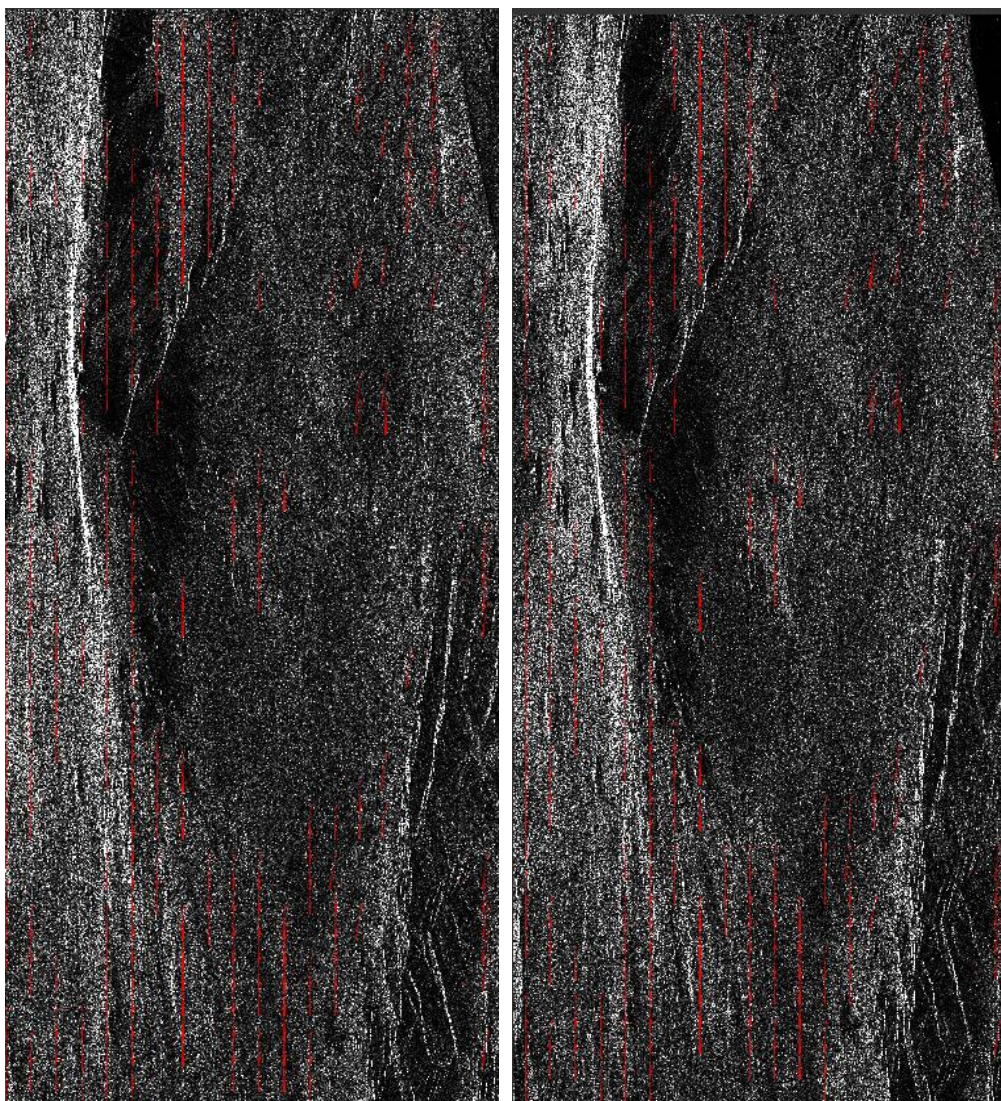


Рис. 37. Соответственные точки интерферометрической пары

Последовательность загрузки каналов показана на рис. 38, а результат – на рис. 39.

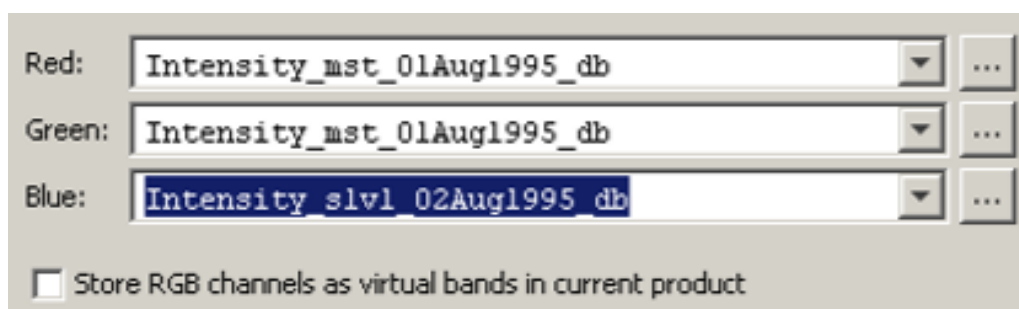


Рис. 38. Содержание каналов RGB-изображения



Рис. 39. Совмещение слоев в RGB-изображение

Следующим шагом является создание интерферограммы с помощью команды *Interferogram formation*. В результате на основе перемножения значений фазы совмещенных снимков возникает интерференционная картина, которая может быть представлена в виде градаций серого цвета или в виде цветовой палитры RGB. Результат создания интерферограммы показан на рис. 40.

Для создания ЦМР в дальнейшем потребуется предварительный расчет когерентности пары снимков, который выполняется с помощью функции *Coherence Estimation* (рис. 41). Результат представлен на рис. 42.

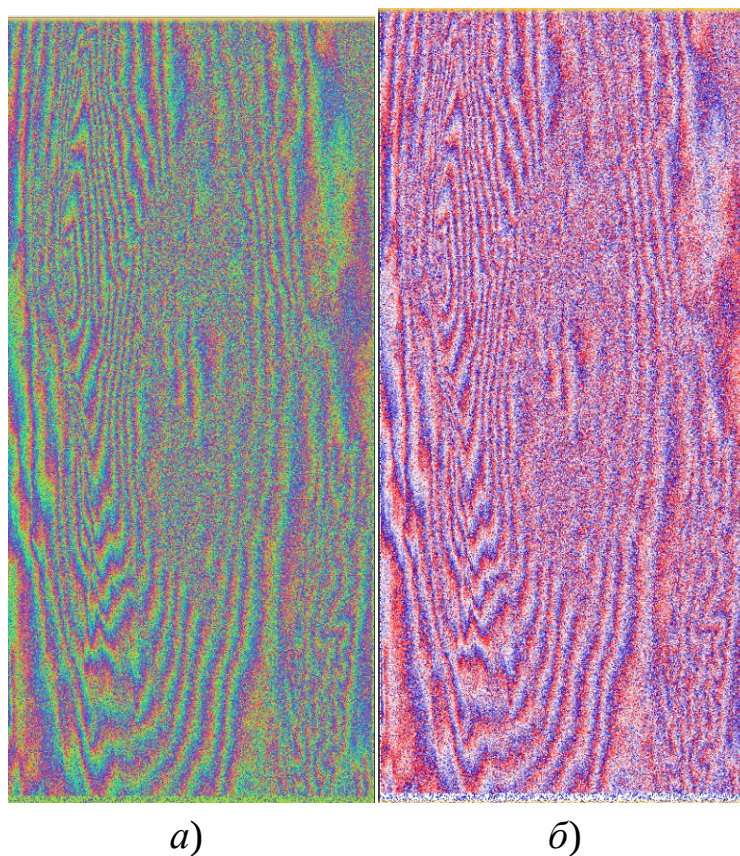


Рис. 40. Интерферограмма:

