

БАЗОВЫЕ ПРОДУКТЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ КОСМИЧЕСКИМИ РАДИОЛОКАТОРАМИ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

© 2014 г. А. В. Дмитриев^{1*}, Т. Н. Чимитдоржиев¹, М. А. Гусев², П. Н. Дагуров¹,
К. С. Емельянов², А. И. Захаров³, И. И. Кирбижекова¹

¹Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ

²Научный центр оперативного мониторинга Земли ОАО «Российские космические системы», Москва

³Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Московская обл.

*E-mail: dav@ipms.bsnet.ru

Поступила в редакцию 30.01.2014 г.

Анализируются технологии обработки данных зондирования земной поверхности космическими радиолокаторами с синтезированной апертурой. Показана необходимость создания базовых продуктов радиолокации межведомственного использования. Базовые продукты определяются, как результат автоматизированной потоковой обработки первичной космической информации и являются общей основой для многоцелевой тематической интерпретации в интересах решения задач различных потребителей. Представлены примеры базовых продуктов в виде композитных радиолокационных изображений: временной композит, поляризационный композит, композит когерентности, композит на основе преобразования Паули.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, радиолокаторы с синтезированной апертурой, обработка изображений, базовые информационные продукты

DOI: 10.7868/S0205961414050042

ВВЕДЕНИЕ

Радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) широко используются в дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ) из космоса наряду с сенсорами видимого и инфракрасного (ИК) диапазона (Аэрокосмический мониторинг объектов..., 2012; Верба и др., 2010; Захаров и др., 2012; Комплексный спутниковый мониторинг..., 2011; Massonnet, Souyris, 2009; Richards, 2009). Преимуществом радарного зондирования является независимость процесса получения изображений от освещенности снимаемой поверхности и наличия облачности. Кроме того, радиоволны обладают определенной способностью проникать в слой подстилающей поверхности, такие как сухая почва, растительность, снег и лед, обеспечивая подповерхностное зондирование. Широкое применение РСА космического базирования для картирования земных покровов также обусловлено их высокой разрешающей способностью, сравнимой с разрешением оптических систем: у таких РСА, как COSMO-SkyMed и TerraSAR-X, разрешение по поверхности достигает 1 м, а у разведывательных спутников SAR-Lupe – 0.5 м.

Когерентность излучения РСА дает возможность использования информации о фазе отраженных сигналов и составляет основу интерферо-

метрических методов съемки (радиолокационная (РЛ) интерферометрия). При съемке поверхности двухантенной системой в одном проходе носителя или в двухпроходной съемке поверхности одноантенной системой с близких траекторий разность фаз сигналов, принятых антеннами, содержит информацию о рельефе поверхности и возможных мелкомасштабных смещениях отражающей поверхности (Hanssen, 2001). Современные технологии радарной интерферометрии позволяют измерять высоты рельефа с точностью до 10 м и подвижки участков земной поверхности с субсантиметровой точностью.

Особенности взаимодействия радиоволн со сложными структурами поверхности, дающими многократное переотражение или имеющими пространственную анизотропию, могут быть выявлены с помощью поляризационных измерений. Такие измерения обеспечиваются поляриметрическим РСА, излучающим, например, линейно поляризованные волны с вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризациями и принимающим отраженный сигнал на согласованных (сигналы VV и HH) и ортогональных (VH и HV) поляризациях. Этот многоканальный поляриметрический режим работы радара значительно повышает информативность измерений (Козлов и

др., 2007; Cloude, 2010; Lee, Pottier, 2007; Van Zyl, 2010). Комбинирование поляриметрического и интерферометрического режимов – это новое направление в РЛ ДЗ, называемое поляриметрической РЛ-интерферометрией (PolInSAR). Большинство современных радаров космического базирования имеют возможность проводить съемку в поляриметрическом и интерферометрическом режимах.

Существующие и планируемые к запуску в ближайшее время РСА работают в микроволновых диапазонах L (1–2 ГГц), С (4–8 ГГц), Х (8–12.5 ГГц). С длиной волны зондирующего сигнала связан уровень отражения от объектов поверхности с характерными масштабами структуры порядка длины волны, а также глубина подповерхностного зондирования. Получаемые на различных длинах волн изображения одного и того же участка увеличивают возможности тематического анализа данных РСА.

Основная цель работы заключается в представлении и описании некоторых базовых продуктов радиолокации, получаемых из “сырых” РЛ-данных в результате автоматизированной обработки. В статье также приводятся краткие сведения о современном состоянии проблемы ДЗЗ с помощью РСА.

ЗАДАЧИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Ограничиваясь рамками статьи, приведем краткую информацию о современном состоянии проблемы ДЗЗ с помощью РСА. Анализ основных проблем ДЗЗ космическими РСА по состоянию на конец 2012 г. приведен в обзоре (Ouchi, 2013), где указаны ссылки на более чем 700 публикаций. Отметим, что поток публикаций по спутниковым РЛ-методам и технологиям ДЗЗ в мире весьма обширен и продолжает увеличиваться. Так, например, только в журнале *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* в 2013 г. и в первые месяцы 2014 г. опубликовано несколько десятков статей по различным проблемам зондирования земных покровов с помощью РСА. Из анализа литературы можно сделать вывод о постоянном совершенствовании методов РЛ-зондирования. Это обусловлено как разнообразием параметров действующих и планируемых к запуску спутников, так и сложностью задачи восстановления параметров земных покровов.

На измерения также влияют изменчивость атмосферы, ошибки в определении параметров орбиты. Для преодоления этих ограничений, например, в радарной интерферометрии был предложен метод “стабильных рассеивателей” в определенных пикселах, характеристики которых

постоянны во времени и не зависят от угла падения (Ferretti et. al., 2001). Другой подход использует несколько интерферограмм, формируемых путем многих проходов, и носит название метода “малой базовой линии” (Berardino et. al., 2002). Метод стабильных рассеивателей оптимален, когда пиксел содержит точечный рассеиватель, а метод малой базовой линии предпочтителен в случае распределенных рассеивателей. В последние годы были предложены другие методы, которые имеют определенные преимущества (Hooper, 2008; Ferretti et. al., 2011). Технологии дифференциальной интерферометрии применяются для измерений рельефа, мониторинга динамики земной поверхности, обусловленной тектоническими движениями, землетрясениями, вулканической деятельностью, подземными разработками, сезонными изменениями состояния почв, движением ледников, изменением береговых линий и других процессов.

