2. Зинченко О.Н. Беспилотный летательный аппарат: применение в целях аэрофотосъемки для картографирования (часть 1). 2013. (<http://www.racurs.ru>).
3. Петров М.В. Практический опыт использования БПЛА SWINGLET CAM // Геопрофи. 2013, №2, – С. 62-64 (<http://www.gpscom.ru/files/publication/60-62.pdf>).
4. Сечин А.Ю., Дракин М.А., Киселева А.С. Беспилотный летательный аппарат: применение в целях аэрофотосъемки для картографирования (часть 2). 2013. (<http://www.racurs.ru>).
5. Трубников Г.В. Применение беспилотных летательных аппаратов в гражданских целях. 2013. (http://uav.ru/articles/civil_uav_th.pdf).
6. Grenzdörffer G.J., Engelb A., Teichert B. THE PHOTOGRAMMETRIC POTENTIAL OF LOW-COST UAVs IN FORESTRY AND AGRICULTURE // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B1. Beijing 2008, p.78-84.
7. <http://ftp.sovzond.ru/>

Опыт обработки радиолокационных данных в интересах географического картографирования

Е.А. Балдина, К.А. Трошко

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет
г. Москва, Россия*

Experience of radar data processing for geographic mapping

E.A. Baldina, K.A. Troshko

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of geography
Moscow, Russia*

Abstract. New synthetic aperture radar (SAR) systems suggest new potentials for the environmental studies and mapping due to high spatial resolution, various beam modes and the full polarization mode. Current level of imaging radar development together with amount and quality of acquired data require users to better understand the processes of radar image generation, which depends on both technical parameters of synthetic aperture radar imaging system and territory features. Some experiments with different radar data were conducted to estimate the methods of radar data processing and geographical interpretation of results for environmental research. The radar data acquired by Radarsat-1, -2 and ALOS PALSAR were used for research and mapping of agricultural lands in the Volga river delta and Stavropol region, forest cuts in Tver region. Results of the experiments are represented as visual aid that explains some of the radar imagery basics, and contains examples of images processing and interpretation.

Введение. В последние годы наблюдается активное развитие радиолокационных (РЛ) методов дистанционного зондирования Земли: достигается метровое и субметровое пространственное разрешение изображений, проводится съёмка в разных диапазонах спектра радиоволн, увеличивается количество съёмочных режимов, в том числе и в нескольких (двух или четырёх) поляризациях одновременно. Разработано множество алгоритмов преобразования радиолокационных данных, позволяющих получать производные изображения, выявляющие отдельные характеристики объектов местности. При этом вопросы комплексной географической интерпретации получаемых результатов зачастую остаются в стороне.

Эффективное использование радиолокационных данных требует как понимания процессов формирования радиолокационных изображений, так и знания особенностей местности, которые могут на них проявляться, поскольку на вид РЛ изображения оказывают влияние диэлектрические свойства и шероховатость зондируемой поверхности – характеристики, не видимые на снимках в видимом диапазоне.

В лаборатории аэрокосмических методов кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ проводятся работы с данными радиолокационных съёмок со спутников, основная цель которых – исследование возможностей их географической интерпретации при картографировании природных и хозяйственных объектов.

В работе на примере решения нескольких географических задач рассмотрены различные варианты преобразования РЛ изображений, полученных разными съёмочными системами и охватывающих участки различных регионов России. Ниже представлены основные этапы проделанной работы и охарактеризованы полученные результаты. Для обработки данных использованы программы SARscape (разработка SARmap, Швейцария) и Next ESA SAR Toolbox (разработка ESA – Европейского космического агентства).

Используемые данные. В работе использованы данные космических радиолокаторов с синтезированной апертурой (PCA) RADARSAT-2, RADARSAT-1 и ALOS PALSAR (таблица 1).

Данные RADARSAT-2 на территорию дельты Волги предоставлены компанией «Совзонд» в 2011 году в рамках конкурса в поддержку идей по использованию радиолокационных данных ДЗЗ для решения задач в различных областях народного хозяйства. Предполагалось получение архивных данных на период со второй половины мая по август 2008-2010 гг. или заказ новой съёмки. Несмотря на то, что предпочтение было отдано весенне-летнему периоду, съёмка проводилась осенью 2011 года. Основные параметры съёмки были определены компанией-поставщиком данных. Получено три разновременных снимка, полностью охватывающих территорию дельты, а также один поляриметрический снимок (полученный одновременно в четырёх поляризациях: HH, HV, VH, VV), охватывающий участок западного ильменно-бугрового района дельты.