а) с исходной цветовой палитрой; б) с палитрой gradient-red-white-blue

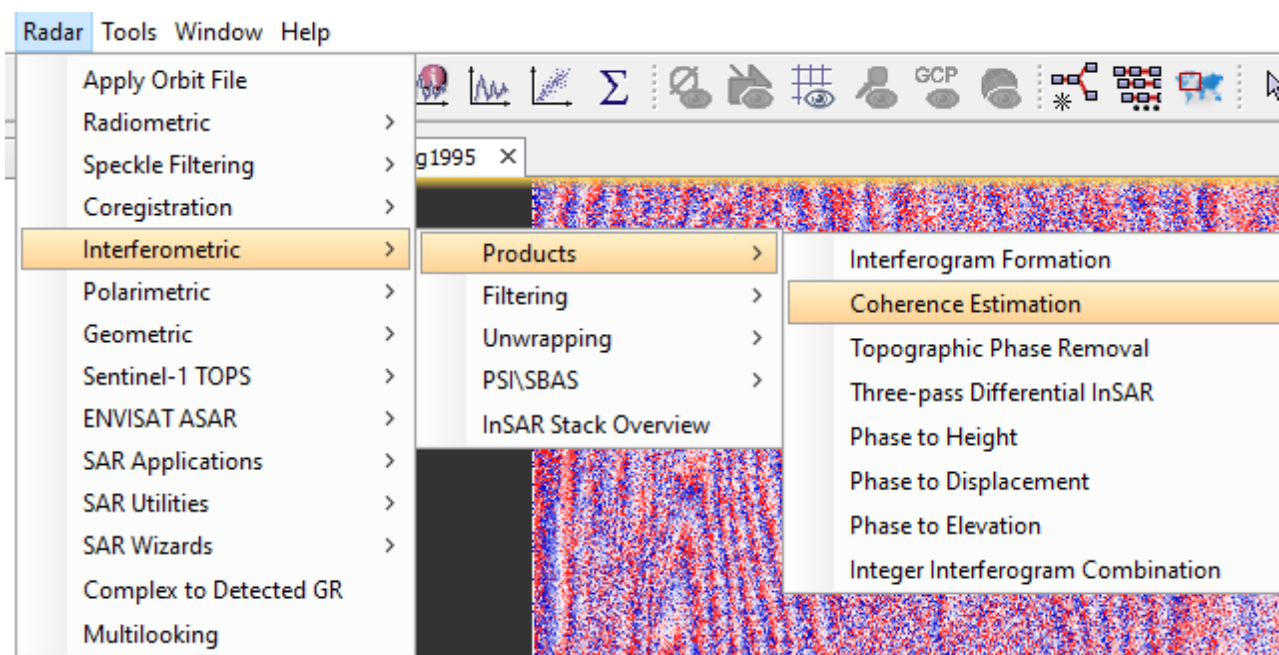


Рис. 41. Команда *Coherence Estimation*

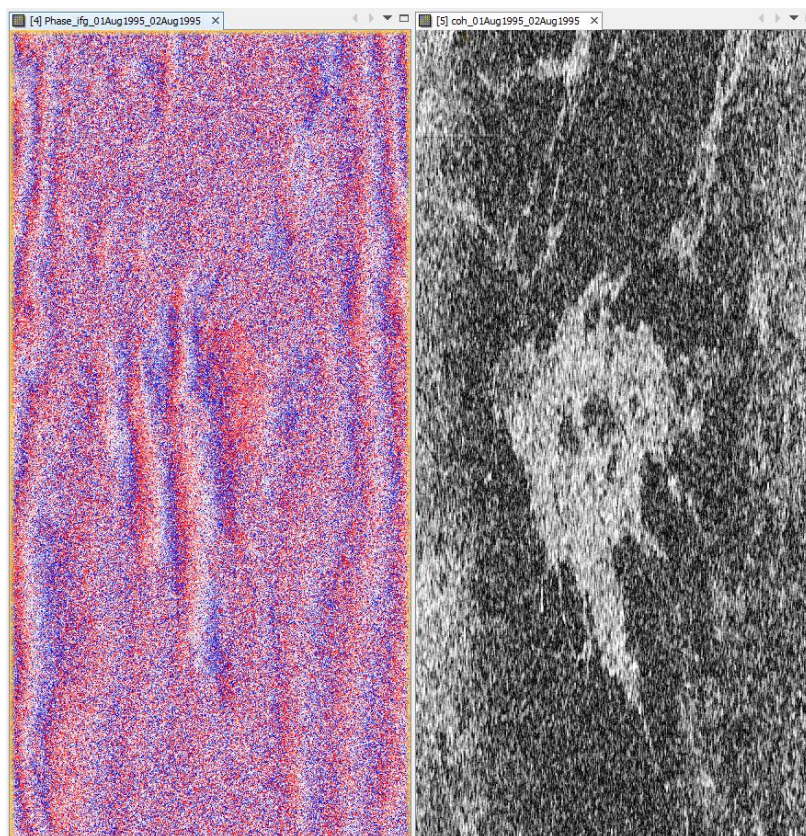


Рис. 42. Результат расчета когерентности для участка фазового слоя

Следующим шагом необходимо применить фазовый фильтр. Из доступных в ПО выбирается фильтр Голдстейна, параметры устанавливаются в соответствии с рис. 43.

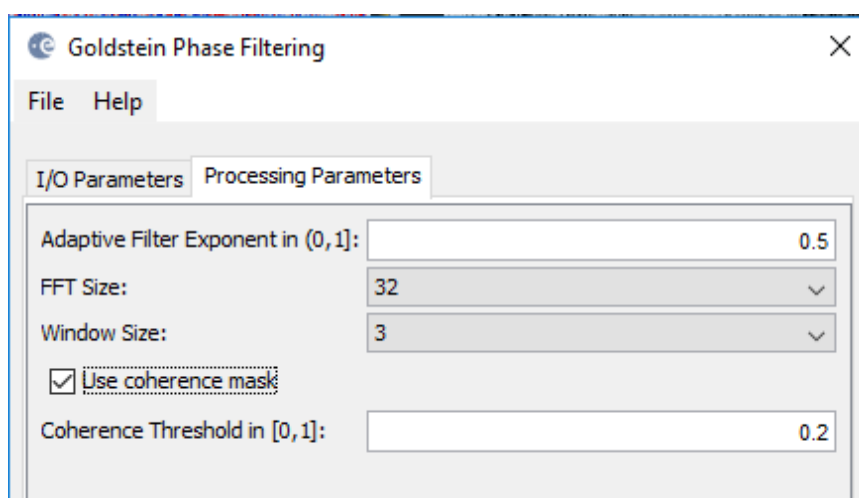
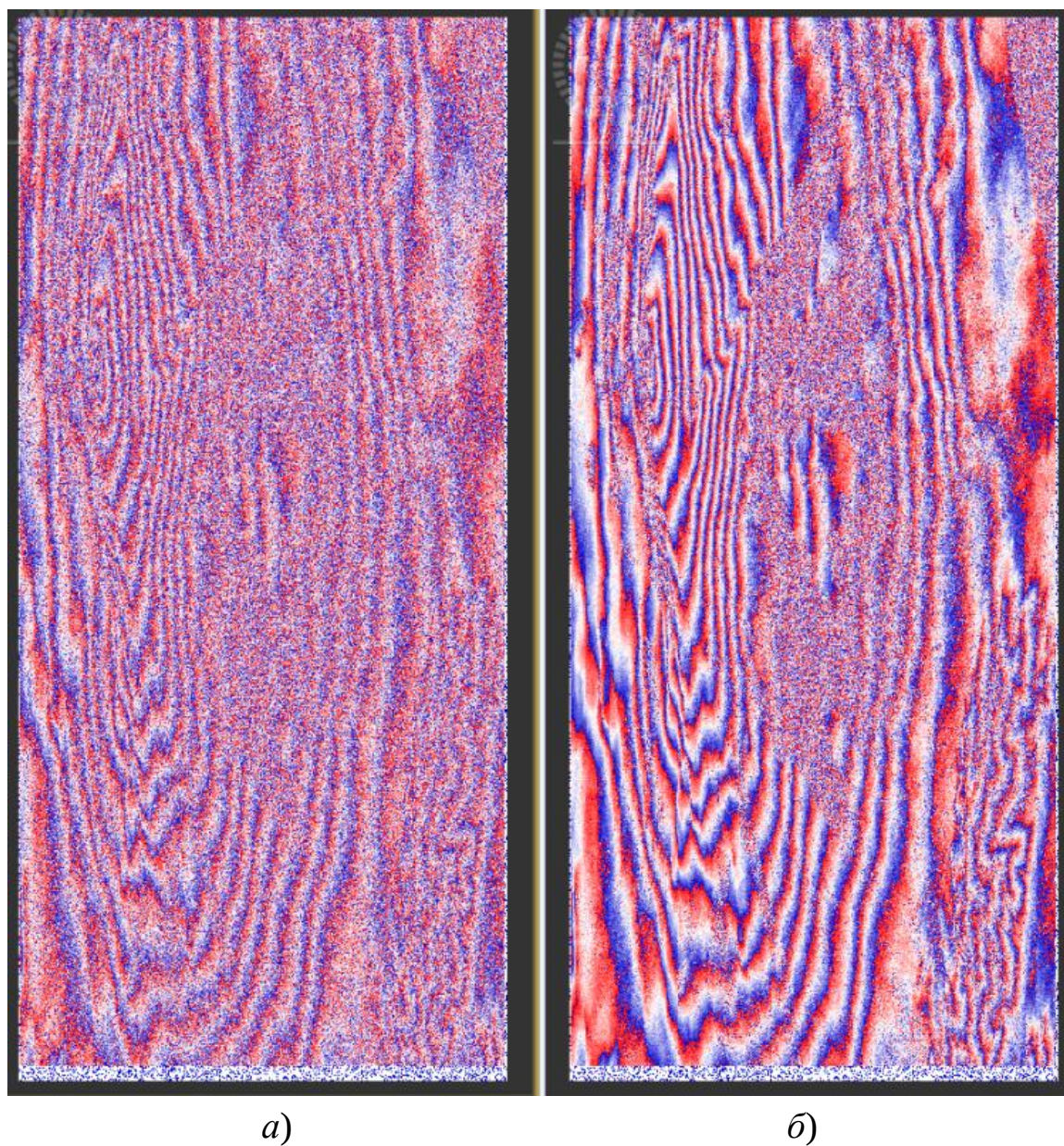


Рис. 43. Параметры фильтрации Голдстейна

При сравнении результатов до фильтрации и после нее, приведенных на рис. 44, можно сделать вывод о том, насколько сильно уменьшилось количество шумов.