При рассеянии волн на сложных РЛ-объектах происходит преобразование поляризационных характеристик сигнала. Поляриметрическая съемка позволяет регистрировать полную матрицу рассеяния РЛ-объекта с последующим ее преобразованием в другой произвольный поляризационный базис. Это привело к появлению новых методов анализа ДДЗ, таких как методы декомпозиции матрицы рассеяния, предложенные рядом исследователей (Cloude, 2010; Lee, Pottier, 2007; Van Zyl, 2010). Появляются новые модификации этих методов. На принципах поляриметрической интерферометрии основаны развиваемые в последние годы методы “случайного объема над землей” (Treuhaft, Siqueira, 2000; Papathanassiou, Cloude, 2001; Neumann, 2010) и томографии (Reigber, Moreira, 2000; Tebaldini, 2010) для исследования вертикальной и объемной структуры наземных объектов, например, леса.

В России, как показывает анализ литературы последних лет (с 2007 г.), также наблюдается тенденция к расширению круга задач, при решении которых используются данные РСА. Наибольшее число работ посвящено изучению динамики морской поверхности (Александров и др., 2008; Иванов и др., 2011; Каримова и др., 2011; Комплексный спутниковый мониторинг морей России, 2011; Кудрявцев и др., 2012; Лаврова и др., 2011; Митник, Хазанова, 2012; Переслегин и др., 2009) и практическому применению дифференциальной интерферометрии для исследования деформаций и подвижек почвы, обусловленных землетрясениями (Михайлов и др., 2010; Феоктистов, 2013), разработкой шахт и карьеров (Кантемиров, 2013; Филатов и др., 2013; Эпов и др., 2012;), оползнями и сезонным промерзанием (Дмитриев и др., 2012; Миронов, Музалевский, 2012; Чимит-

доржиев и др., 2013а); движением ледовых покровов и вследствие геологических процессов (Чимитдоржиев и др., 2013б; Трофимов, 2009). Работа (Родионова, 2009) посвящена оценке параметров почвы, исследование сигнатуры поверхности проводится в работе (Юрчак, 2007), в работе (Достовалов и др., 2007) рассматривается задача обнаружения объектов по изменению радиолокационных изображений (РЛИ). Проблемы построения цифровой модели рельефа рассмотрены в статьях (Елизаветин и др., 2009; Шувалов, 2011). Задачи зондирования растительности решаются в работах (Бондур, Чимитдоржиев, 2008). В работе (Коберниченко, Сосновский, 2012) проводится сравнение возможностей различных программных пакетов для обработки РЛИ. Вопросы калибровки РСА с помощью наземных РЛ-полигонов рассмотрены в (Атрошенко, 2013; Лепехина, 2013). Перспективы развития РЛ-зондирования Земли обсуждаются в работах (Арманд и др., 2010; Верба и др., 2010; Неронский, 2011).

Практика анализа РЛИ показывает, что ключевым направлением использования данных РСА является совместная обработка серии изображений одного и того же участка поверхности и получения на этой основе некоторых композитных изображений. Серию могут составлять изображения, полученные в разные дни (разновременный анализ), или на разных частотах (многочастотный анализ), или на разных поляризациях (поляриметрический анализ).

В случае анализа серии изображений, полученных одними и теми же (или идентичными) инструментами в разные моменты времени, становится возможным проследить в зависимости от интервала между съемками различные изменения естественных покровов, — такие, как весеннее таяние снега, этапы вегетативного цикла, сезонные изменения лесов и с.-х. угодий, медленные изменения поверхности, постоянно происходящие в течение длительного времени (например, эрозия почв), — а также изменения, случившиеся в результате каких-либо катастрофических явлений, произошедших за время между съемками: лесных пожаров, наводнений, землетрясений, схода лавин и др.

Поляриметрический и многочастотный анализ, как правило, проводят на наборе данных, полученных одновременно, для того чтобы исключить из рассмотрения эффекты, возникшие вследствие изменений на поверхности. Многочастотный поляриметрический анализ изображений выявляет особенности отражательных свойств поверхности в зависимости от длины волны и поляризации сигнала. Как правило, наибольшую вариативность показывают объемные отражающие среды, в которые радиосигнал частично проникает (растительность, сухие почвы и снег).

В данной работе рассматривается проблема создания некоторых обобщенных композитных информационных продуктов на основе РЛИ, которые можно назвать базовыми информационными продуктами.

БАЗОВЫЕ ПРОДУКТЫ НА ОСНОВЕ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Обработка РЛИ, полученных интерферометрическими и поляриметрическими РСА, представляет собой достаточно сложный процесс, который в настоящее время осуществляется специалистами с соответствующей подготовкой. Обычно для получения конечных результатов используются такие широко распространенные программные продукты, как ENVI – SARscape, PolSARPRO, Erdas Imagine RADAR, PHOTOMOD Radar, работа с которыми требует определенной квалификации и опыта. Отраслевые специалисты, например, работники сельского и лесного хозяйства, которые могли бы использовать результаты РЛ-зондирования, часто не имеют специальной подготовки в области радиолокации и обработки РЛИ. В настоящее время в России отсутствует более или менее единый подход к обработке и анализу космических данных, основанный на автоматизированном получении продуктов, предназначенных для анализа специалистами различных отраслей. Обработка в основном выполняется в ручном режиме, а автоматизация затрагивает лишь отдельные элементы этого процесса (Боярчук, Туманов, 2009). Поэтому задача автоматизированного создания продуктов современной интерферометрической и поляриметрической радиолокаций несомненно является актуальной. Создание подобных информационных технологий — мировая тенденция (Архитектура инфраструктуры, 2010). Современные требования потребителей к оперативности получения конечных информационных продуктов обуславливают необходимость скорейшего внедрения потоковых (непрерывных), максимально автоматизированных технологий обработки спутниковых данных ДЗЗ (Бондур, 2014; Гусев и др., 2013; Лупян, Саворский, 2012). Такие продукты необходимы для решения разнообразных задач, например, для контроля пожароопасной обстановки и паводковой ситуации, контроля вырубki леса и др.

Базовый продукт ДЗЗ определяется как результат потоковой обработки первичной космической информации, являющийся общей основой для многоцелевой тематической интерпретации в интересах решения задач различных потребителей, т.е. спутниковые данные поставляются в “удобном” для потребителя виде. Базовые продукты занимают промежуточное место между первичными данными ДЗЗ стандартного уровня обработки и

комплексным тематическим продуктом глубокого уровня обработки, проводимой экспертами предметной области применения космической информации. Банк базовых продуктов — это автоматизированная система, компонентами которой являются комплекс средств автоматизации потокового создания, архивации и распространения базовых продуктов ДЗЗ.

