

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ SENTINEL-1 И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ДЕШИФРИРОВАНИЯ ФОРМ РЕЛЬЕФА ОСТРОВА КОТЕЛЬНЫЙ

©2016 Е.А. Балдина, К.А. Трошко, Н.Р. Николаев

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия

baldinaea@yandex.ru, troshko_ka@ntsomz.ru, nikolaevnikita@mail.ru

Аннотация. Приводится краткий обзор характеристик данных Европейского космического аппарата Sentinel-1A с радиолокатором С-диапазона на борту, выведенного на орбиту весной 2014 г., обозначены уровни обработки данных и основные области их применения. Получаемые данные с осени 2014 г. бесплатно распространяются с сайта Европейского космического агентства вместе с программным обеспечением для обработки материалов радиолокационной съёмки — Sentinel-1 Toolbox. Охарактеризованы возможности этого программного пакета. На примере труднодоступной малоизученной территории острова Котельный продемонстрированы этапы преобразования исходных радиолокационных данных в пригодные для визуального и автоматизированного дешифрирования снимки, которые могут быть использованы для картографирования современного рельефа территории.

Ключевые слова: космические радиолокационные снимки, Sentinel-1, обработка данных, остров Котельный

SENTINEL-1 RADAR DATA AND THEIR PROCESSING CAPABILITIES FOR RELIEF FEATURES INTERPRETATION OF KOTELNY ISLAND

©2016 Baldina E., Troshko K., Nikolaev N.

Lomonosov Moscow State University, Russia

baldinaea@yandex.ru, troshko_ka@ntsomz.ru, nikolaevnikita@mail.ru

Abstract. European Sentinel-1A satellite with C-band synthetic aperture radar onboard was launched in spring 2014. Since autumn 2014 Sentinel-1A data has been available free of charge together with a free software for data processing Sentinel-1 Toolbox. Brief description of Sentinel-1A data parameters and processing levels are given. Capabilities of Sentinel-1A toolbox are characterized and the main data application areas are defined. As an example several methods for amplitude Sentinel-1A data preparing for visual and automatic interpretation are shown applying to a remote Arctic region of Kotelnny island.

Keywords: satellite radar images, Sentinel-1, data processing, Kotelnny island

Введение. Хорошо известны достоинства радиолокационной (РЛ) съёмки: возможность получения изображений местности в условиях постоянной облачности, независимо от внешнего освещения, предоставление информации о физических свойствах поверхности. Однако реализация этого вида съёмки долгое время опережала использование получаемых данных в научных и практических целях, особенно для тематического картографирования. Причины этого — недостаточная осведомленность географов об информационных возможностях РЛ съёмки, высокая стоимость данных в сочетании с ограниченной доступностью специализированных программ для их обработки, сложность их дешифрирования [1]. Отмеченная недостаточность подготовки отраслевых специалистов, в частности, в сельском или лесном хозяйстве, в области обработки и использования радиолокационных данных обусловила необходимость внедрения готовых базовых продуктов,

созданных на их основе [2]. Многочисленные примеры успешного решения широкого спектра отраслевых задач наук о Земле с помощью радиолокационных данных [3], распространение программных средств их обработки (в том числе открытых), демонстрационных наборов данных и обучающих материалов обуславливают актуальность более широкого использования этого вида данных и при обучении в вузах.

С 2014 г. в свободном доступе появились радиолокационные данные с европейского спутника Sentinel-1A, которые открывают широкие возможности для географических исследований и использования их в образовательных проектах. На портале программы «Коперник» [4] приведены следующие области применения данных радиолокатора спутника Sentinel-1A:

наблюдение за морской поверхностью, включая мониторинг морских льдов и ветра, загрязнений, обнаружение судов;

Таблица 1

Режимы съёмки радиолокатора КА Sentinel-1A

Режим	Ширина полосы захвата, км	Пространственное разрешение (без дополнительной обработки), м	Поляризация (H – горизонтальная; V – вертикальная)
Stripmap (SM) – маршрутный	80	5×5	HH, VV, HH+HV, VV+VH
Interferometric Wide Swath (IW) – интерферометрический широкозахватный	250	5×20	HH, VV, HH+HV, VV+VH
Extra-Wide Swath (EW) – сверх-широкозахватный	400	20×40	HH, VV, HH+HV, VV+VH
Wave (WV) – волновой	20×20	5×5	HH, VV

наблюдение за поверхностью суши, в первую очередь за объектами сельского и лесного хозяйства, за деформациями поверхности и сооружений в населённых пунктах;

мониторинг чрезвычайных ситуаций, таких как наводнения, землетрясения, оползни и извержения вулканов.