Заказ съёмки RADARSAT-1 на территорию дельты Волги на весенне-летний период 2012 года выполнялся через Геопортал МГУ. Три снимка получены при горизонтальной поляризации, имеют разный пространственный охват и разрешение.

Данные ALOS PALSAR предоставлены Научным центром оперативного мониторинга Земли ОАО «Российские космические системы» для работы во время летней научно-производственной практики. Две интерферометрические пары снимков на участок в Тверской области получены в зимний период 2006-2008 гг., одна пара снимков на участок в Ставропольском крае - летом 2009 года.

Таблица 1. Характеристика используемых радиолокационных данных

Съёмочная система	RARARSAT-2		RARARSAT-1		ALOS PALSAR	
Территория	Дельта Волги				Ставропольский край	Тверская область
Дата съёмки	11.09.2011 05.10.2011 29.10.2011	11.09.2011	30.04.2012	17.05.2012	21.06.2009 06.08.2009	24.12.2006 08.02.2007 27.12.2007 11.02.2008
Режим съёмки	Wide Fine	Wide-Fine QuadPol	Standard	ScanSAR Narrow	FBD (Fine Beam Dual)	FBS (Fine Beam Single)
Поляризация	VV, VH	HH, HV, VH, VV	HH		HH, HV	HH
Размер пиксела, м	6,25 x 6,25	4,6 x 12	25 x 25	50 x 50	3,1 x 15	3,1 x 7,5
Охват, км	170 x 150	50 x 25	100 x 100	300 x 180	70 x 60	70 x 60

Наряду с радиолокационными использовались и оптические снимки ТМ и ЕТМ+ со спутников Landsat-5 и -7 относительно высокого разрешения, детальные снимки из открытых Интернет-источников (Google, Яндекс карты).

В качестве дополнительной информации использовались данные наземных обследований (точки с координатной привязкой, описания ландшафтов и их фотографии) и составленные по ним картографические материалы, а также сведения о метеорологической обстановке на момент съёмки, полученные из архивов погоды. Привлечение дополнительных материалов повышает достоверность интерпретации как исходных радиолокационных снимков, так и промежуточных результатов их обработки.

Предварительная обработка РЛ снимков. Первичные радиолокационные данные характеризуются яркостными и геометрическими искажениями, в связи с чем для их дешифрирования проводятся различные виды предварительной обработки.

Для радиолокационных снимков характерно наличие спекл-шума – хаотичного чередования тёмных и светлых пикселей, вызванного интерференцией радиоволн, рассеянных от земной поверхности. Для уменьшения уровня спекл-шума применялись различные фильтры (Mean, Frost, Lee и др.).

Комплексные радиолокационные изображения, включающие амплитудную и фазовую компоненты, состоят из пикселей, горизонтальный и вертикальный размеры которых, как правило, не совпадают (разрешение по направлению движения космического аппарата – азимуту – выше, чем по направлению съёмки – дальности, что приводит к вытянутости изображения в азимутальном направлении). Приведение горизонтального и вертикального размеров пиксела к стандартному виду осуществлялось с использованием операции некогерентного накопления (Multilooking) с заданием коэффициентов "усреднения". Стоит отметить, что при выполнении этой операции некоторое снижение пространственного разрешения сопровождается уменьшением уровня спекл-шума.

Разновременные изображения, полученные при идентичных параметрах съёмки через интервал времени, кратный периоду повторения трассы полёта (RADARSAT-2 – 24 дня, ALOS PALSAR – 46 дней), были взаимно пространственно согласованы для дальнейшей совместной обработки с использованием операции автоматической корегистрации.

Для трансформирования снимков в картографическую проекцию использовалась операция геокодирования. Вся привязка осуществлялась по орбитальным данным, для территории Ставропольского края и Тверской области дополнительно использовалась цифровая модель рельефа SRTM.

Тематическая обработка РЛ снимков. Дальнейшая обработка радиолокационных снимков была направлена на извлечение из них тематической информации, различной в зависимости от исследуемой территории:

- определение степени деградации (зарастание кустарниковой растительностью, иссушение почв) заброшенных сельскохозяйственных земель – залежей, и выявление территорий, заливаемых во время половодья (дельта Волги);
- мониторинг состояния обрабатываемых сельскохозяйственных угодий (Ставропольский край);
- выявление вырубленных участков леса (Тверская область).