Функционирование общедоступного банка базовых продуктов ДЗЗ в России позволит обеспечить ведомственные и региональные информационные системы мониторинга универсальной исходной информацией для решения прикладных тематических задач без необходимости самостоятельной разработки и дальнейшей эксплуатации технологии обработки первичной космической информации. Номенклатура создаваемых базовых продуктов, условия и средства их предоставления потребителям должны определяться соответствующим Регламентом, согласованным на межведомственном уровне.

Определим, какие результаты обработки РЛИ можно отнести к базовым продуктам ДЗЗ на основе РЛ-информации. В работе (Лупян, Саворский, 2012) обосновывается понятие базовых продуктов применительно к оптическим изображениям. Приведенное в данной работе определение базовых продуктов как набора данных, содержащих обобщенные физические характеристики исследуемых объектов, применимо и к базовым продуктам радиолокации. Более конкретно можно определить базовые продукты ДЗЗ как индексные, композитные или заданные в другой форме изображения, характеризующие относительное изменение состояния природных объектов и процессов в пространстве и времени.

Перспективным с точки зрения дальнейшего тематического дешифрирования способом обработки данных при формировании базовых продуктов является комбинирование данных различных информационных каналов (данные разных диапазонов частот, поляризаций, времени и геометрии съемки), поскольку оно передает специфические особенности взаимодействия сигнала с подстилающими покровами в зависимости от параметров съемки и условий проведения измерений. Значительная часть процедуры анализа и дешифрирования аэрокосмических снимков, в том числе и радиолокационных, выполняется пользователями визуально, поэтому основные базовые продукты радиолокации удобно создавать в виде псевдоцветовых композитов (красный + зеленый + синий: RGB). Если исходных каналов только два, варианты заполнения каналов могут быть следующие: недостающий канал заполняется ровным тоном; недостающий канал заполняется дополнительными данными иной природы (карта вы-

сот, температур, влажности, плотности растительности и т.д.); либо же одно из двух изображений загружается в два канала сразу.

Другой цветовой метод обозначают аббревиатурами HIS или (в другом порядке) HSI (Hue + Saturation + Intensity: оттенок цвета + насыщенность + яркость). В этом случае сгенерированное из тех же трех каналов, что и в случае RGB-метода, цветовое решение оказывается совершенно иным: подчеркиваются другие детали, оттеняются новые области. Здесь существенную роль играет выбор каналов, поскольку они не равнозначны по содержанию. Этот же метод часто обозначают также аббревиатурами HSV, HSB или HSL, что почти одно и то же, только численное представление компоненты яркости (последний канал: Value, Brightness, Lightness в HSV, HSB, HSL соответственно) несколько отличается.

Анализ международного опыта обработки данных космических радаров показал, что существуют отработанные методики формирования типовых продуктов. С учетом этого, к базовым можно отнести следующие продукты:

1) *Композиты, отражающие состояние подстилающей поверхности*, формируются на основе данных одного и того же поляриметрического РСА. Состав каналов таких изображений может принимать следующие значения:

а) R — изображение, полученное на согласованной НН-поляризации,

G — изображение, полученное на HV-поляризации,

B — синтезированное изображение $\arctg(HV/HH)$;

б) R — синтезированное изображение $(HH - HV)/(HH + HV)$,

G — изображение, полученное на HV-поляризации,

B — изображение, полученное на НН-поляризации;

в) R — изображение, полученное на согласованной НН-поляризации,

G — изображение, полученное на HV-поляризации,

B — синтезированное изображение $(HH - HV)$.

2) *Композиты, отражающие произошедшие изменения подстилающей поверхности*, в составе:

а) R — изображение за последнюю дату,

G — квадрат отношения амплитуды изображения за предпоследнюю дату к амплитуде изображения за последнюю дату,

B — изображение за предпоследнюю дату;

б) R — изображение за первую дату,

G — изображение за вторую дату,

В – изображение за третью дату.

3) *Композитные изображения снимков (пленочных загрязнений) на водной поверхности* – представляются в следующих видах: RGB-изображения с выделенными контрастным цветом снимками на водной поверхности или бинарное изображение-маска, в которой снимкам соответствуют максимальные, а окружающему фону минимальные значения яркости пикселей.

4) *Композитные RGB-изображения подтопленных* в составе:

R, G – изображения за последнюю дату,

В – изображение за предпоследнюю дату.

5) *Оценочное распределение биомассы в виде композитных индексированных изображений* – формируется путем расчета поляриметрической когерентности между двумя изображениями, полученными одним и тем же поляриметрическим РСА.

6) *Композитные индексированные изображения шероховатости земной поверхности и сомкнутости лесного полога* – формируются путем расчета энтропии методом Клода–Потье (Lee, Pottier, 2009; Cloude, 2010) для двух изображений, полученных одним и тем же поляриметрическим РСА. Метод декомпозиции Клода–Потье основывается на статистиках второго порядка, что освобождает его от необходимости априорного предположения о характере и параметрах распределения объектов рассеяния, отражения и поглощения. Предполагается, что для каждой ячейки существует доминирующий усредненный механизм рассеяния, который может быть описан следующими тремя параметрами: 1) средний угловой параметр α , который соответствует физическому механизму рассеяния – поверхностному (α близко к 0°), объемному (α близко к 45°) и двукратному (α близко к 90°); 2) энтропия H – в определенной степени – мера упорядоченности и шероховатости поверхности, интерпретируется часто совместно с третьим параметром анизотропией; 3) анизотропия A – характеристика соотношения и распределения недоминирующих механизмов рассеяния.

Другие методы поляриметрической декомпозиции, например, предполагают разложение на три компоненты, соответствующие объемному рассеянию, преимущественно поверхностному рассеянию, и двукратному рассеянию.

7) *Композитные индексированные изображения типов подстилающей поверхности на основе доминирующего механизма рассеяния* – формируются путем расчета параметра α для двух изображений, полученных одним и тем же поляриметрическим РСА.

ПРИМЕРЫ БАЗОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОДУКТОВ

Для формирования комбинации (композиата) разновременных изображений, полученных на одной длине волны и одной поляризации, первоначально необходимо выполнить совмещение изображений в заданной картографической проекции с одинаковым пространственным разрешением, выполнить усреднение по дальности и азимуту. На рис. 1 (см. на цветн. вклейках) представлен псевдоцветовой композит дельты р. Селенга, построенный следующим образом: изображение 1 – амплитудный снимок за 28 сентября 2006 г., изображение 2 – амплитудный снимок за 13 ноября 2006 г.