Перечень задач может быть существенно расширен благодаря возможностям получения этих данных независимо от погодных условий и солнечного освещения. В первую очередь видится перспективным их использование для картографирования и мониторинга приполярных территорий, где значительную часть года наблюдается полярная ночь, а короткий бесснежный период сопровождается сильной облачностью, ограничивающей возможности данных оптического диапазона.

Космическая система радиолокационного наблюдения Sentinel-1. В рамках программы глобального мониторинга окружающей среды и безопасности «Коперник» Европейским космическим агентством (ЕКА) разрабатывается серия космических аппаратов (КА) Sentinel [5], оснащённых съёмочной аппаратурой шести видов. 3 апреля 2014 г. на орбиту был выведен первый спутник этой серии Sentinel-1A, осуществляющий радиолокационную съёмку в C-диапазоне (длина волны 5,6 см). Космический аппарат предоставляет возможность повторного наблюдения одного и того же участка местности с одинаковыми геометрическими характеристиками съёмки, позволяющими проводить интерферометрическую обработку через 12 дней. После запуска в 2016 г. второго аналогичного аппарата Sentinel-1B частота повторения съёмки участка в одинаковой геометрии сократится до 6 дней.

Радиолокатор КА Sentinel-1A функционирует в четырёх режимах, различающихся тех-

нологией съёмки, шириной полосы захвата, пространственным разрешением получаемых изображений и возможностями съёмки в разных поляризациях (табл. 1).

Принцип проведения съёмки в разных съёмочных режимах схематично показан на рис. 1. Отметим, что съёмка ведётся перпендикулярно к направлению пути только с правого борта.

В маршрутном режиме (StripMap) обеспечивается непрерывная съёмка территории в пределах полосы шириной 80 км в одном из шести диапазонов углов. Съёмка в этом режиме, обеспечивающем получение данных с наилучшим пространственным разрешением (5×5 м), используется только при чрезвычайных ситуациях.

Широкозахватный интерферометрический режим (Interferometric Wide Swath — IW) реализуется при использовании технологии съём-

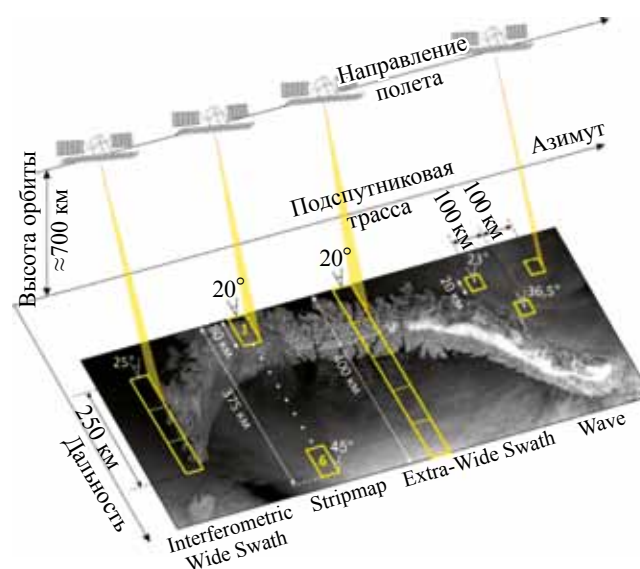


Рис. 1. Режимы съёмки радиолокатора КА Sentinel-1A.

Изображение архипелага Новая Земля составлено в программе Sentinel-1 Toolbox из трёх снимков Sentinel-1A, полученных 04.10.2014 в режиме EW

ки TOPSAR (Terrain Observation with Progressive Scans SAR), являющейся разновидностью широкозахватного режима ScanSAR. В основе этой технологии лежит переключение зондирующего луча не только в направлении дальности, но и его перемещение вперёд и назад в азимутальной плоскости (рис. 2). За счёт съёмки в трёх рядах (sub-swaths) по дальности обеспечивается полоса захвата шириной 250 км. Режим IW является основным для съёмки поверхности суши.

Сверх-широкозахватный режим (Extra-Wide Swath – EW), как и режим IW, использует технологию съёмки TOPSAR, однако, за счёт съёмки не трёх, а пяти рядов в направлении дальности, ширина полосы захвата увеличивается до 400 км. Режим EW предназначен, главным образом, для наблюдения за полярными областями, морским льдом, отдельными участками Мирового океана в целях мониторинга загрязнений и решения других задач.

В волновом режиме Wave (WV) съёмка осуществляется поочерёдно в ближней (при

угле падения излучения 23°) и дальней ($36,5^\circ$) зонах. При этом формируются кадры размером 20×20 км, а расстояние между кадрами, полученными в одной зоне, составляет 200 км. Этот режим предназначен для съёмки Мирового океана.