Используемые методы преобразования снимков – как классические (создание многоканальных изображений, их кластеризация и классификация), учитывающие яркостные характеристики (амплитуду сигнала), так и специфические для радиолокационных данных, опирающиеся на наличие фазовой составляющей (когерентность интерферометрической пары снимков) и возможность съёмки одновременно в нескольких поляризациях (поляриметрическая декомпозиция и классификация). Ниже рассмотрены некоторые особенности преобразований и полученные результаты.

Преобразование весенних снимков RADARSAT-1 на территорию дельты Волги с целью выявления залитых водами половодья площадей заключалось в создании цветных синтезированных снимков. В RGB-каналах использовались изображения, полученные после проведения фильтрации амплитудных составляющих с применением высоко- и низкочастотных фильтров. Низкочастотная компонента позволяет выделить участки изображения, на которых отсутствуют значительные вариации яркости, то есть однородные территории (водные поверхности, сельскохозяйственные поля). Высокочастотная компонента выявляет участки изображения с резкими перепадами значений яркости, подчеркивает границы контрастных объектов, содержит информацию о текстуре изображения. Созданные цветные синтезированные изображения позволили подчеркнуть различия между такими объектами местности, как обвалованные (ограждённые дамбами от половодья) и необвалованные территории, выделить объекты гидрографии (в том числе залитые половодьем участки), населённые пункты и густую естественную растительность (прибрежные тростниковые заросли, ивовые леса вдоль рек и проток).

Основной способ обработки многовременных данных RADARSAT-2 с целью выявления залежей и определения их состояния – создание цветных синтезированных амплитудных изображений. Цветовой синтез многовременных снимков позволяет выделить изменения, происходящие на территории в охваченный снимками период. Преобладание того или иного цвета позволяет судить о вкладе каждого из трёх разновременных изображений. Поскольку залежи не подвергаются хозяйственному воздействию и представляют собой относительно стабильные участки местности, можно предположить, что вклад каждого изображения при синтезе будет приблизительно одинаковым, что должно обеспечить им серый цвет на синтезированном снимке. В нашем случае разновременные снимки охватывали осенний период продолжительностью в 48 дней, поэтому обрабатываемые в текущем году земли оказались на многовременном снимке разноцветными из-за того, что в каждый из моментов съёмки какие-то из полей оказались обработанными.

Сопоставление синтезированных изображений, полученных за три срока съёмки, с наземными данными и оптическими снимками позволяет уверенно выделить необрабатываемые в текущем году участки сельскохозяйственных земель и непосредственно судить об их состоянии по цветному радиолокационному изображению. Так, лишённые растительности залежи представляют собой выровненные сухие поверхности, обратный сигнал от которых имеет низкие значения. Таким образом, на синтезированном изображении залежи такого вида отображаются тёмными цветами (рис. 1а). Заросли кустарника на залежах отображаются в виде ярких пятен на более тёмном фоне (рис. 1б). На некоторых относительно недавно заброшенных сельскохозяйственных землях в виде ярких полос (заросли тростника и рогоза в оросительных каналах) читаются границы полей (рис. 1в).

Рис. 1. Изображение залежей на многовременном снимке RADARSAT-2, поляризация HV

Метод, используемый для обработки поляриметрических данных RADARSAT-2 с целью характеристики состояния залежей, – поляриметрическая декомпозиция – позволяет получить информацию о физических механизмах рассеяния (однократном, двукратном и объёмном) радиолокационного сигнала

различными видами объектов [Дарижапов, 2010]. Опробовано два варианта декомпозиции: 1) Паули и 2) Клода-Поттье.

В первом случае результатами обработки исходных радиолокационных поляризметрических (полученных одновременно при разных поляризациях посланного и принятого радиосигнала) данных являются три изображения, представляющие их комбинации, которые характеризуют механизмы рассеяния: 1) HH+VV - однократное, 2) HH-VV - двукратное, 3) HV+VH - объёмное. Из этих комбинаций составлено цветное синтезированное RGB-изображение (R: 2, G: 3, B: 1), фрагмент которого приведен на рис. 2а. Синтезированное изображение позволяет визуальнo выделять группы объектов, сходных по преобладающему механизму рассеяния. Так, синим цветом выделяются плоские поверхности, дающие однократное отражение, т.е. водные объекты и участки, практические лишённые растительного покрова (бэровские бугры, залежи без растительности). Жёлто-розовый цвет имеют участки с преимущественно двукратным отражением, т.е. населённые пункты, ивовые леса вдоль рек и тростниковые заросли по берегам ильменей. Оттенками зелёного цвета изображаются объекты с выраженным объёмным рассеянием сигнала, которым соответствуют участки, в разной степени покрытые растительностью. Неконтролируемая классификация этого протзводного изображения композита позволила с высокой степенью достоверности

Рис. 2. Декомпозиция Паули: а - синтезированное изображение, б - результат его кластеризации

автоматически выделить эти объекты при задании 4 классов (рис. 2б).