По данному композиту можно выделить участки, на которых произошли изменения в период между съемками (антропогенного и природного характера) – вырубки, застройки, незаконные свалки мусора и т.д.

Объединение разновременных изображений особенно перспективно для одноканальных (одна поляризация) радаров коротковолнового диапазона, данные которых имеют ограниченное применение для исследования почв и растительных покровов. Чувствительность к наличию влаги, по-разному влияющей на диэлектрические свойства различных типов подстилающей поверхности, позволяет расширить возможности классификации. На рис. 2 (на цветн. вклейках) приведен пример разновременного изображения Баргузинской долины (Республика Бурятия).

В нижней части снимка на гористой территории выделяется фиолетовое пятно, соответствующее лесному пожару на Голондинском хребте. На фрагменте изображения Баргузинской долины (в правом верхнем углу) можно выделить несколько классов поверхностей, среди которых сухие и увлажненные почвы, участки с развитой растительностью, а также открытые скалистые склоны на краю долины.

На рис. 3 (на цветн. вклейках) представлен псевдоцветовой композит дельты реки Селенга, построенный следующим образом: $R = (HH - HV)/(HH + HV)$; $G = HV$; $B = HH$. По данному композиту можно уверенно выделить лесные сообщества и крупный кустарник вдоль реки, безлесные участки (луга, поля, пустоши). Дополнительная интерпретация может быть связана только с косвенными признаками: размеры, форма, расположение и т.д.

На рис. 4 (на цветн. вклейках) приведен псевдоцветовой композит, построенный следующим образом: $R = HH$; $G = HV$; $B = \arctg(HV/HH)$. Несмотря на обилие различных цветов и оттенков, интерпретация композита усложняется тем фактом, что одинаковые оттенки соответствуют в не-

которых случаях совершенно разным объектам. Поэтому в данном конкретном случае при интерпретации следует опираться на косвенные признаки, использование цветовой информации возможно лишь с целью разделения соседних объектов и выделения особенностей и изменений.

Для получения композита когерентности для каждого пиксела изображения используется выражение

$$C = \frac{\left| \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} I_1(x, y) I_2^*(x, y) \right|}{\sqrt{\sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} |I_1(x, y)|^2 \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} |I_2(x, y)|^2}},$$

где $I_1(x, y)$ и $I_2(x, y)$ – значения сигнала основного и вспомогательного изображений интерферометрической пары; * – знак комплексного сопряжения; X и Y – размеры области усреднения по дальности и азимуту. Формирование композита: R – интерферометрическая когерентность; G – средняя интенсивность; B – разность интенсивностей. Композит, показывающий изменения за время между съемками с 28 сентября по 13 ноября 2006 г. в районе дельты р. Селенга, проведен на рис. 5 (на цветн. вклейках). Красный цвет на рис. 5 соответствует стабильной поверхности. Различные оттенки красно-оранжевого и розового-белого соответствуют поверхностям, незначительно изменившимся. Ярко-синий указывает, что поверхность значительно изменилась, – в данном случае вода превратилась в лед. Лесные сообщества выделяются голубоватым оттенком вследствие повышенной объемной, а также временной декорреляции.

Когерентность как индикатор временной стабильности полезна для классификации подстилающих покровов. Открытые почвы являются объектами более высокой временной стабильности, чем участки с развитым растительным покровом.

Для выделения механизмов рассеяния предлагается использовать псевдоцветовой композит, основанный на поляриметрическом преобразовании Паули, при котором механизм уголкового отражения соответствует компоненте $[HH - VV]^2$, объемного рассеяния – $2[HV]^2$, поверхностного рассеяния – $[HH + VV]^2$.

На рис. 6 (на цветн. вклейках) представлен базовый продукт – композит, полученный при помощи преобразования Паули. Интерпретация композита может быть выполнена следующим образом:

– преобладание оттенков красного свидетельствует о наличии зданий, редкого леса со стволами соизмеримыми с длиной волны, обрывистых берегов и различных структур, имеющих отвес-

ные формы. Например, на рис. 6 населенные пункты выделяются красным (розовым) оттенком, в лесу отмечается значительная часть пикселей, имеющих красный цвет, что свидетельствует о наличии стволов деревьев диаметром порядка 15–25 см (длина волны 23.5 см);

– различные оттенки синего цвета характерны для относительно ровных участков, термин “относительно” в данном случае обозначает сопоставление с длиной волны, т.е. преобладающие размеры шероховатостей намного меньше длины волны. Например, на рис. 6 синим тоном выделяются водная поверхность, поля и луга. В горах, покрытых лесом, наличие синего оттенка в некоторых случаях может свидетельствовать о нарушении леса вследствие пожара или иных факторов, связанных с усыханием деревьев;

– зеленая палитра относится к растительным сообществам, на данной длине волны выделяются лесные массивы, объемно рассеивающие радарный сигнал;

– белый цвет означает сопоставимость всех трех компонент, что наблюдается часто в населенных пунктах, а в гористой местности указывает на то, что склон обращен к источнику сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ публикаций по проблеме ДЗ земных покровов показывает, что космические радары с синтезированной апертурой являются важным инструментом для решения ряда задач ДЗЗ во всем мире. Современные радары используют интерферометрический и поляриметрический режимы, а также наиболее информативный комбинированный режим поляриметрической интерферометрии. Показано, что наиболее перспективными технологиями обработки РЛИ являются технологии, использующие различные типы многоканальности изображения: по времени, по частоте, по поляризации. На основе совместной обработки многоканальных изображений предложены конкретные типы базовых РЛ-продуктов, представляющих собой индексные, композитные или заданные в другой форме изображения, характеризующие относительное изменение состояния природных объектов и процессов в пространстве и времени. Получены и представлены в виде карт следующие базовые продукты: временной композит, поляризационный композит, композит когерентности, композит на основе преобразования Паули. Представленные базовые продукты спутниковой радиолокации и технология визуальной трактовки предназначены для потребителей, не знакомых со специальными методами и технологиями РЛ-землеобзора. Можно полагать, что простота визуальной интерпретации базовых про-

дуктов позволит им найти применение в мониторинге земных покровов в интересах различных министерств и ведомств, а также в научных и образовательных целях.