Отметим, что возможность съёмки Sentinel-1A на заказ отсутствует. Перед началом очередного 12-дневного цикла на сайте [5] появляется программа съёмки (observation scenario), формируемая ЕКА, в которой выделены регионы земного шара, по которым будет проводиться съёмка с обозначением ее параметров (рис. 3). На постоянной основе проводится съёмка ограниченного числа участков, среди них: Европа; Восточно-Африканский разлом; горная система Кордильер и некоторые другие. Что касается покрытия снимками Sentinel-1A России, то регулярная съёмка осуществляется вдоль северной её границы (включая поверхность суши и моря), по территории гор Северо-Восточной Сибири, Камчатки, Станового хребта, окрестностей Байкала, Кавказа, юга европейской части. К настоящему моменту времени радиолокационная съёмка по остальным участкам России проводилась в периоды с 3 по 27 апреля и с 18 сентября по 12 октября 2015 г.

Возможности получения данных Sentinel-1A. Продукты разных уровней начальной обработки, формируемые на основе данных Sentinel-1A, распространяются через веб-портал Sentinel Data Hub [6]. В архиве представлены данные с октября 2014 г.

Продукт самого низкого (нулевого) уровня обработки — RAW (радиоголограмма) — «сырые» данные, требующие специальной обработки, называемой фокусировкой. Через архив предоставляются продукты этого уровня для режимов съёмки SM, IW и EW, однако, эти данные невозможно использовать для дешифрирования.

К первому уровню обработки относятся продукты SLC (single look complex) и GRD (ground range detected). Продукт уровня SLC представляет собой комплексные радиолокационные данные (которые содержат и амплитуду, и фазу сигнала), представленные в проекции наклонной дальности. Отличительной особенностью данных этого уровня является то, что они могут быть использованы в интер-

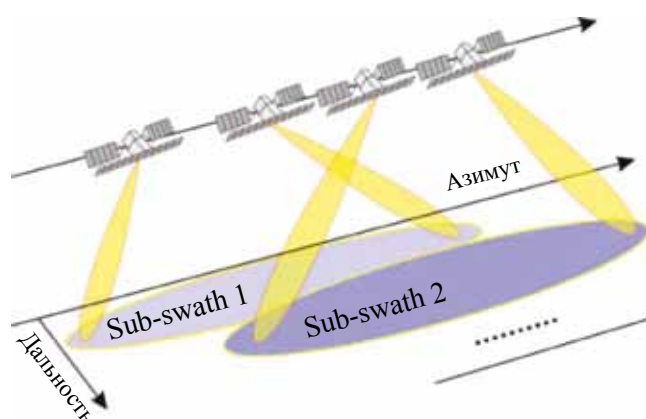


Рис. 2. Технология съёмки TOPSAR

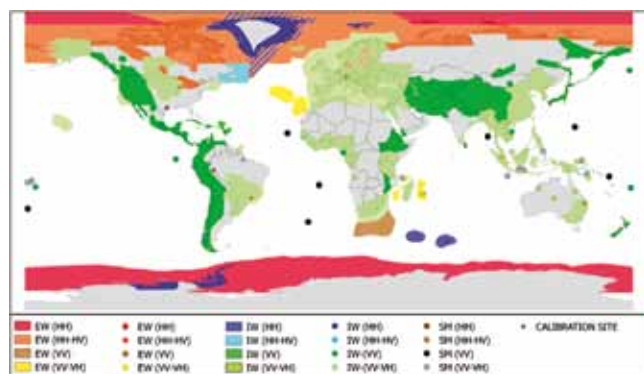


Рис. 3. Программа съёмки *Sentinel-1A* на период 11.12.2015 — 23.12.2015 [4]

Таблица 2

Детальность (размер пиксела) доступных изображений уровня обработки GRD, м

Уровень детальности	Режим съёмки		
	SM	IW	EW
Полный	4×4	—	—
Высокий	10×10	10×10	25×25
Средний	40×40	40×40	40×40

ферометрической обработке для получения информации о высотах и смещениях зондируемой поверхности. Данные SLC могут предоставляться для режимов SM, IW и EW, но в архиве для некоторых регионов этот продукт может и отсутствовать. В силу геометрических особенностей изображений (различного размера пиксела по азимуту и дальности) (рис. 4, а, б) дешифрирование снимков этого уровня обработки затруднено.