а)

б)

Рис. 44. Интерферограмма:

а) до фильтрации; б) после фильтрации

Для целей визуализации выполняется операция *Multilooking*. На рис. 45 показано необходимое сочетание каналов.

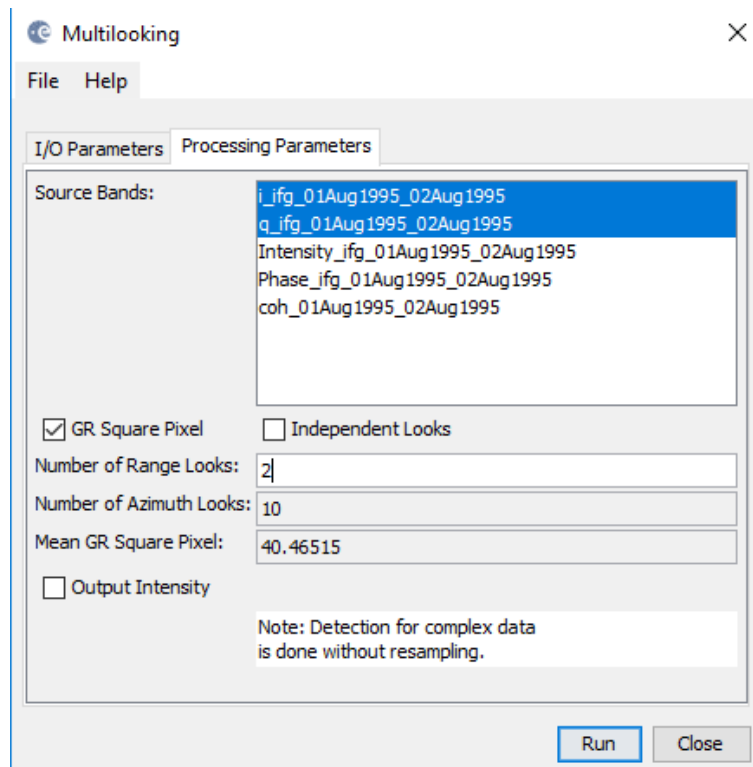


Рис. 45. Выбор слоев и указание диапазонов для операции *Multilooking*

На рис. 46 показан результат выполнения операции *Multilooking*, после которой значения пикселя по азимуту и по дальности становятся равными.

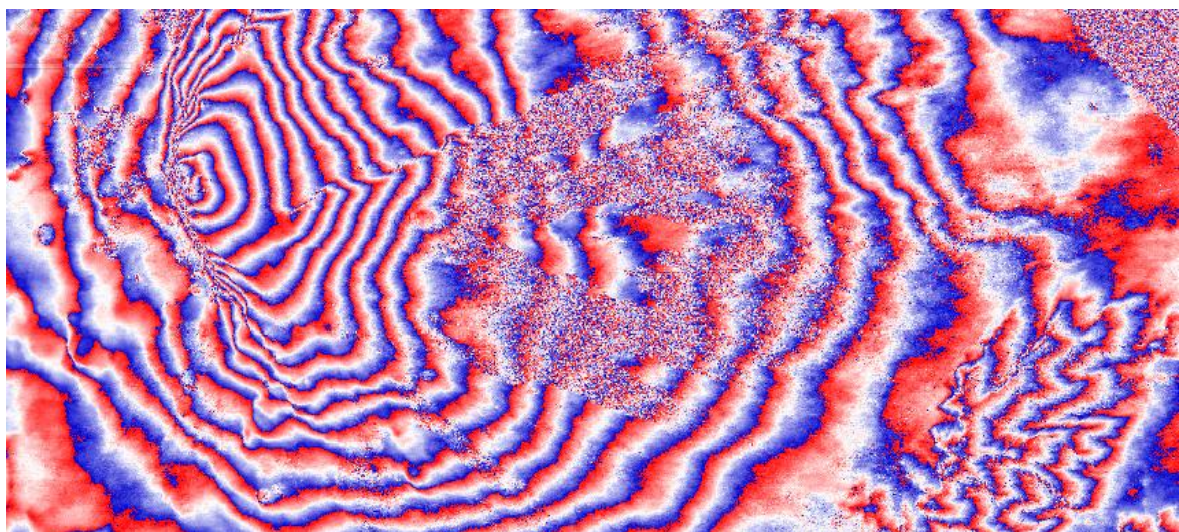


Рис. 46. Результат выполнения операции *Multilooking*

Далее необходимо применить операцию развертки фазы, т. е. устранить фазовую неоднозначность. Значения фазы известны с точностью до целого числа циклов, в действительности же данный показатель может выходить за эти пределы. Чтобы устранить эффект неоднозначности, необходимо использовать специальное ПО Snaphu.

Для создания файла с конфигурациями необходимо осуществить экспорт преобразованных материалов еще раз через Graph Builder. Цепочка команд представлена на рис. 47.