Отметим, что возможности исследования земных покровов с помощью РСА в ближайшее время должны заметно возрасти в связи с запуском спутников ALOS-2 (JAXA, L-диапазон) и Sentinel-1A (ESA, C-диапазон).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александров В.Ю., Волков В.А., Сандвен С., Бабикер М., Клостер К.* Обнаружение арктических айсбергов по спутниковым изображениям РСА в видимого диапазона высокого разрешения // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 3. С. 44–55.
- Арманд Н.А., Захаров А.И., Захарова Л.Н.* Космические радары с синтезированной апертурой в дистанционном зондировании Земли – современные системы и перспективные проекты // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 2. С. 3–13.
- Архитектура инфраструктуры пространственных данных Германии // Пространственные данные. 2010. № 2. С. 7–15.
- Атрошенко Л.М., Горобец Н.Н., Красногорский М.Г., Малюков В.М.* Опыт создания полигонно-калибровочного комплекса для радиолокаторов с синтезированной апертурой космического базирования // Вестн. СибГАУ. 2013. № 5(51). С. 30–32.
- Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса / Под ред. академика В.Г. Бондура. М.: Научный мир, 2012. 558 с.
- Бондур В.Г.* Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 1. С. 3–17.
- Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н.* Дистанционное зондирование растительности оптико-микроволновыми методами // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008. № 6. С. 64–73.
- Боярчук К.А., Туманов М.В.* К вопросам об автоматизации дешифрирования спутниковых снимков и интеграции геоинформационных систем в корпоративные автоматизированные информационные системы // Вопросы электромеханики. Тр. ВНИИЭМ. 2009. Т. 108. № 1. С. 56–57.
- Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э.* Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
- Гусев М.А., Денисов П.В., Кирбижекова И.И., Дмитриев А.В.* Базовые продукты дистанционного зондирования Земли на основе радиолокационных данных // Вестн. СибГАУ. 2013. № 5(51). С. 82–85.
- Дмитриев П.Н., Голубев В.И., Исаев Ю.С., Киселева Е.А., Михайлов В.О., Смольянинова Е.И.* Некоторые проблемы обработки и интерпретации данных спутниковой радарной интерферометрии на примере мониторинга оползневых процессов // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 130–144.
- Достовалов М.Ю., Лифанов А.С., Мусиняц Т.Г.* Обнаружение объектов по изменениям на радиолокационных изображениях РСА // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 4. С. 15–26.
- Елизаветин И.В., Шувалов Р.И., Буш В.А.* Принципы и методы радиолокационной съемки для целей формирования цифровой модели местности // Геодезия и картография. 2009. № 1. С. 39–45.
- Захаров А.И., Яковлев О.И., Смирнов В.М.* Спутниковый мониторинг Земли: Радиолокационное зондирование поверхности. М.: Либроком, 2012. 248 с.
- Иванов А.Ю., Достовалов М.Ю., Синева А.А.* Определение параметров нефтяных загрязнений по данным космической поляризационной радиолокационной съемки в районе нефтепромыслов “Нефтяные Камни” в Каспийском море // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 5. С. 31–44.
- Кантемиров Ю.И.* Космический радарный мониторинг смещений и деформаций земной поверхности и сооружений. Опыт компании “СОВЗОНД” // Вестн. СибГАУ. 2013. № 5(51). С. 52–54.
- Каримова С.С., Лаврова О.Ю., Соловьев Д.М.* Наблюдение вихревых структур Балтийского моря с помощью радиолокационных и радиометрических спутниковых данных // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 5. С. 15–23.
- Коберниченко В.Г., Сосновский А.В.* Интерферометрическая обработка данных космической радиолокационной съемки высокого разрешения // Физ. волнов. проц. и радиотех. сист. 2012. Т. 15. № 3. С. 75–83.
- Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А.* Поляризация радиоволн. Кн. 2. Радиолокационная поляриметрия. М.: Радиотехника, 2007. 640 с.
- Кудрявцев В.Н., Иванова Н.А., Йоханнессен О.М., Акимов Д.Б.* Об особенностях РЛ-изображений прибрежной зоны моря // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 6. С. 11–21.
- Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Сабинин К.Д.* Исследование особенностей генерации и распространения внутренних волн в бесприливных морях по данным спутниковой радиолокации // Докл. РАН. 2011. Т. 436. № 3. С. 407–411.
- Лепехина Т.А., Николаев В.И., Семенов М.А., Чарыков И.В., Чикачев В.С.* Оборудование радиолокационного полигона для калибровки и валидации космических радиолокаторов с синтезированной апертурой // Вестн. СибГАУ. 2013. № 5(51). С. 26–29.
- Лузян Е.А., Саворский В.П.* Базовые продукты обработки данных дистанционного зондирования Земли // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 87–97.
- Миронов В.Л., Музалевский К.В.* Космический радиолокационный мониторинг процессов замерзания и оттаивания почвы арктической тундры // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 8. С. 40–43.
- Митник Л.М., Хазанова Е.С.* Зондирование морского льда в Татарском проливе спутниковыми РСА санти-