Продукт GRD — амплитудное (амплитуда на РЛ изображении — аналог яркости на снимках видимого диапазона) радиолокационное изображение, трансформированное в проекцию наземной дальности (рис. 4, а, в). Следует отметить, что, после трансформирования на наземную дальность, выходные изображения могут предоставляться с разной детальностью (разным размером пиксела): полной (full resolution), высокой (high resolution) или средней (medium resolution) (табл. 2). Такая обработка выполняется для данных, полученных в режимах SM, IW и EW. Данные именно этого уровня — наиболее подходящие для визуального и автоматизированного дешифрирования.

Второй уровень обработки представлен группой продуктов OCN (ocean), содержащих некоторые характеристики поверхности океана. Продукты этого уровня формируются на основе данных, полученных во всех четырёх съёмочных режимах.

Таким образом, при выборе данных Sentinel-1A из архива имеет значение режим съёмки, уровень обработки данных, так как их параметры (охват, разрешение, поляризация, наличие фазы сигнала и т.д.) определяют площадь исследуемой территории, возможность решения задачи, в частности, масштаб картографирования.

Обработка радиолокационных данных в программном комплексе Sentinel-1 Toolbox. На протяжении длительного периода времени ЕКА разрабатывало программное обеспечение для обработки радиолокационных данных. Одновременно с началом поступления данных Sentinel-1A стала доступна и свободно распространяемая программа для их обработки Sentinel-1 Toolbox [7]. Меню этого программного пакета включает операции обработки амплитудных, интерферометрических и поляриметрических РЛ данных, полученных системой Sentinel-1 и другими космическими радиолокаторами. Для расширения круга пользователей на сайте ЕКА [7] представлены

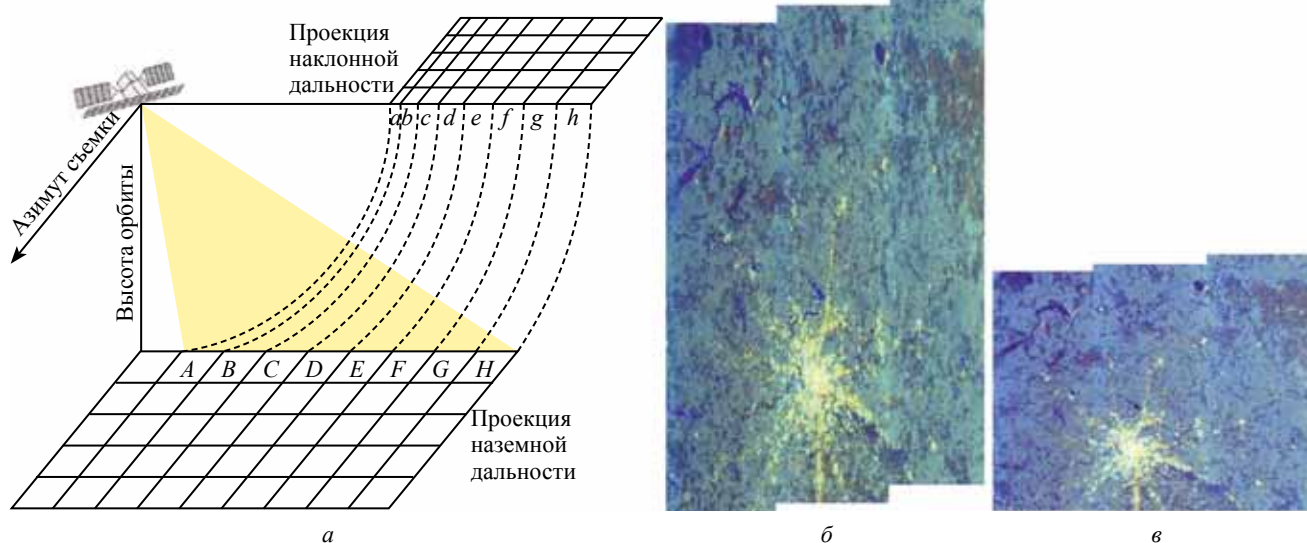


Рис. 4. Наклонная и наземная дальности:

а — схема радиолокационной съёмки; б — г. Москва, амплитудное изображение Sentinel-1A (29.11.2015) в проекции наклонной дальности; в — тот же снимок в проекции наземной дальности

обучающие материалы, посвящённые разным видам обработки РЛ данных в этой программе.

Основные этапы подготовки амплитудных изображений Sentinel-1A к дешифрированию рассмотрим на примере одного из Новосибирских островов — острова Котельный, расположенного между 74–76° с.ш. и 137–145° в.д. В его состав входят три весьма различных части, исторически также получивших названия островов: Котельный (название западной части совпадает с общим наименованием острова), Земля Бунге и остров (полуостров) Фаддеевский. Интерес к этой территории вырос в последние годы в связи с восстановлением военной базы и расширением заповедника «Усть-Ленский». Особую актуальность поэтому приобретает инвентаризационное картографирование острова на основе дешифрирования новых регулярно пополняемых данных радиолокационной съёмки.