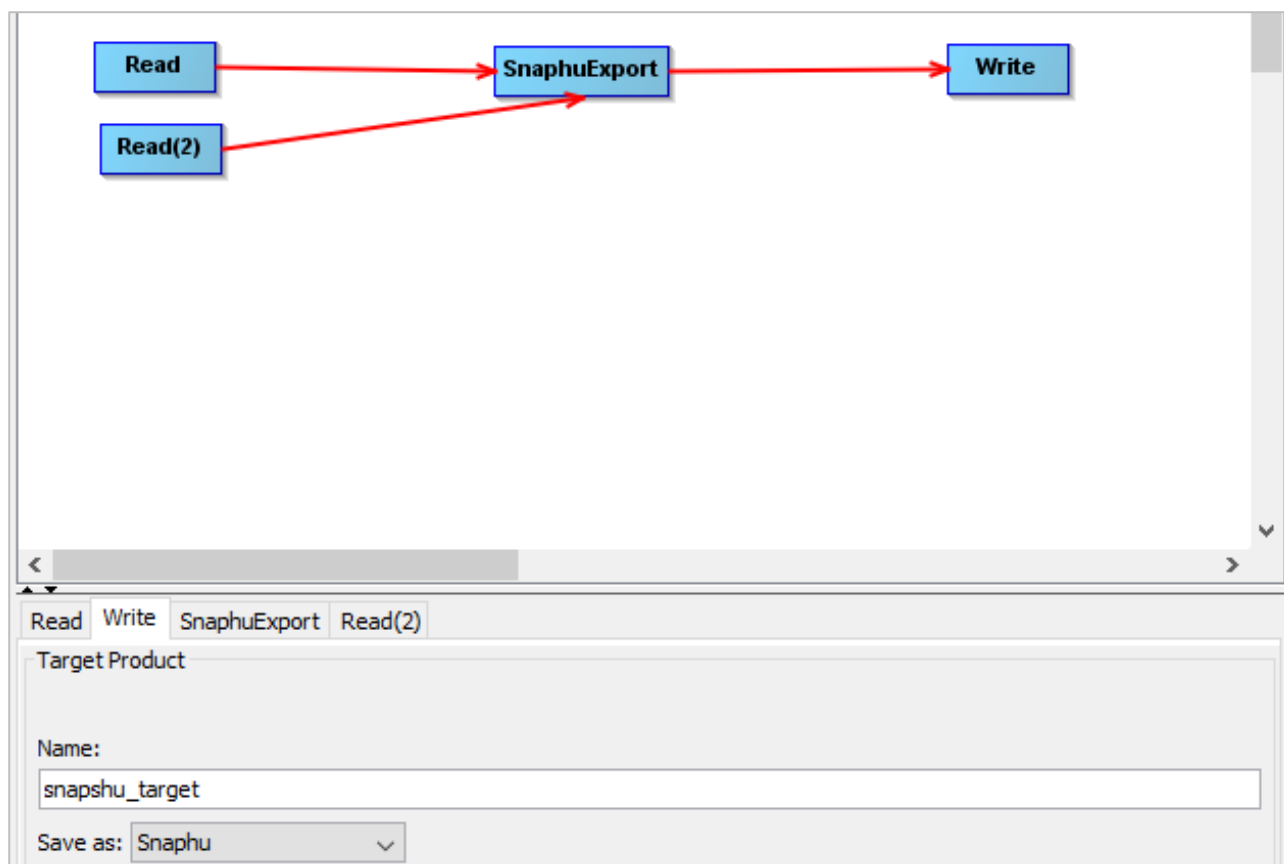


Рис. 47. Параметры вывода

Важно, чтобы файл конфигураций и все слои интерферограммы находились в одной директории, в ней же будет создаваться и файл с разверткой фазы. Нужно открыть файл конфигураций, скопировать в командную строку команду, приведенную в файле конфигурации. Данная команда содержит ссылку на входной файл и запускает процесс развертки фазы (рис. 48).

```
usr/tmp
Flow increment: 3 (Total improvements: 8454)
207 incremental costs clipped to avoid overflow (0.007%)
Treesize: 9761 Pivots: 18 Improvements: 1
Flow increment: 4 (Total improvements: 8455)
206 incremental costs clipped to avoid overflow (0.007%)
Treesize: 9761 Pivots: 3 Improvements: 0
Flow increment: 1 (Total improvements: 8455)
204 incremental costs clipped to avoid overflow (0.007%)
Treesize: 9761 Pivots: 2380 Improvements: 106
Flow increment: 2 (Total improvements: 8561)
207 incremental costs clipped to avoid overflow (0.007%)
Treesize: 9761 Pivots: 179 Improvements: 0
Flow increment: 3 (Total improvements: 8561)
207 incremental costs clipped to avoid overflow (0.007%)
Treesize: 9761 Pivots: 18 Improvements: 1
Flow increment: 4 (Total improvements: 8562)
206 incremental costs clipped to avoid overflow (0.007%)
Treesize: 9761 Pivots: 3 Improvements: 0
Flow increment: 1 (Total improvements: 8562)
204 incremental costs clipped to avoid overflow (0.007%)
Treesize: 9761 Pivots: 2380 Improvements: 106
Unexpected increase in total cost. Breaking loop
Integrating secondary flows
Output written to file UnwPhase_ifg_01Aug1995_02Aug1995.snaphu.img
Program snaphu done
Elapsed processor time: 0:01:54.42
Elapsed wall clock time: 0:00:53
studentf@340-2 /usr/tmp
$
```

Рис. 48. Процесс развертки фазы

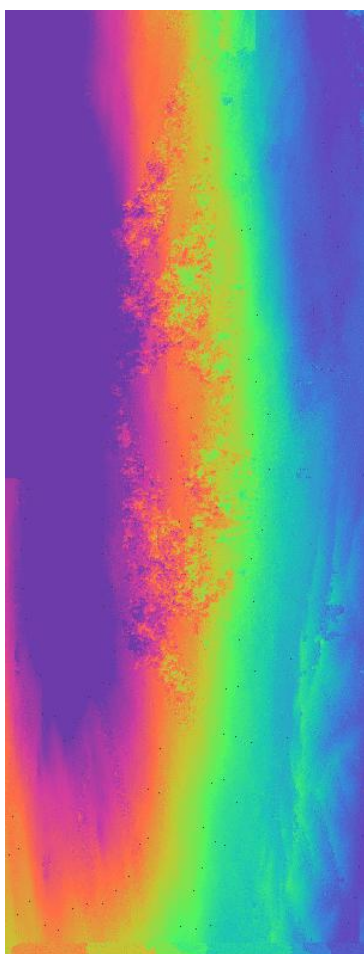


Рис. 49. Результат развертки фазы

В результате путем добавления и вычитания кратного числа циклов в автоматическом режиме устраняется неоднозначность. Результат импорта фазового слоя после развертки показан на рис. 49.

С помощью опции *Phase to height* (параметры на рис. 50) выполняется пересчет значений фазы в значения высоты ЦМР.

Таким образом, файл, значения пикселей которого преобразованы из абсолютных значений фазы в смещения в линейной мере, принимает вид, представленный на рис. 51. Рядом даны расшифровка цветовой схемы, а также гистограмма изображения, по которой легко можно определить среднюю высоту местности.

Number of estimation points:	200
Number of height samples:	3
Degree of 1D polynomial:	2
Degree of 2D polynomial:	5
Orbit interpolation degree:	3

Рис. 50. Пересчет *Phase to height*

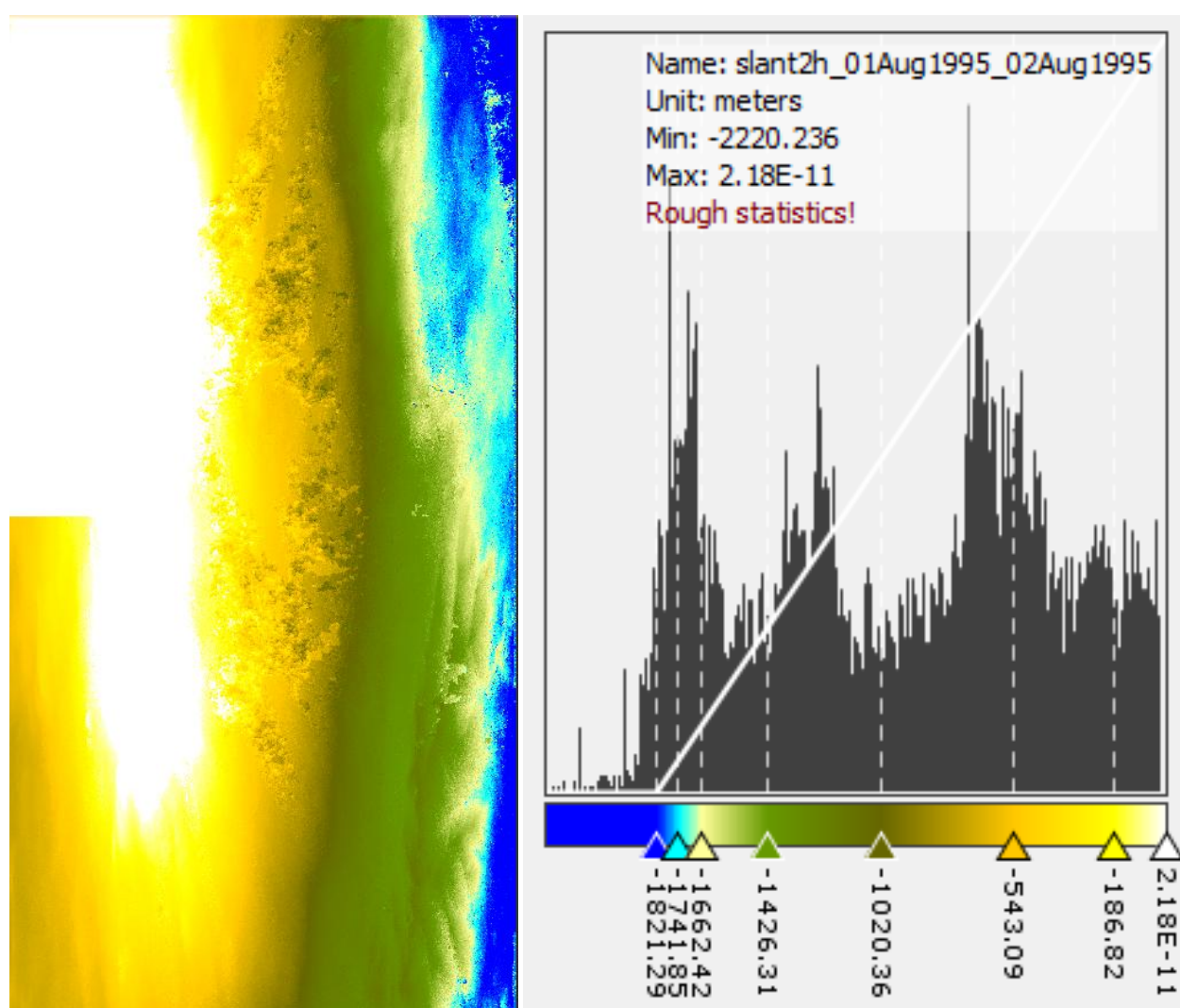


Рис. 51. Цифровая модель рельефа и условные обозначения

Контрольные вопросы

1. Перечислить этапы интерферометрической обработки радиолокационных данных. Какие из них не являются обязательными?
2. Какие ограничения накладываются на длину интерферометрической базы?
3. Какими основными факторами определяется точность цифровых моделей рельефа, получаемых при радиолокационной интерферометрической съемке?
4. Возможна ли интерферометрическая съемка в оптическом диапазоне длин волн?