Во втором случае – декомпозиция Клода-Поттье – осуществляется преобразование поляризметрических данных путем их разложения на три компоненты, получивших названия энтропия (Н), альфа (α) и анизотропия (А). Энтропия характеризует степень хаотичности рассеяния, принимает значения от 0 до 1. Чем выше значение этого параметра, тем сложнее дифференцировать объекты местности друг от друга. Основной параметр, характеризующий преобладающий механизм рассеяния, – альфа, принимающий значения от 0° до 90° . Значения α , близкие к 0° , соответствуют рассеянию от плоской поверхности, к 45° – объёмному рассеянию, а к 90° - двукратному рассеянию. Анизотропия – дополняющий энтропию показатель, характеризующий вклад объёмного и двукратного механизмов рассеяния. [Lee, Pottier, 2009]. Полученные в результате этого преобразования изображения оказались недостаточно информативными для рассматриваемой территории и имеющегося комплекта поляризметрических данных. Опробованный алгоритм неконтролируемой классификации изображений параметров Н и α не дал удовлетворительного результата, что в нашем случае свидетельствует об ограниченной применимости этого метода для такой территории, как участок ильменно-бугрового района дельты Волги.

Интерферометрические пары РЛ изображений ALOS PALSAR применялись для создания разновременных изображений, используемых как для отработки методов мониторинга состояния обрабатываемых сельскохозяйственных угодий, так и для выявления вырубленных участков леса. Этот вид данных позволяет использовать не только амплитудную, но и фазовую составляющую радиолокационного сигнала. Особым компонентом здесь является изображение когерентности, характеризующее степень сходства пары снимков. Когерентность принимает значения от 0 до 1 и предоставляет сведения об изменениях объектов местности. Низкие значения когерентности (тёмные участки изображения) характеризуют существенные изменения, в том числе и исчезновение объектов, высокие значения (светлые участки) характеризуют стабильные объекты.

Использовался метод выявления изменений посредством создания многовременных синтезированных изображений с когерентностью [Бритти и др., 2012]:

- R: амплитудная составляющая первого радиолокационного снимка;
- G: амплитудная составляющая второго радиолокационного снимка;
- B: изображение когерентности пары интерферометрических снимков.

Такие изображения позволяют выявлять не только различные классы объектов, но и произошедшие на территории изменения. Как правило, населенные пункты (объекты без видимых изменений) на них отображаются белым цветом, водные объекты – темно-синим, практически черным, покрытые густой

растительностью территории – желто-зеленые, участки без растительности – синие, объекты, претерпевшие существенные изменения за период между съемками интерферометрической пары снимков, изображаются красным цветом.

На рис. 3а представлен цветной синтезированный снимок на залесённый участок в Тверской области, который составлен из снимков двух сроков съемки – 24.12.2006 и 08.02.2007, с использованием в одном из каналов изображения когерентности (различия между снимками двух сроков). На рис 3б приведен снимок, созданный по тому же принципу, но из снимков, полученных 27.12.2007 и 11.08.2008. На каждом из этих цветных изображений наиболее отчетливо выделяется населённый пункт (белый цвет), леса (преимущественно жёлто-зеленый), безлесные участки (синий). Сравнение (рис. 3). двух композитов позволило выявить участок леса, вырубленный за период между 8.02.2007 и 27.12.2007. На более позднем по срокам съёмки цветном изображении новой вырубке соответствует отмеченный красным полигоном участок.

Рис. 3. Многовременные композиты с когерентностью: а - 24.12.2006-08.02.2007; б - 27.12.2007-11.08.2008, красным полигоном обозначен участок леса, вырубленный между 08.02.2007 съемками

Аналогичные цветные синтезированные изображения с когерентностью, составленные для участка в Ставропольском крае из снимков от 21.06.2009 и 06.08.2009, позволяют дифференцировать сельскохозяйственные угодья, находящиеся в разном состоянии: поля под паром (окрашены в синий), после полива или вспашки (тёмно-зелёный), с активно вегетирующими сельскохозяйственными культурами (ярко-зелёный) и с убранным урожаем (красный).