Архив материалов Sentinel-1A на исследуемый район содержит большое число снимков (несколько сотен), полученных в основном в режиме EW в двух поляризациях (*HH* и *HV*) и представленных в виде продуктов уровня GRD с размером пиксела 40 м. Поскольку наибольший интерес представляют изображения, полученные в бесснежный период, для обработки и анализа был выбран снимок 3 июля 2015 г.

Рис. 5 представляет окно программы Sentinel-1 Toolbox с исходными снимка-

ми в *HH* (слева) и *HV* (справа) поляризациях. Исходные снимки зеркально отражены (запад — справа, восток — слева), что связано с порядком нумерации пикселей при съёмке на нисходящем витке. Ориентация изображения меняется с помощью операции Flip из меню Utilities.

Неравномерность яркости на исходных снимках обусловлена разной интенсивностью принятого сигнала для участков ближней и дальней от радиолокатора зонах. Обычно для устранения неравномерности яркости, связанной с геометрией съёмки, применяют операцию радиометрической нормализации, которая выполняется одновременно с ортотрансформированием снимков (операция Terrain Correction из меню SAR Processing-Geometric).

При детальном рассмотрении изображений отчётливо видна зернистость (спекл-шум), свойственная всем радиолокационным снимкам. Как правило, для автоматизированного дешифрирования спекл-шум стремятся уменьшить, применяя разнообразные фильтры (операция Speckle Filtering из меню SAR Processing), сглаживающие изображение (рис. 6). Поскольку вместе с этим применение фильтров снижает уровень детальности, при выборе параметров фильтрации приходится находить компромисс для получения удовлетворительного результата. Для проверки качества фильтрации проведена