2.4. Лабораторная работа № 4

Определение деформаций земной поверхности в результате интерферометрической обработки радиолокационных снимков

Цель работы: определение смещений земной поверхности путем интерферометрической обработки радиолокационной пары снимков.

Используемое оборудование, материалы и программное обеспечение:

- 1) персональный компьютер;
- 2) программное обеспечение ESA SNAP Toolbox;
- 3) пара снимков Sentinel-1, составляющих интерферометрическую пару.

Задачи работы:

- 1) закрепить пройденный материал, посвященный интерферометрической обработке радиолокационных снимков;
- 2) изучить методику интерферометрической обработки радиолокационных снимков.

Порядок выполнения работы

В качестве исходных данных используется интерферометрическая пара снимков, полученных 4 и 15 марта, фазовые слои которых представлены на рис. 52.

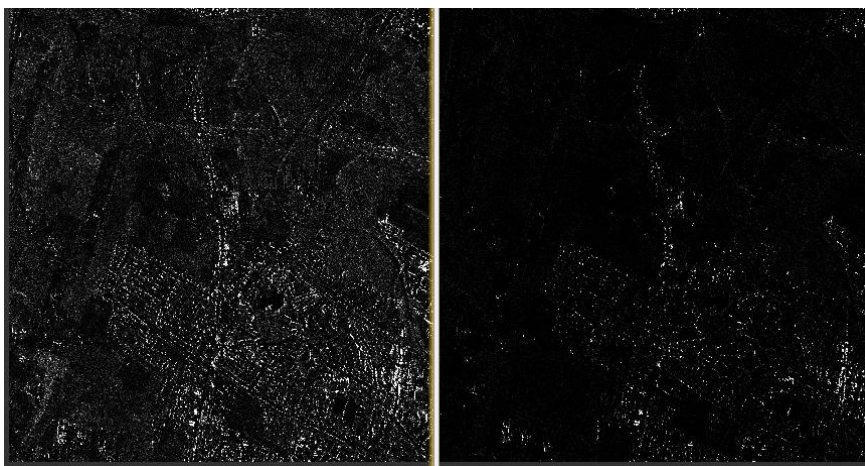


Рис. 52. Исходные данные

Первым шагом является процедура совмещения снимков. В качестве параметров обработки необходимо указать требуемую точность, количество итераций, метод интерполяции и другие параметры, приведенные на рис. 53 и 54.

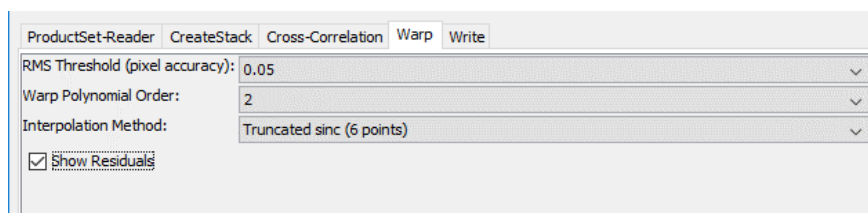


Рис. 53. Параметры полиномиального преобразования

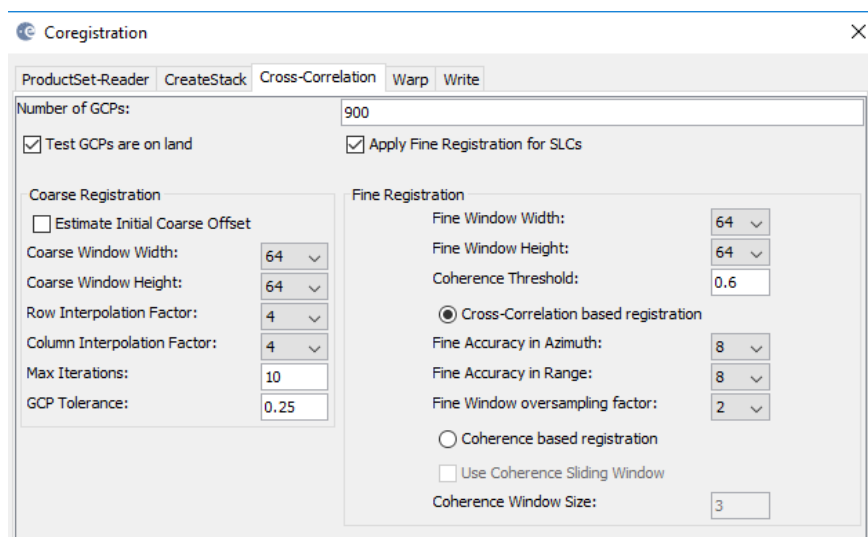


Рис. 54. Параметры корреляции

Далее, используя коррелированные изображения, создаем векторный слой соответственных точек через *Layer Manager* (рис. 55). Расчеты выполняются программой в автоматическом режиме.

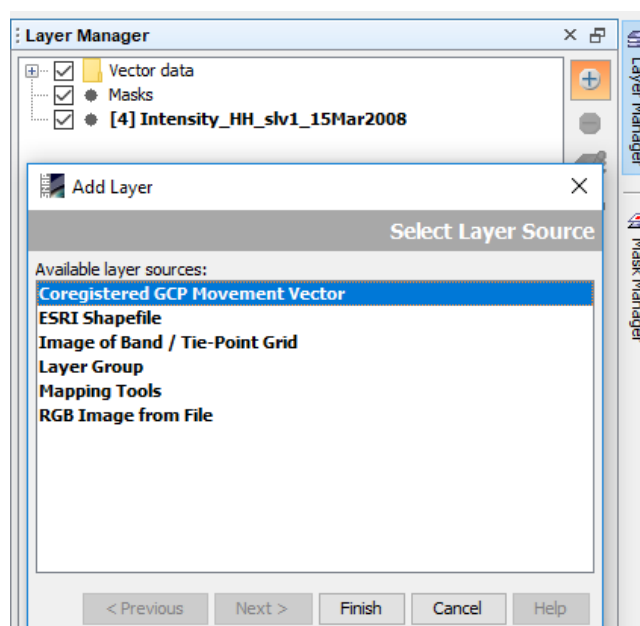


Рис. 55. Добавление GSP Movement Vector через менеджер слоев

На рис. 56 приведен увеличенный фрагмент изображения, на котором красным цветом показано направление векторов.

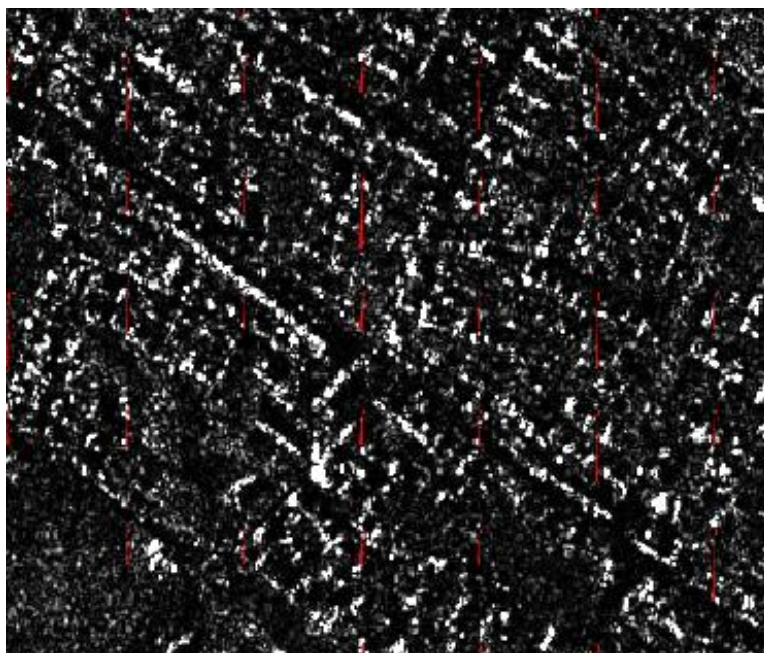


Рис. 56. Результат поиска соответственных точек

На следующем шаге выполняется создание интерферограммы. Предлагаемые программой параметры, показанные на рис. 57, рекомендуется оставить без изменений.