- метрового и дециметрового диапазонов // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 294–302.
- Михайлов В.О., Назарян А.Н., Смирнов В.Б., Диаман М., Шапиро Н., Киселева Е.А., Тихоцкий С.А., Поляков С.А., Смольянинова Е.И., Тимошкина Е.П.* Совместная интерпретация данных дифференциальной спутниковой интерферометрии и GPS на примере Алтайского (Чуйского) землетрясения 27.09.2003 // Изв. РАН. Физика Земли. 2010. № 2. С. 3–16.
- Неронский Л.Б.* Перспективы развития методов и систем радиолокационного наблюдения космического базирования // Журн. радиоэлектр. 2011. № 11. Интернет-ресурс: <http://jre.cplire.ru/jre/nov11/14/text.pdf>
- Перслегин С.В., Иванов А.Ю., Халиков З.А.* Перспективы развития космических радиолокационных методов изучения океанских явлений // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса. М.: ИКИ РАН, 2009. Вып. 6. Т. 1. С. 42–57.
- Родионова Н.В.* Оценка параметров почвы по радарным данным с использованием эмпирической модели и декомпозиции по механизмам рассеяния // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 1. С. 3–8.
- Трофимов Д.М., Никольский Д.Б., Захаров А.И.* Возможности и результаты практического использования спутниковой радиолокационной съемки и интерферометрии при геологоразведочных работах на нефть и газ // Геол., геофиз. и разраб. нефтяных и газовых месторожд. 2009. № 1. С. 25–29.
- Феоктистов А.А., Захаров А.И., Денисов П.В., Гусев М.А.* Спутниковый радиолокационный мониторинг деформаций земной поверхности в зоне землетрясения с использованием данных наземных GPS-измерений // Вестн. СибГАУ. 2013. № 5(51). С. 60–62.
- Филатов А.В., Брыксин В.М., Евтюшкин А.В., Васильев Ю.В., Белоносов А.Ю.* Использование PSinSAR-технологии на кластере для геодинамического мониторинга нефтегазовых месторождений // Вестн. СибГАУ. 2013. № 5(51). С. 49–51.
- Чимитдоржиев Т.Н., Дагуров П.Н., Захаров А.И., Татьков Г.И., Быков М.Е., Дмитриев А.В., Балданов Н.Д., Мухорин Е.А., Мильхеев Е.Ю.* Оценка сезонных деформаций болотистых почв методами радиолокационной интерферометрии и геодезического нивелирования // Криосфера Земли. 2013б. Т. 17. № 1. С. 80–87.
- Чимитдоржиев Т.Н., Татьков Г.И., Тубанов Ц.А., Дагуров П.Н., Захаров А.И., Кирбижекова И.И., Дмитриев А.В., Быков М.Е.* Исследования динамики ледового покрова озера Байкал по радарным данным и методами GPS-навигации // Вестн. СибГАУ. 2013в. № 5(51). С. 76–79.
- Шувалов Р.И.* Построение распределения вероятностей локального наклона фазового рельефа в космической радиолокационной топографической интерферометрии // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 1. С. 57–69.
- Эпов М.И., Миронов В.Л., Чимитдоржиев Т.Н. и др.* Наблюдение просадок поверхности Земли в районе подземных угольных выработок Кузбасса по данным радиолокационной интерферометрии ALOS PALSAR // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 4. С. 26–29.
- Юрчак Б.С.* Характеристика радиолокационной сигнатуры лесотундровой гари в зимний период // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 5. С. 71–79.
- Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E.* A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2002. V. 40. № 11. P. 2375–2383.
- Cloude S.R.* Polarisation: applications in remote sensing. N.Y.: Oxford Univ. Press, 2010. 453 p.
- Ferretti A., Fumagalli A., Novati F., Prati C., Rocca F., Rucci A.* A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2011. V. 49. № 9. P. 3460–3470.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F.* Permanent scatterers in SAR interferometry // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2001. V. 39. № 1, P. 8–20.
- Hanssen R.* Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 2001. 328 p.
- Hooper A.* A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. L16302.
- Lee J.-S., Pottier E.* Polarimetric radar imaging: from basics to applications. CRC Press, 2009. 414 p.
- Massonnet D., Souyris J.-C.* Imaging with Synthetic Aperture Radar. CRC Press, 2008. 276 p.
- Neumann M., Ferro-Famil L., Reigber A.* Estimation of Forest Structure, Ground, and Canopy Layer Characteristics From Multibaseline Polarimetric Interferometric SAR Data // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2010. V. 48. № 3. P. 1086–1104.
- Ouchi K.* Recent Trend and Advance of Synthetic Aperture Radar with Selected Topics // Rem. Sens. 2013. № 5. P. 716–807.
- Papathanassiou K.P., Cloude S.R.* Single-baseline polarimetric SAR interferometry // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2001. V. 39. P. 2352–2363.
- Reigber A., Moreira A.* First Demonstration of Airborne SAR Tomography Using Multibaseline L-Band Data // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2000. V. 38. № 5. P. 2142–2152.
- Richards J.A.* Remote sensing with imaging radar. Springer. 2009. 361 p.
- Tebaldini S.* Single and multipolarimetric SAR tomography of forested areas: A parametric approach // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2010. V. 48. № 5. P. 2375–2387.
- Treuhaft R.N., Siqueira P.R.* Vertical structure of vegetated land surfaces from interferometric and polarimetric radar // Radio Sci. 2000. V.53. P. 141–177.
- Van Zyl J., Kim Y.* Synthetic aperture radar polarimetry. Jet Propulsion Laboratory. California Inst. Technol., 2010. 313 p.

Basic Products of Earth Remote Sensing by Means of Spaceborne Synthetic Aperture Radars

A. V. Dmitriev^{1*}, T. N. Chimitdorzhiev¹, M. A. Gusev², P.N. Dagurov¹, K. S. Emelyanov²,
A. I. Zakharov³, I. I. Kirbizhekova¹

¹*Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude*

²*Research Center for Earth Operative Monitoring of JSC "Russian Space Systems", Moscow*

³*Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Fryazino, Moscow region*

Data processing technology of the Earth surface remote sensing by means of spaceborne synthetic aperture radars is analyzed. The necessity of creation the basic products as combination of single channel SAR data for interagency use are shown. Basic products may be described as a result of streaming (continuous) processing of a set of single channel SAR data, they may be used as a standard data source for multi-purpose thematic interpretation. The examples of basic products in the form of composite radar images such as multitemporal composite, polarimetric composite, coherence based composite, Pauli decomposition composite are synthesized and represented in a paper.

Keywords: remote sensing, synthetic aperture radars, image processing, basic informational products

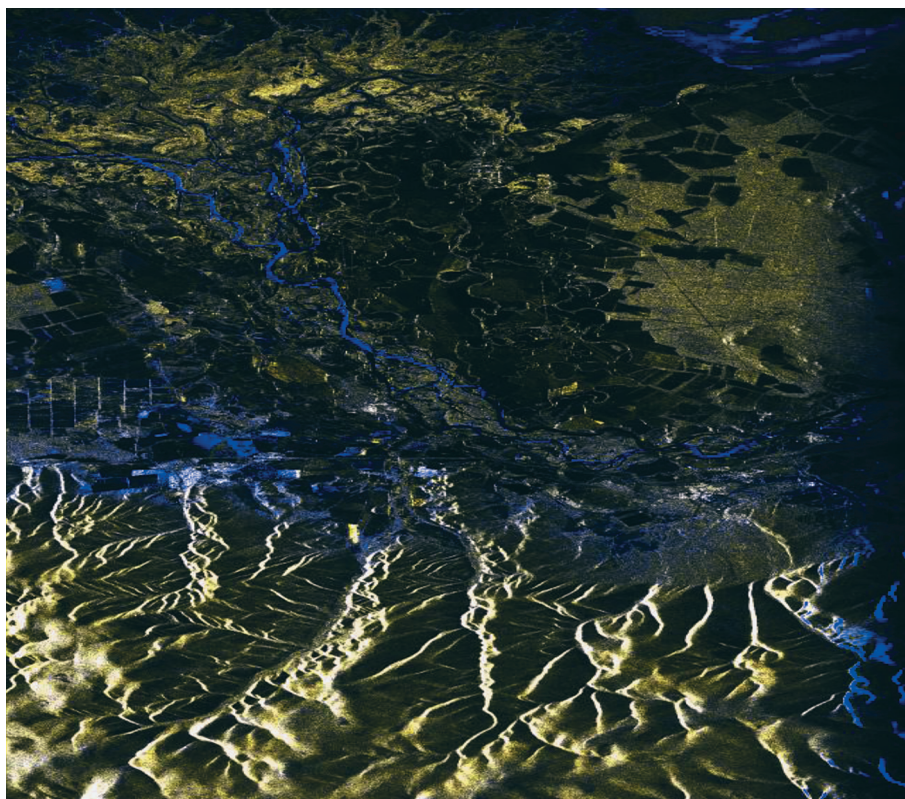


Рис. 1. Изменения состояния земных покровов с 28 сентября по 13 ноября 2006 г.