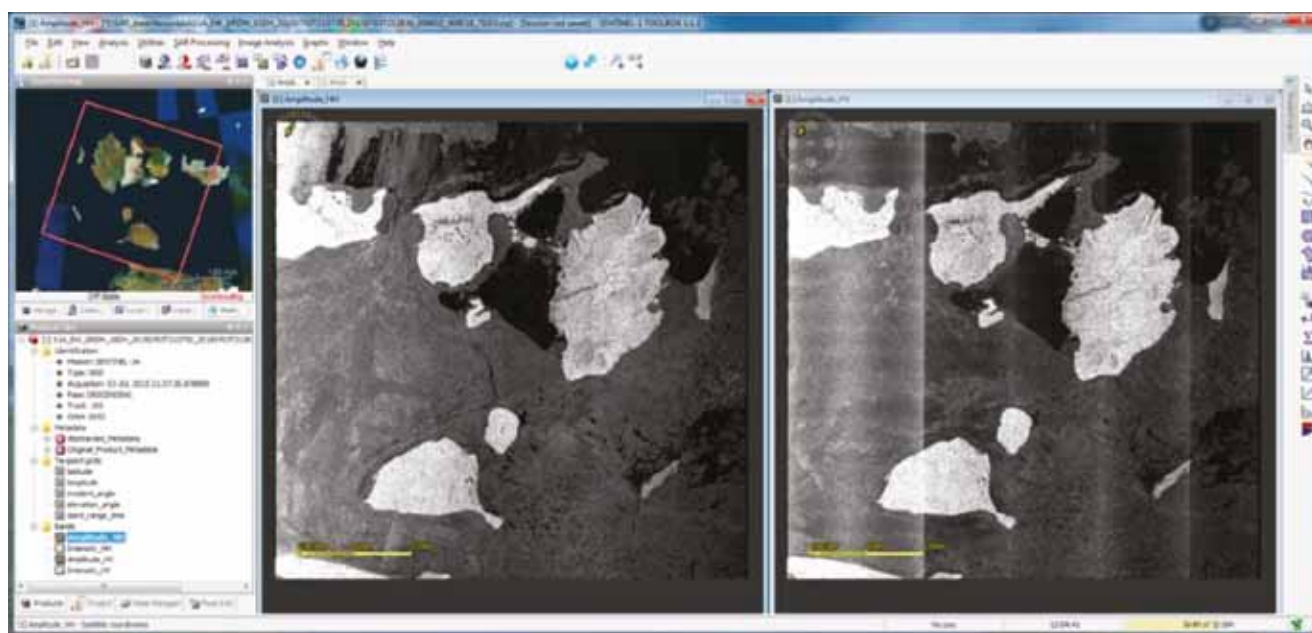


Рис. 5. Исходные снимки Sentinel-1A в среде программы Sentinel-1 Toolbox

последующая обработка методом кластеризации (Clustering из меню Image Analysis) и визуальная оценка сохранения необходимой детальности изображения (см. рис. 6). Сравнение исходного фрагмента снимка и результата его кластеризации без фильтрации (см. рис. 6, а, б) и после фильтрации с разным размером окна (см. рис. 6, в, г, д, е) показывает, что на обработанных изображениях после фильтрации различаются участки, которые можно однозначно соотнести с отдельными формами рельефа, в частности, долинами (зелёный) и междуречными пространствами (коричневый), причём результат кластеризации снимка после фильтрации с большим размером скользящего окна даёт более чёткие границы. Дальнейшее увеличение окна фильтрации приводит к значительному размытию границ на изображении, что препятствует выделению мелких объектов, в частности, термокарстовых озёр (рис. 7). Таким образом, выбор параметров фильтрации спекл-шума зависит от особенностей анализируемой местности.

При использовании большого числа снимков на одну и ту же территорию из архива появляется возможность выполнения многовременной фильтрации, обеспечивающей подавление спекл-шума с сохранением детальности изображений.

Одновременное использование снимков в двух доступных поляризациях позволяет более наглядно представить характерные черты местности благодаря различиям в отражённом поляризованном сигнале. Применяют цветовой синтез (операция Open RGB Image View из меню View), при котором, как правило, в качестве изображения для третьего канала используют различные виды комбинаций двух имеющихся изображений (HH и HV поляризаций). В обзоре [2] приведено несколько возможных комбинаций данных, используемых для получения типовых цветных базовых продуктов. В работе использовался вариант третьего канала для цветового синтеза в виде отношения двух изображений (HH/HV), которое позволяет подчеркнуть различия отражённых сигналов в двух поляризациях, что является дополнительным признаком при выявлении объектов.

На результирующем изображении (рис. 8) три части острова сильно различаются: более

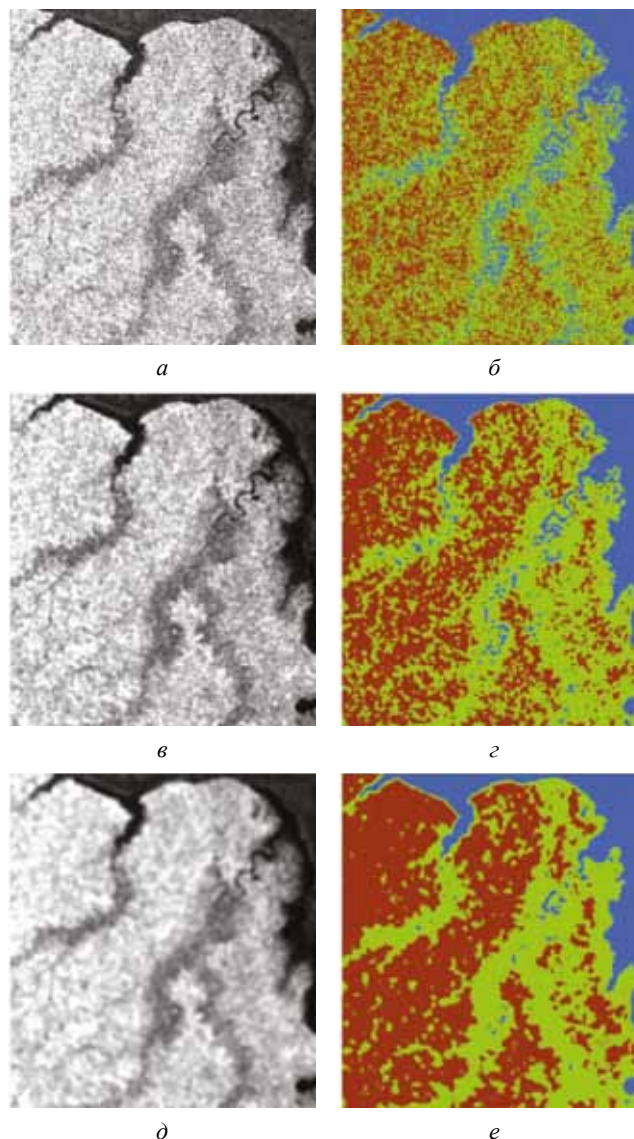


Рис. 6. Фильтрация спекл-шума:

а — исходный РЛ снимок, 3 июля 2015 г., поляризация HV ;
в — результат применения фильтра *mean*, скользящее окно 5×5 пикселей; д — *mean*, 9×9 ; б, г, е — соответствующие результаты кластеризации