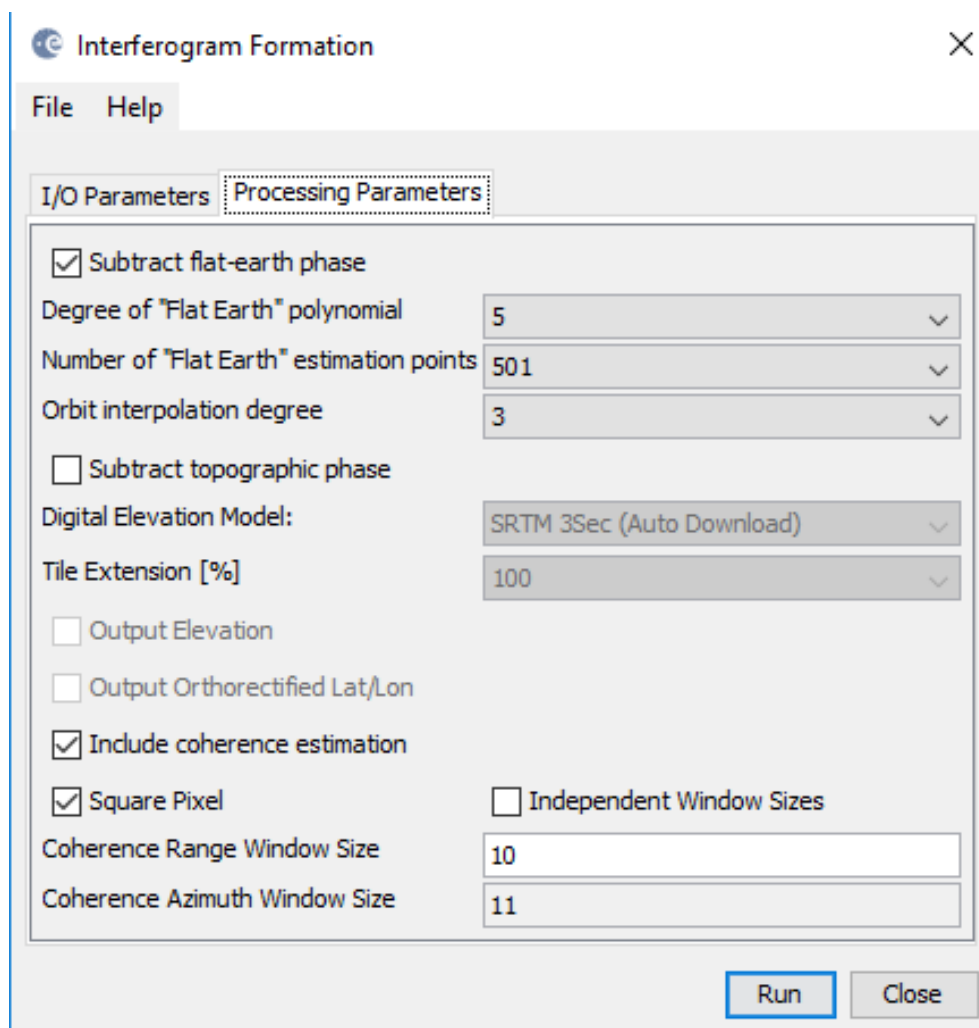


Рис. 57. Параметры формирования интерферограммы

При создании интерферограммы автоматически создается слой когерентности, поэтому дополнительное применение команды *Coherence Estimation* можно пропустить и перейти к коррекции фазы с помощью команды *Topographic Phase Removal*. К установленным настройкам по умолчанию добавить создание дополнительных информационных слоев (topographical phase и elevation), которые потребуются в дальнейших расчетах смещений. Параметры коррекции фазы приведены на рис. 58.

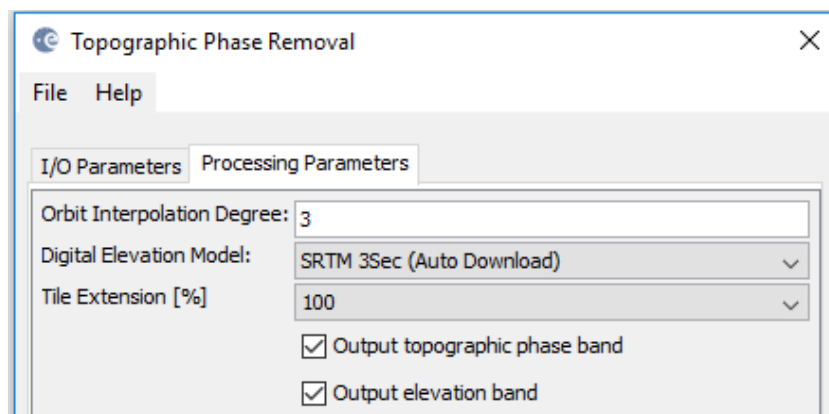


Рис. 58. Параметры Topographic Phase Removal

Результат коррекции можно видеть на рис. 59. Изменение яркостей слоя свидетельствует о трансформировании пикселей относительно заранее скачанной матрицы высот на данную территорию.

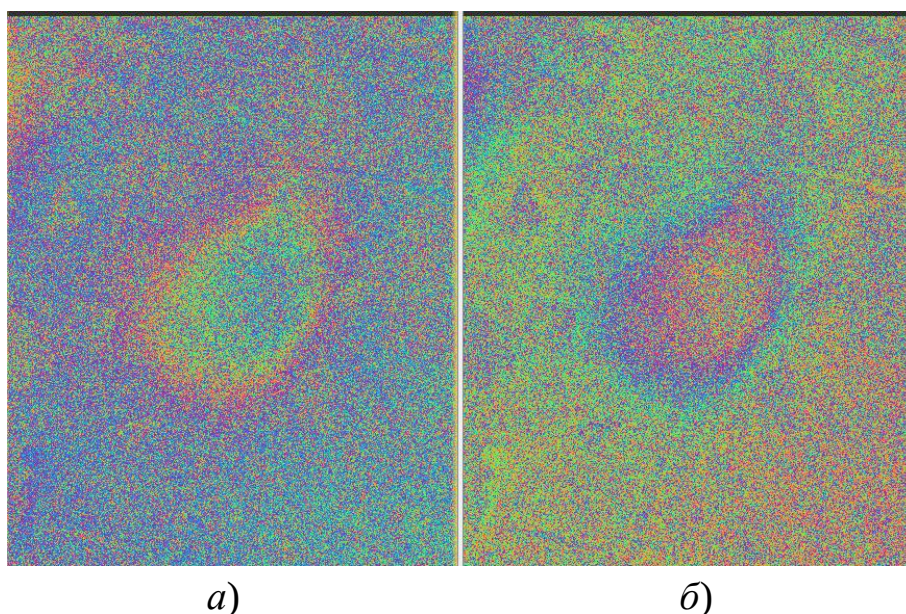


Рис. 59. Сравнение фазового слоя снимка:

a) до коррекции; *б)* после коррекции

Для определения величины смещений рельефа, произошедших в период с 4 по 15 марта, необходимо выполнить вычитание слоев с помощью функции Band Math. Выражение, задающее данную функцию, представлено на рис. 60.

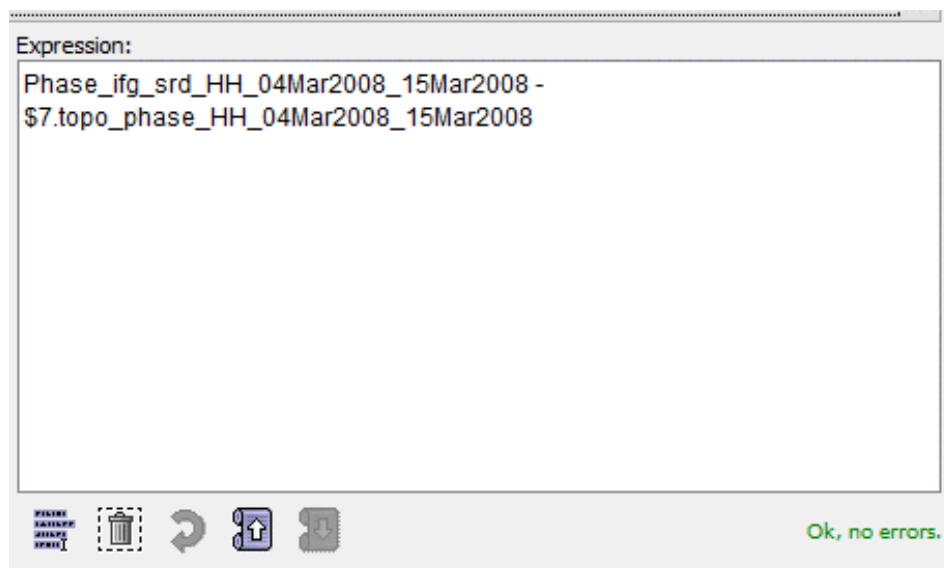


Рис. 60. Выражение для получения разности каналов

Входными данными здесь являются фазовый слой и слой, содержащий топографическую информацию, который был создан в процессе применения команды *Topographic Phase Removal*. На рис. 61 показаны входные и выходные данные.

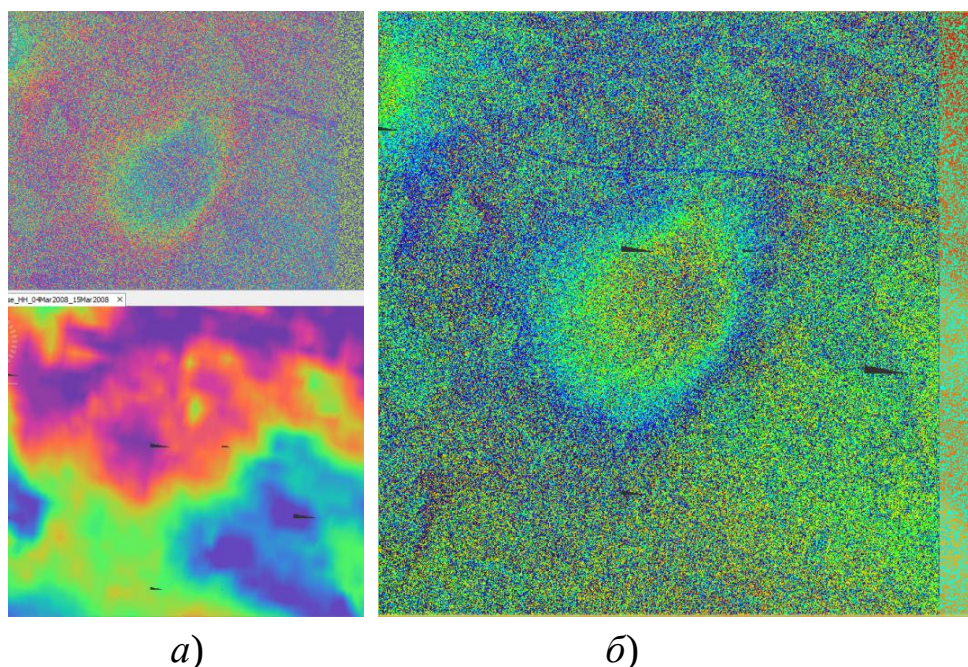


Рис. 61. Данные для определения смещений:

а) исходные данные; б) результат вычитания

Следующим шагом является фильтрация Goldstain для снижения уровня шума, результат которой показан рис. 62. Именно к полученному на данном этапе файлу будет применяться развертка фазы.

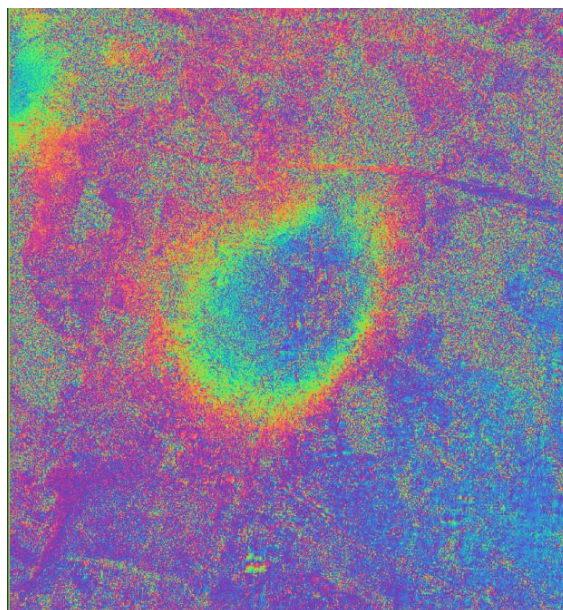


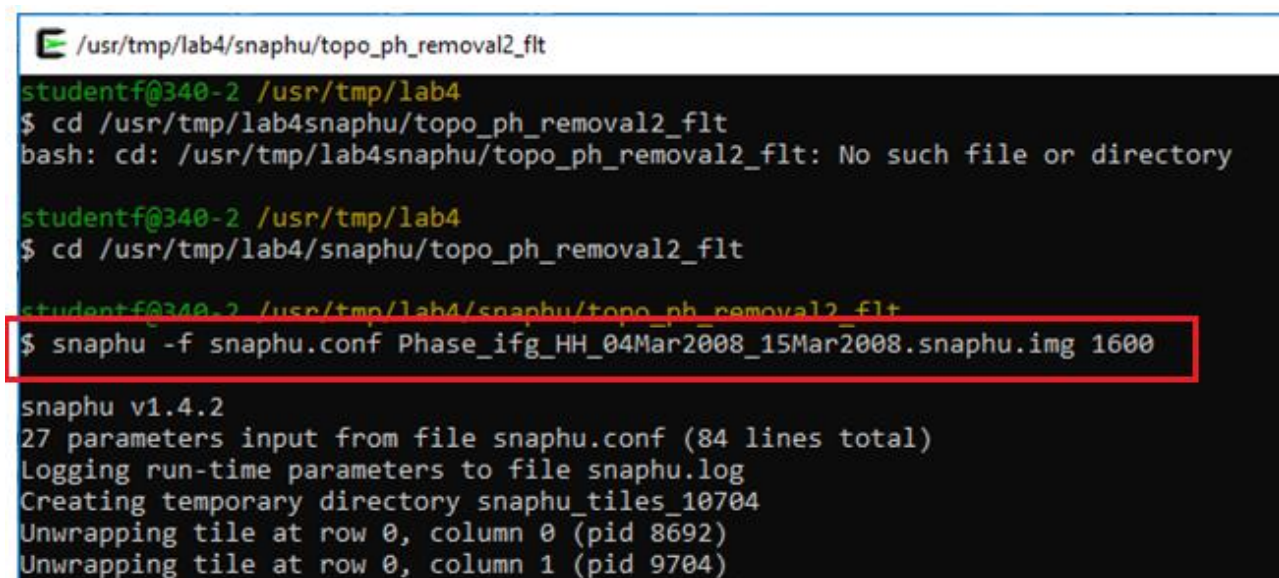
Рис. 62. Результат фильтрации

Так как задачей работы стоит определение смещений, необходимо выполнить экспорт результатов предыдущего шага, указав в параметрах метод DEFO. Полный перечень установленных параметров приведен на рис. 63.

Snaphu Export	
Read SnaphuExport	
Target folder:	C:\cygwin64\usr\tmp\ab4\snaphu
Statistical-cost mode:	DEFO
Initial method:	MCF
Number of Tile Rows:	10
Number of Tile Columns:	10
Number of Processors:	4
Row Overlap:	0
Column Overlap:	0
Tile Cost Threshold:	500

Рис. 63. Экспорт результата

Развертка фазы выполняется в специализированном программном обеспечении Snaphu аналогично действиям при создании ЦММ. Из файла конфигурации необходимо извлечь команду, показанную на рис. 64, которая запускает процесс развертки фазы. Результат сохраняется в выбранную ранее директорию.



```
/usr/tmp/lab4/snaphu/topo_ph_removal2_flt
studentf@340-2 /usr/tmp/lab4
$ cd /usr/tmp/lab4snaphu/topo_ph_removal2_flt
bash: cd: /usr/tmp/lab4snaphu/topo_ph_removal2_flt: No such file or directory

studentf@340-2 /usr/tmp/lab4
$ cd /usr/tmp/lab4/snaphu/topo_ph_removal2_flt
studentf@340-2 /usr/tmp/lab4/snaphu/topo_ph_removal2_flt
$ snaphu -f snaphu.conf Phase_ifg_HH_04Mar2008_15Mar2008.snaphu.img 1600

snaphu v1.4.2
27 parameters input from file snaphu.conf (84 lines total)
Logging run-time parameters to file snaphu.log
Creating temporary directory snaphu_tiles_10704
Unwrapping tile at row 0, column 0 (pid 8692)
Unwrapping tile at row 0, column 1 (pid 9704)
```

Рис. 64. Выбор директории с входными данными и запуск процесса развертки фазы

Через опцию *Snaphu Import* в ПО SNAP выполнить импорт результата развертки фазы. При выборе входного файла прочтения важно учесть, что после процедуры развертки фазы происходит потеря метаданных. Поэтому чтобы восстановить их, нужно выбрать фазовый слой из предыдущего шага. Результат развертки фазы приведен на рис. 65.