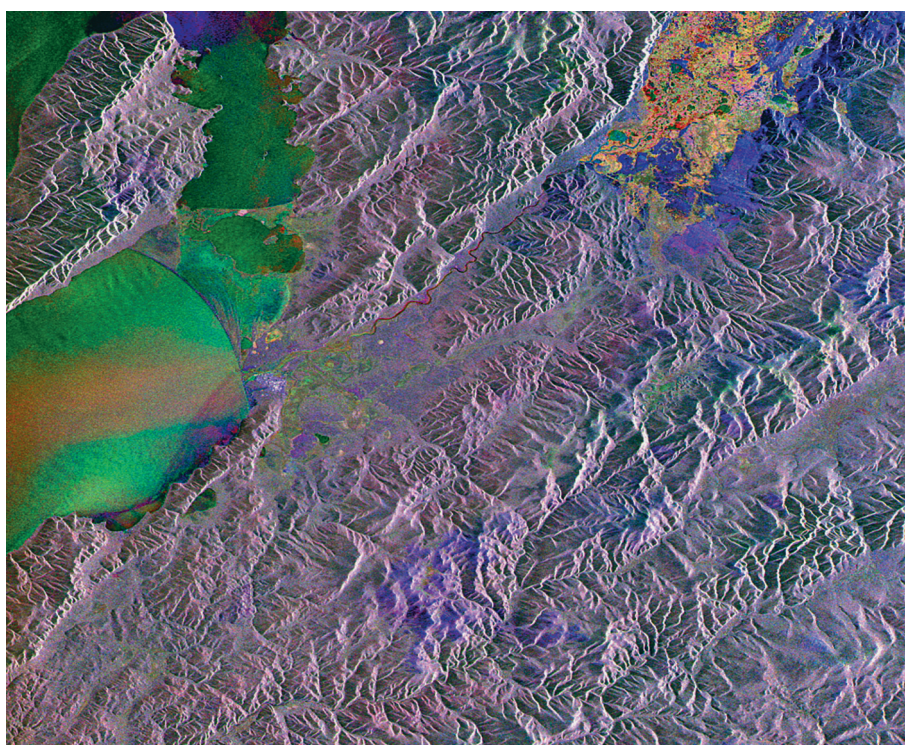


Рис. 2. Разновременное изображение района Баргузинской долины по данным радара ERS (R = 1997/10/11; G = 1998/06/13; B = 1998/07/18).



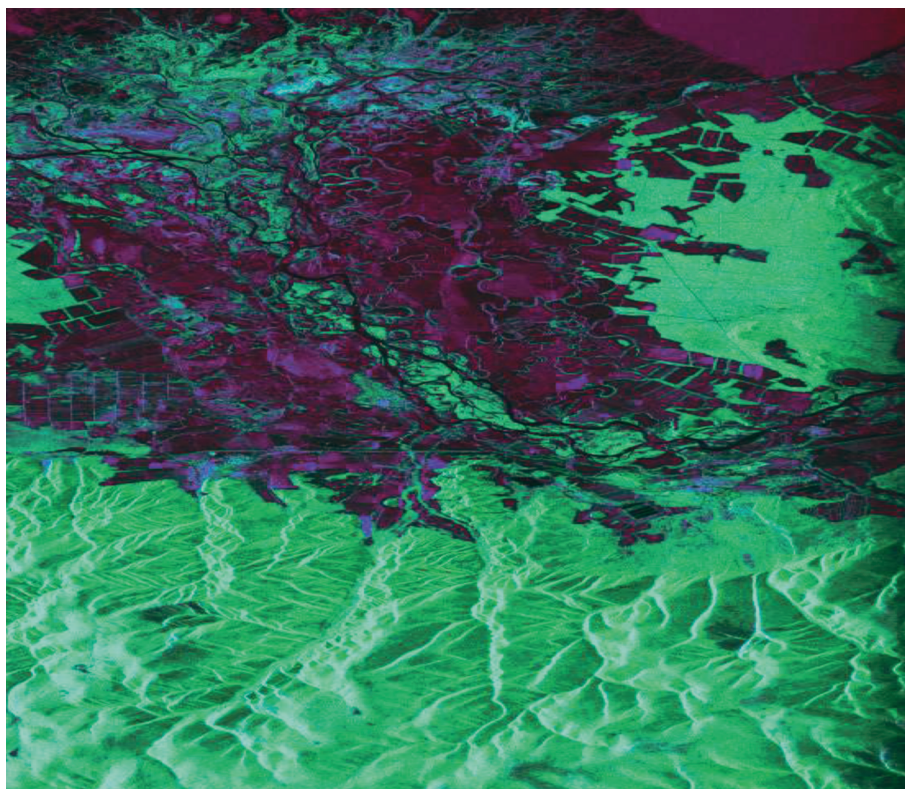


Рис. 3. НН-HV композит. $R = (НН - HV)/(НН + HV)$; $G = HV$; $B = НН$.

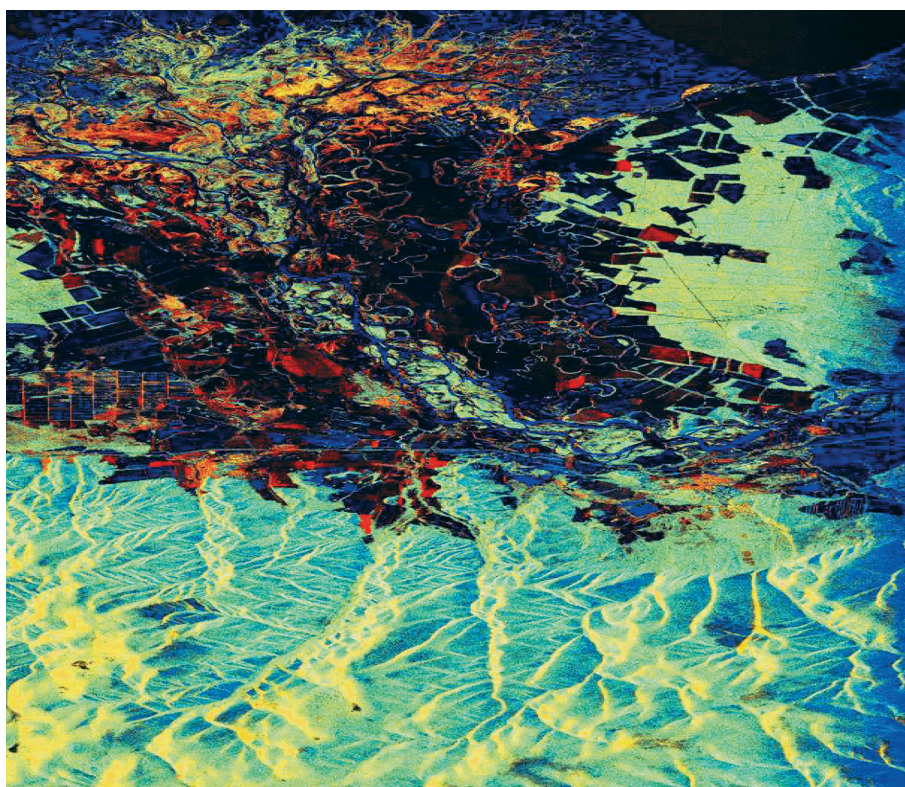


Рис. 4. НН-HV композит. $R = НН$; $G = HV$; $B = \arctg (HV/НН)$.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА № 5, 2014 (Вклейка к ст. Дмитриева А.В. и др.)



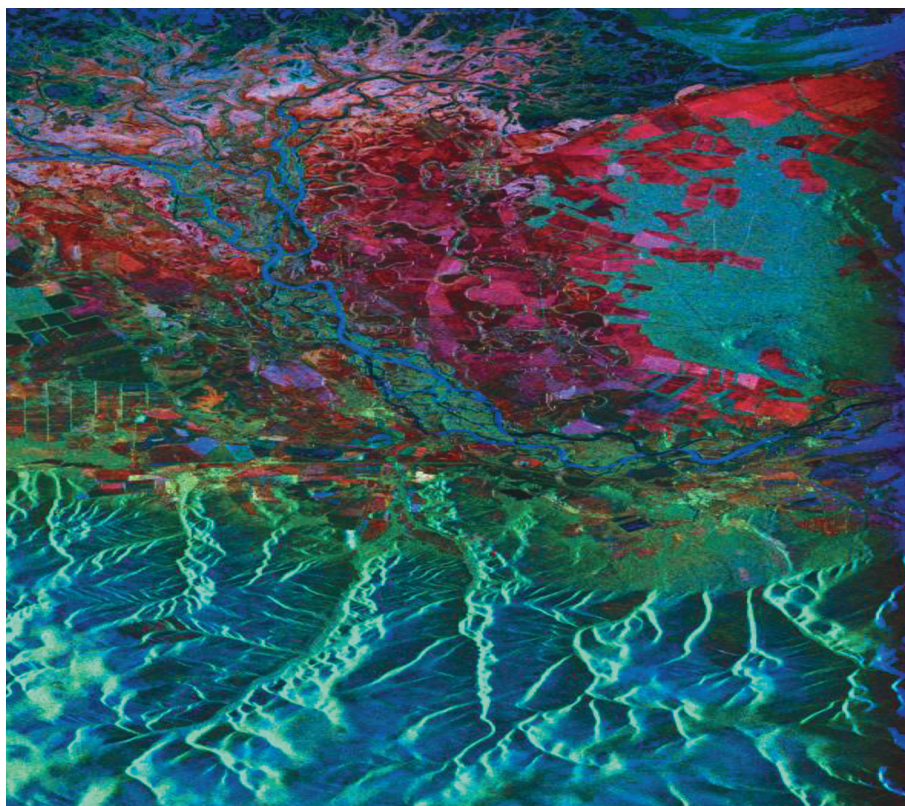


Рис. 5. Композит когерентности и амплитудных изображений.

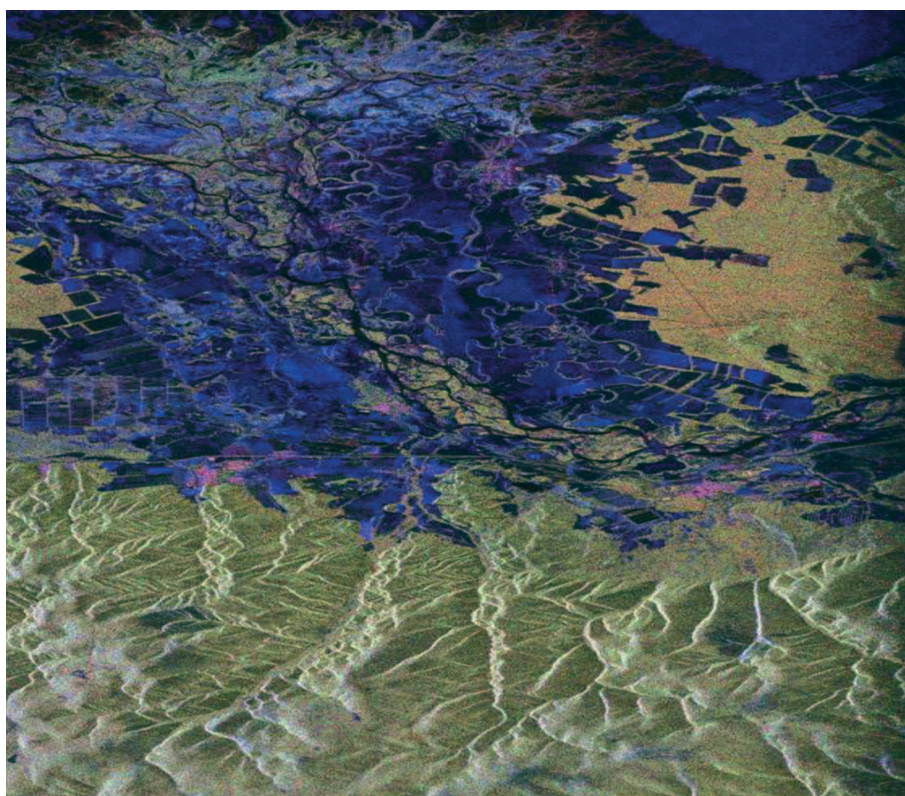


Рис. 6. Преобразование Паули.