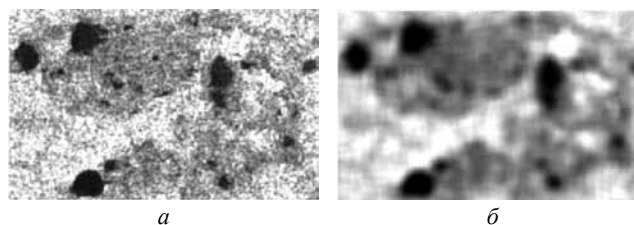


Рис. 7. Пример избыточной фильтрации спекл-шума:

а — исходный РЛ снимок, 3 июля 2015 г., поляризация HH ;
б — *mean*, 13×13

высокие и разнообразные по рельефу острова Фаддеевский и Котельный выделяются яркими оттенками. Земля Бунге, расположенная в цен-

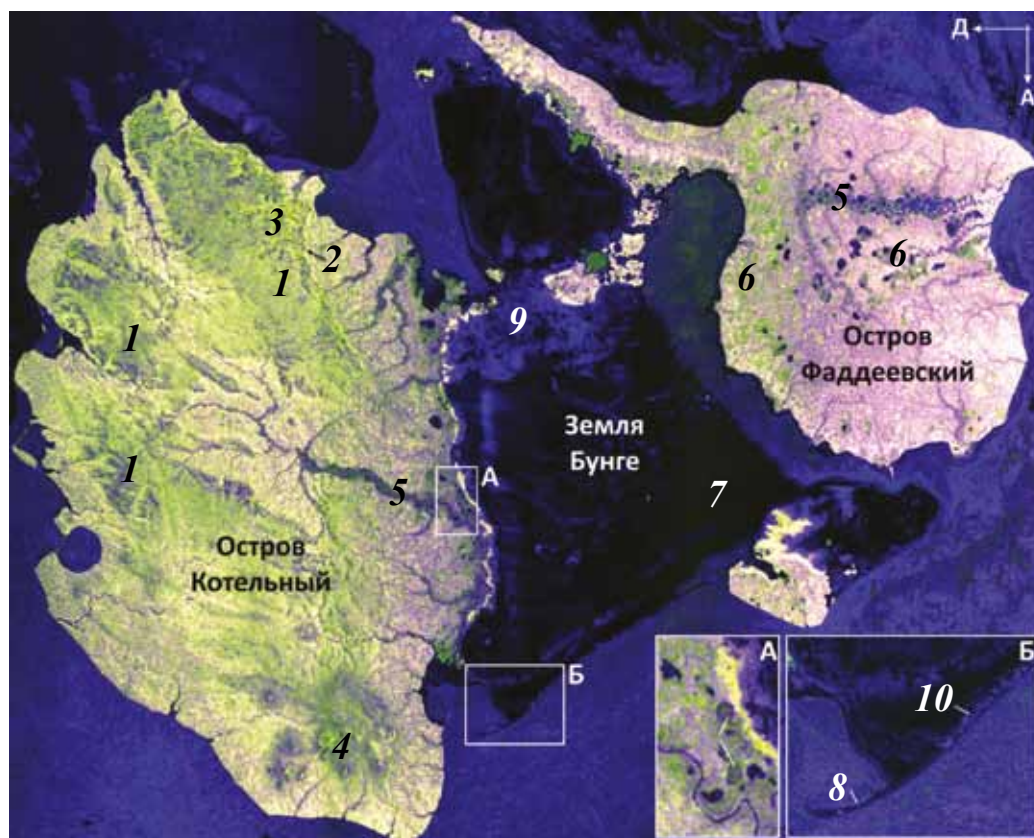


Рис. 8. Синтезированный снимок *Sentinel-1A*, 3 июля 2015 г.:

R — HH ; G — HV ; B — HH/HV . Стрелками показаны направления полёта космического аппарата (азимут A) и направление визирования (дальность D). Объяснения к цифрам даны в тексте

тре, слабо отличается от свободной ото льда морской поверхности, что свидетельствует о ее значительной однородности. Ярким синим цветом изображена морская поверхность, покрытая льдом. Различия в цвете, соответствующие особенностям взаимодействия радиоволн с поверхностью, могут быть сопоставлены с особенностями местности.

Для западной части — острова Котельный — характерен наиболее выраженный рельеф. Известно [8], что внутренняя его часть представлена возвышенным плато 1 (см. рис. 8), на снимке в его пределах различаются невысокие хребты и долины, простирающиеся с северо-запада на юго-восток. На северо-востоке плато имеет резкий уступ, хорошо заметный в виде ярко-зеленой почти прямолинейной полосы 2, повышение яркости обусловлено отражением большей части сигнала склонами, обращенными в сторону радиолокатора. Благодаря этой же особенности радиолокационной съёмки в отдельных случаях распознаются участки пла-

то, расчленённые эрозионной сетью 3, и отдельные вершины столообразных гор 4, расположенные в южной части острова. Восточная часть в целом более однородная, это низменная равнина с многочисленными небольшими, хорошо различимыми по темному тону речными долинами 5 (понижение обратного сигнала здесь связано, вероятно, с заболоченностью этих участков, т.к. их цвет аналогичен цвету термокарстовых озер) и термокарстовыми котловинами, имеющими, как правило, округлую форму 6.