На полученном снимке устранена фазовая неоднозначность, следовательно, можно приступить к последнему преобразованию. С помощью опции *Phase to height* производится пересчет абсолютных значений фазы в значения смещений на местности. На рис. 66 показаны области, подверженные изменениям в избранный период.

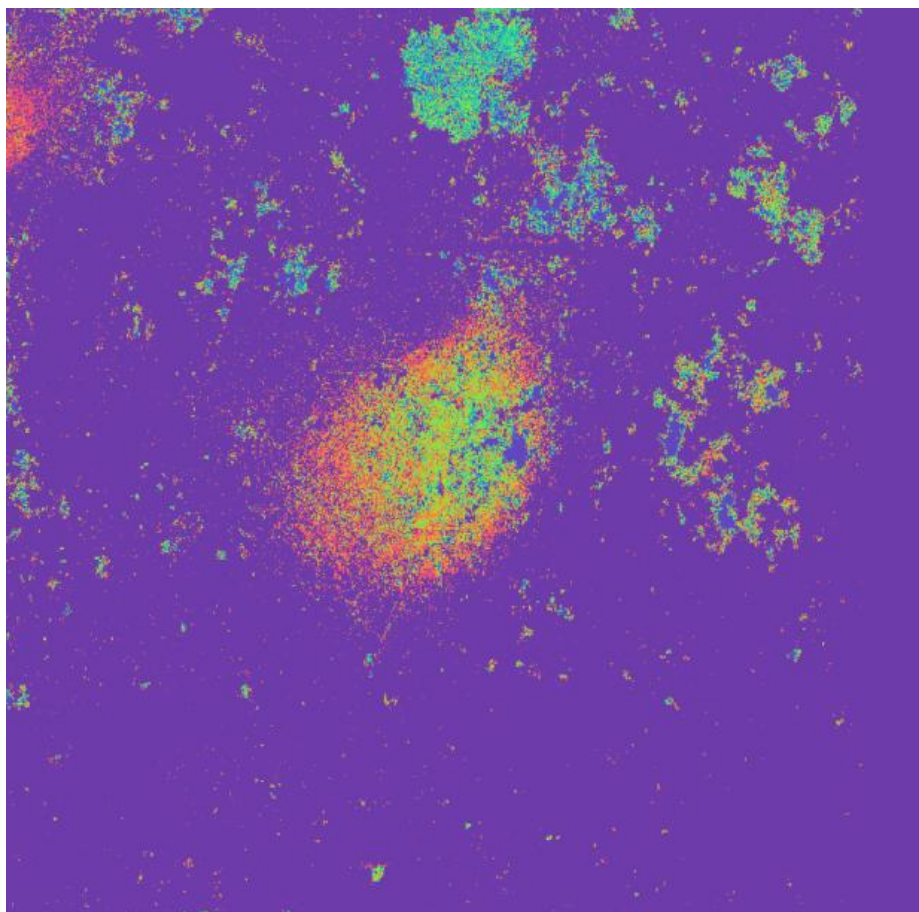


Рис. 65. Развернутая фазы

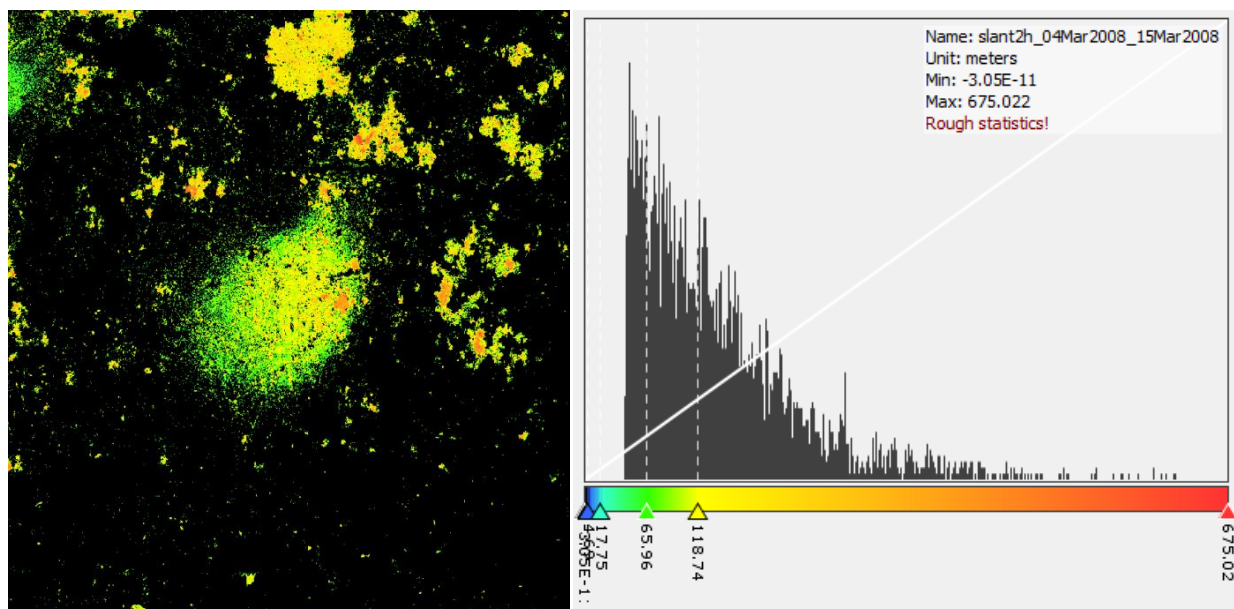


Рис. 66. Участки, подверженные изменениям рельефа

Контрольные вопросы

1. Перечислить этапы интерферометрической обработки радиолокационных данных. Какие из них не являются обязательными?
2. Какие ограничения накладываются на длину интерферометрической базы?
3. От чего зависит точность определения смещений земной поверхности, получаемых при радиолокационной интерферометрической съемке?
4. Какие технологии обработки многопроходных цепочек интерферометрической съемки вы знаете?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие активных методов дистанционного зондирования Земли, к которым относится радиолокационная съемка, является тенденцией последних лет. Преимущества этих методов, такие как возможность выполнения съемки при любых погодных условиях и независимость от времени суток, позволяют применять их для решения различных задач. Основными задачами являются определение вертикальных смещений объектов и земной поверхности, отслеживание нефтяных загрязнений, создание цифровые моделей местности, обнаружение вырубок и гарей в лесных массивах, а также контроль за состоянием сельскохозяйственных посевов.

Доступность данных радиолокационной съемки широкому кругу пользователей потребовала разработки программных продуктов и методик обработки. Теоретические и практические вопросы, связанные с технологией обработки данных радиолокационной съемки изложены в данном учебно-методическом пособии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новые технологии дистанционного зондирования Земли из космоса / В. В. Груздов, Ю. В. Колковский, А. В. Криштопов, А. И. Кудря. – М. : Техносфера, 2018. – 482 с.
2. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. С. Вербя, Л. Б. Неронский, И. Г. Осипов, В. Э. Турук ; под ред. В. С. Вербя. – М. : Радиотехника, 2010. – 680 с.
3. Кондратенков Г. С., Фролов А. Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли : учеб. пособие для вузов. – М. : Радиотехника, 2005. – 368 с.
4. Интернет-ресурс с базой данных по космическим снимкам и аппаратам [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://directory.eoportal.org>.
5. Кокорин В. И., Поль В. Г. Технология радиолокации с синтезом апертуры: учеб. пособие. – Красноярск : Изд-во СФУ, 2007. – 203 с.
6. Sentinel-1 Level Detailed Algorithm Definition. Document Number: SEN-TN-52-7445. S-1 MPC Nomenclature: DI-MPC-IPFDPM. – 2016.
7. Ketelaar V. B. H. (Gini) Satellite Radar Interferometry: Subsidence Monitoring Techniques / Remote Sensing and Digital Image Processing. – Berlin : Springer, 2009. – 243 p.
8. Дагуров П. Н., Чимитдоржиев Т. Н. Методы дистанционного исследования земной поверхности : учеб.-метод. пособие. – Улан-Удэ : Изд-во ФГОУ ВПО «Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В. Р. Филиппова», 2005. – 88 с.
9. Радиолокационные системы [Электронный ресурс] : учебник / В. П. Бердышев, Е. Н. Гарин, А. Н. Фомин [и др.] ; под общ. ред. В. П. Бердышева ; разработ.: Центр обучающих систем ИнТК СФУ. – Версия 1.0. – Электрон. дан. (4 Мб). – Красноярск : СФУ, 2012.
10. Коберниченко В. Г. Радиоэлектронные системы дистанционного зондирования Земли : учеб. пособие. – Екатеринбург : Изд-во Уральского университета, 2016. – 220 с.