Дешифрирование и оформление результатов обработки. На основе опыта обработки радиолокационных данных и известной технологической схемы дешифрирования, разработанной для снимков видимого диапазона [Лабутина, 2004], для извлечения географической информации из радиолокационных снимков и производных изображений предложена схема процесса их обработки (рис. 4).

Рис. 4. Технологическая схема дешифрирования РЛ изображений

Накопленный опыт работы с РЛ снимками показывает целесообразность упорядочения полученных знаний и проведённых экспериментов в виде справочно-наглядного пособия, предназначенного для ознакомления географов различных специальностей с современными космическими радиолокационными данными, методами их обработки и возможностями получения полезных для географических исследований результатов на примерах решения конкретных задач

Пособие включает следующие разделы:

- **Теоретический:**

- основные понятия и принципы радиолокационной съёмки (длины волн, поляризации, геометрия съёмки, режимы работы космических радиолокаторов с синтезированной апертурой и др.);
- свойства объектов, влияющие на формирование радиолокационных изображений (диэлектрические свойства и шероховатость, механизмы рассеяния радиоволн);
- особенности радиолокационных изображений (спекл-шум, яркостные и геометрические искажения, обусловленные рельефом местности) и примеры снимков, полученных разными съёмочными системами при разных параметрах съёмки.

- **Практический:**

- основные этапы предварительной обработки данных;
- получение производных изображений, информативных с точки зрения решения различных географических задач, и их тематическая интерпретация (на примере экспериментов, часть которых рассмотрена выше).

В случае решения каждой задачи представлен исходный радиолокационный снимок с указанием основных параметров съёмки, основные этапы его преобразования и конечный результат, являющийся собственно материалом для дешифрирования. Для наиболее репрезентативных фрагментов изображений составлены схемы дешифрирования. Дано пояснение влияния физико-географических особенностей местности на характер рассеяния радиолокационного сигнала и формирование изображения. В качестве дополнительного материала для наглядного представления особенностей дешифрируемых объектов использованы снимки видимого диапазона и фотографии, полученные во время наземных обследований территории.

Авторы благодарят компанию "Совзонд" и Научный центр оперативного мониторинга Земли ОАО "Российские космические системы" за предоставленные данные и программное обеспечение. Работа выполнена в рамках Программы поддержки ведущих научных школ РФ (НШ-2248.2014.5).

Библиографический список

1. Бритти Ф., Джентиле В., Кантемиров Ю.И. и др. Новый продукт MTC, рассчитываемый по данным COSMO-SkyMed // Геоматика. 2012. №1, с. 46-51.
2. Дарижапов Д.Д., Кирбижекова И.И., Ширеторов И.Д. и др. Обработка данных ALOS – PALSAR по Байкальской природной территории декомпозиционными методами // Журнал радиоэлектроники. 2010. № 10, с. 95-102.
3. Лабутина И.А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. Учебное пособие для студентов вузов. М: Аспект Пресс, 2004, 184 с.
4. Lee J.-S., Pottier E., Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications. CRS Press, 2009, 440 p.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗНОВРЕМЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ В ТЕПЛОМ ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ (НА ПРИМЕРЕ ВУЛКАНА МЕНДЕЛЕЕВА)

М.Ю. Грищенко¹, Р.Н. Сабиров²

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра картографии и геоинформатики
Москва, Россия, *m.gri@mail.ru*

² ИМГиГ ДВО РАН, лаборатория островных экологических проблем
Южно-Сахалинск, Россия, *renat@imgg.ru*

USING OF THE MULTITEMPORAL THERMAL INFRARED SATELLITE IMAGERY FOR NATURAL AREAS MAPPING (CASE OF MENDELEEV VOLCANO)

M.Y. Grishchenko¹, Sabirov²

¹ M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,
Cartography and Geoinformatics Department
Moscow, Russia, *m.gri@mail.ru*

² Marine Geology and Geophysics Institute, Far East Branch of Russian Academy of Sciences,
Insular Environmental Problems Laboratory
Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, *renat@imgg.ru*

Abstract. In the paper authors examine the mountain group of Mendelev volcano situated on the Kunashir island, Kuril archipelago, Russia. Ground observations were led to examine the vegetation cover of the area as well as its typical landscapes. The other type of used data is Landsat imagery. Images were combined into multitemporal