Земля Бунге — практически ровная песчаная поверхность без растительности — на большей части имеет почти чёрный цвет 7, в том числе и узкие песчаные косы 8, из-за одинаково слабого обратного сигнала в обеих поляризациях и близких к единице значений отношения HH/HV . Здесь наглядно проявляется чувствительность радиоволн к шероховатости поверхности. На тёмном фоне чётко выделяются районы с бугристым рельефом, например,

возвышенность Евсекю-Булгуннях 9, изрезанные термоабразионные берега 10: песчаные поверхности с большей степенью расчленённости дают несколько повышенный обратный сигнал. Синий цвет этих участков объясняется их повышенной яркостью на изображении отношения поляризаций (HH/HV), где усилено влияние компоненты согласованной поляризации HH .

Остров Фаддеевский — равнина с большим количеством речных долин 5 и термокарстовых котловин 6. Повышенная яркость в восточной части острова из-за ее расположения в ближней зоне съёмки в значительной степени затрудняет сопоставление ее с западной частью. Помимо применения радиометрической нормализации для выравнивания уровня яркости, дополнительно для улучшения интерпретации особенностей рельефа этой части острова может быть использован снимок, полученный с соседнего витка орбиты, на котором остров располагался бы в центре кадра или в дальней зоне.

Отметим, что определённый вклад в обратное рассеяние сигнала и, соответственно, яркость изображения, вносит и редкий растительный покров, присутствующий в основном на островах Котельный и Фаддеевский, а также на отдельных участках Земли Бунге (восточнее возвышенности Евсекю-Булгуннях и на юго-востоке). Таким образом, совокупность факторов, одновременно влияющих на радиолокационное изображение, требует более детального их изучения с опорой на знание местности.

Заключение. Sentinel-1A — первая космическая радиолокационная система, данные которой предоставляются на бесплатной основе, что делает возможным их применение в учебном процессе, в том числе в среде географов-картографов. Значительный пространственный охват изображений, пространственное разрешение в первые десятки метров, съёмка одновременно в нескольких поляризациях, возможность всепогодного получения снимков любого участка суши и многих частей Мирового оке-

ана обеспечивают решение широкого круга задач. Важным фактом, способствующим расширению использования этих данных в географических исследованиях, является наличие бесплатного программного обеспечения, обладающего большим набором операций по обработке радиолокационных данных. Высокий потенциал данные Sentinel-1A имеют для картографирования северных территорий ввиду их получения независимо от облачности и солнечного освещения. Оптимальным видится составление карт среднего масштаба (например, 1:500 000), что определяется сочетанием пространственного охвата и разрешения изображений. Высокая степень разнообразия рельефа трёх частей острова Котельный, слабая его изученность и наличие лишь обзорных геоморфологических схем [8] определяют возможный объект картографирования — различные типы и формы рельефа, распространенные в пределах изучаемой территории. Начатое исследование рельефа островов Котельный, Земля Бунге и Фаддеевский будет продолжено.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балдина Е.А., Чеснокова О.А. Радиолокационное зондирование Земли для географических исследований // Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 2011. — № 1. — С. 16–21.
2. Дмитриев А.В., Чимитдоржиев Т.Н., Гусев М.А., Дагуров П.Н., Емельянов К.С., Захаров А.И., Кирбижекова И.И. Базовые продукты зондирования Земли космическими радиолокаторами с синтезированной апертурой // Исследование Земли из космоса. — 2014. — №5. — С. 83–91.
3. Ouchi K. Recent Trend and Advance of Synthetic Aperture Radar with Selected Topics // Remote Sensing. 2013. 5(2). 716–807 p.
4. Sentinel-1 / Copernicus / Observing the Earth / Our Activities / ESA. URL: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1.
5. Sentinel Online — ESA. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home>.
6. Scientific Data Hub. URL: <https://scihub.copernicus.eu/>.
7. Sentinel 1 Toolbox | STEP. URL: <http://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-1-toolbox/>.
8. Новосибирские острова. Физико-географическая характеристика архипелага / Под ред. Я.Я. Гаккеля. — Л.: Гидрометеиздат, 1967. — 212 с.

Принята к печати 8 февраля 2016 г.
Рекомендовано лабораторией аэрокосмических методов географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова