

ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ

REMOTE METHODS OF EARTH RESEARCH

УДК.528.88

DOI: 10.24057/2414-9179-2017-3-23-5-19

Е.А. Балдина¹, Н.Р. Николаев², К.А. Трошко³

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ SENTINEL-1 ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ТРУДНОДОСТУПНЫХ СЕВЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

АННОТАЦИЯ

Новые европейские спутники дистанционного зондирования Земли Sentinel-1A и -1B с радиолокаторами С-диапазона на борту, выведенные на орбиту соответственно в 2014 и 2016 гг., обеспечивают регулярное получение радиолокационных данных с высокой повторяемостью. Предоставляемые на некоммерческой основе новые данные обеспечивают широкие возможности исследования отдалённых арктических территорий, слабо обеспеченных материалами съёмки в оптическом диапазоне из-за облачности. Сложности распознавания объектов на радиолокационных изображениях компенсируются возможностью использования многократных повторных съёмки, позволяющих выявить участки местности, сходные по характеру изменений. В проведённом исследовании использовались материалы 4 съёмки со спутника Sentinel-1A, полученные в течение летнего периода 2015 г. и охватывающие самый большой из Новосибирских островов – Котельный. После предварительной обработки, направленной на улучшение изобразительных свойств, и взаимного согласования изображений были проведены автоматизированная кластеризация разновременных снимков, её генерализация, а также последующий анализ при сопоставлении с дополнительными источниками пространственной информации. В работе использованы как специализированное программное обеспечение для обработки радиолокационных данных Sentinel-1 – SNAP, так и программный комплекс ArcGIS, обеспечивший создание базы пространственных данных, необходимых для сопоставления результатов обработки радиолокационных данных и картографических источников. По результатам автоматизированной обработки многовременно-го снимка была получена карта предварительного районирования территории по характеру изменений значений коэффициента обратного рассеяния (УЭПР) за летний период и установлено примерное соответствие районов основным типам рельефа и ландшафтам острова.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

космические радиолокационные данные, Sentinel-1, обработка данных, дешифрирование, остров Котельный

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет; 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1; e-mail: eabaldina@yahoo.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет; 119991, Россия, Москва Ленинские горы, 1; e-mail: nikolaevnikita@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет; 119991, Россия, Москва Ленинские горы, 1; e-mail: troshko_ka@ntsomz.ru

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы всё более широко распространяются методы получения и применения данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в радиоволновом диапазоне, обладающих рядом преимуществ по сравнению с космическими снимками оптических съёмочных систем. Формирование радиолокационных изображений почти не зависит от погодных условий и освещённости территории, радиолокационная съёмка предоставляет информацию о физических и геометрических свойствах поверхности, поэтому их применение имеет особое значение для мониторинга областей, характеризующихся постоянным облачным покровом или продолжительной полярной ночью. Растущее внимание к приполярному региону нашей страны обуславливает целесообразность изучения возможностей практического применения данных ДЗЗ в радиоволновом диапазоне, являющихся уникальным источником информации о текущем состоянии труднодоступных северных территорий.

Существенным препятствием на пути к активному использованию данных радиолокационного зондирования до недавнего времени являлись их относительно малая доступность и высокая стоимость. Однако начиная с 2014 года Европейское космическое агентство предоставляет бесплатный доступ к архиву снимков нового спутника радиолокационного наблюдения Sentinel-1A, а с 2016 года – аналогичного спутника Sentinel-1B. Эти данные, доступные на портале программы «Коперник» [Open Access Hub. URL: <https://scihub.copernicus.eu/>], открывают широкие возможности для географических исследований и использования их в образовательных проектах [Балдина и др., 2016], в научной и практической работе.

Мировой опыт применения радиолокационных данных для исследования арктических районов обширен, в разные годы была показана эффективность использования данных различных космических систем радиолокационного наблюдения, существенно различающихся параметрами съёмки: Radarsat-1,-2, ERS-1,-2, ENVISAT/ASAR, ALOS/PALSAR, TerraSAR-X и др. Разновременные радиолокационные изображения широко используются для определения влагосодержания почв [Wall et al., 2010], болот [Widhalm et al., 2015], определения водного эквивалента снега [Pivot, 2012]. В работе [Regmi et al., 2012] показано, что значения коэффициента обратного рассеяния могут служить индикатором возраста термокарстовых котловин. Для нашей работы первостепенное значение имеет опыт исследования на основе радиолокационных данных тундровых районов с распространением многолетней мерзлоты и свойственных им таких процессов, влияющих на обратный сигнал, как замерзание или оттаивание сезонно-талого слоя, выпадение и таяние снега [Antonova et al., 2016; Duguay et al., 1999]. Так, в работе [Antonova et al., 2016] на примере обширного материала повторных радиолокационных съёмок высокого разрешения TerraSAR-X в сочетании с серией длительных наземных наблюдений за состоянием местности и снимками в оптическом диапазоне выделены факторы, потенциально влияющие на обратное рассеяние для случая типичной тундры, подстилаемой многолетней мерзлотой. Среди них есть постоянные условия, такие как вариации в шероховатости, связанные с различными типами поверхности (почвы / грунта или растительности), а также динамические условия, обусловленные увлажнением и просыханием, замерзанием и оттаиванием почвы и т.п. При этом известно, что интенсивность обратного сигнала, зависящая от степени шероховатости поверхности, зависит и от длины волны зондирующего сигнала. На участках с растительным покровом имеет место объёмное рассеяние, повышающее общее обратное рассеяние. Состояние почв и растительности по-разному влияет на обратное рассеяние в зависимости от их диэлектрических свойств, обусловленных влагосодержанием: влажная почва обычно даёт более высокое обратное рассеяние, чем сухая. Независимо от состояния поверхности наибольший обратный сигнал дают участки, расположенные не горизонтально, а с наклоном в сторону зондирующего луча.

Несмотря на многолетние исследования, трудности при использовании радиолокационных данных для картографирования по-прежнему представляют недостаточная изученность влияния свойств поверхности на характеристики отражённого импульса радиолокационных систем, зависимость рассеянного поверхностью сигнала как от свойств и состояния объектов, так и от параметров зондирующего излучения. Это обстоятельство препятствует выявлению однозначных дешифровочных признаков различных объектов. Использование материалов повторных съёмок территории при одинаковых параметрах позволяет выявить наиболее характерные черты местности. Работа направлена на формирование общего подхода к использованию радиолокационных данных для целей исследования состояния труднодоступных территорий и последующего картографирования на основе повторных съёмок Sentinel-1 на примере о. Котельный, входящего в состав Новосибирского архипелага.

Характеристика территории

Остров Котельный расположен за полярным кругом в регионе, характеризующемся высокой повторяемостью облачных дней, что накладывает ограничения на использование космических снимков оптических съёмочных систем для его изучения, мониторинга и картографирования. Отличительной особенностью рассматриваемой территории является её уникальное ландшафтное разнообразие: остров фактически разделён на три части: собственно о. Котельный (одноимённая западная часть), Землю Бунге и о. Фаддеевский (рисунок 1). Все части острова расположены в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты.

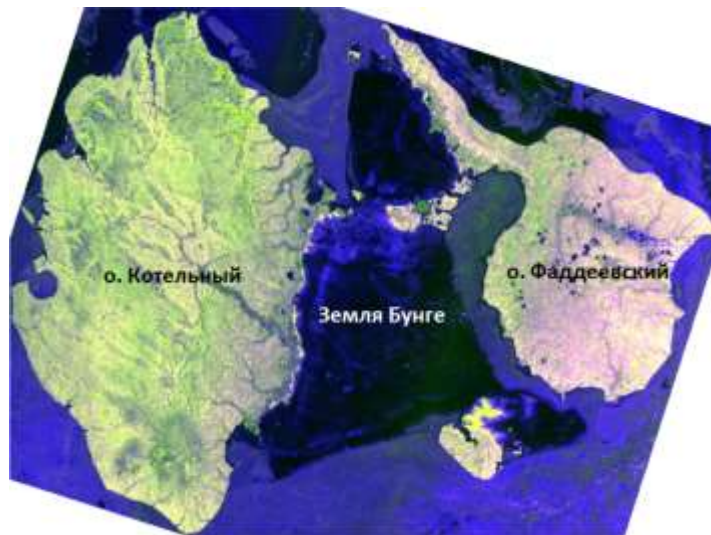


Рисунок 1. Остров Котельный на преобразованном радиолокационном снимке Sentinel-1A, полученном 03.07.2015

Figure 1. Kotelny Island as seen in the preprocessed Sentinel-1A radar image acquired 07. 03.2017

Котельный имеет самый разнообразный рельеф из всех трёх частей острова и делится на три гипсометрических уровня: прибрежную равнину (средние высоты 20–40 м, максимальные – 50–60 м), возвышенности (средние высоты около 80–120 м) и горный массив в его южной части. Равнина сильно расчленена сетью рек и оврагов, осложнена термокарстовыми формами рельефа: байджарахами, аласами и различными полигональными структурами. Возвышенности с преобладанием плато расположены в центре этой части острова и отделены от прибрежной равнины резкими уступами. Возвышенности прорезаны долинами крупнейшей реки территории Балыктах и её притоков. В южной части отдельные участки плато поднимаются до высоты 170–180 м, в северной – до 140–150 м. Наивысшими точками являются отдельные вершины, расположенные в пределах плоской поверхности плато с высотами 200 м. Склоны гор обычно покрыты щебнисто-каменными россыпями, реже – мелкозё-

мом. Сползающий материал образует террасы. В пределах крутых склонов встречаются каменные реки.

Земля Бунге – низменная равнина, занятая арктической песчаной пустыней. Перевеваемый ветром песок образует мелкобугристый рельеф с редко встречающимися пологими грядами и отдельными кочками. В пределах Земли Бунге также выделяются пологие ложбины, образованные талыми водами. На юго-востоке и в центральной части расположены возвышенность Земли Бунге и возвышенность Евсекю-Булгуннях соответственно.

Полуостров Фаддеевский представляет собой расчленённую пологоувалистую аккумулятивно-денудационную равнину со средними высотами 20–30 м. Наибольшей высоты поверхность о. Фаддеевский достигает в районе стрелки Анжу – около 65 м. Особенностью этой части является большое количество термокарстовых понижений – аласов, характеризующихся различными размерами и стадиями развития. Юго-восточная часть о. Фаддеевского наиболее расчленена, в центральной преобладают сильно заболоченные низменные участки [Новосибирские острова, 1963, 1967; Советская Арктика, 1970; Государственная геологическая..., 1999, Материалы..., 2015].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалы

Для изучения особенностей радиолокационных изображений о. Котельного были отобраны 4 снимка Sentinel-1A, охватывающих всю изучаемую территорию, полученных в бесснежный период при одинаковой геометрии съёмки. Одинаковые параметры съёмки существенно упрощают совместную обработку разновременных снимков. Параметры используемых снимков приведены в таблице 1.

Таблица 1. Используемые снимки спутника Sentinel-1A
Table 1. Sentinel-1A data used for this paper

Даты съёмки	03.07.2015, 15.07.2015, 08.08.2015, 20.08.2015
Режим съёмки	Сверхширокозахватный (англ. Extra-Wide Swath)
Поляризации	HH, HV
Размер пиксела, м	40x40
Углы падения, °	19.2-46.5
Орбита	Нисходящая

Сверхширокозахватный режим обеспечивает одновременное получение изображений большой площади; ширина полосы захвата на широте о. Котельный составляет около 400 км. Следовательно, на основе данных с такими характеристиками оптимальными масштабами картографирования представляется диапазон от 1:500 000 до 1:2 000 000.

Перед началом интерпретации радиолокационных изображений (РЛИ) большое внимание было уделено сбору дополнительных источников и формированию базы пространственных данных, поскольку тематическое дешифрирование радиолокационных снимков без привлечения дополнительных источников информации о местности малоэффективно. Для этой цели были использованы следующие дополнительные пространственно-координированные источники информации: геоморфологическая схема (автор И.В. Семёнов) [Новосибирские острова, 1967], листы геологической и топографической карт масштаба 1:200 000, снимки Landsat-8 с относительно малым покрытием облачностью, мозаика, составленная на основе летних малооблачных снимков Landsat-7 (2000-2002 гг.), а также координатно-привязанные наземные фотографии, опубликованные в Google Earth. Современные ГИС-технологии позволяют осуществить точную привязку различных пространственно-координированных данных, что значительно облегчает проведение их сопоставления и совместного анализа. Все

собранные материалы, включая РЛИ, были взаимно привязаны в программном комплексе (ПК) ArcGIS (рисунок 2).

Геоморфологическая схема, созданная в 1967 г., предоставила пространственную картину распространения различных типов рельефа, ценную для изучения территории и последующего картографирования. Изображение рельефа горизонталями на топографической карте позволяло учесть влияние крутизны и направления склонов на особенности изображения различных участков на радиолокационных снимках. Снимки системы OLI/Landsat-8, полученные в тот же период времени, что и радиолокационные снимки, необходимы для идентификации и анализа быстро изменяющихся участков, таких, как поверхность песчаной пустыни, расположенной в центральной части острова, наличие снежного покрова и пр. Кроме того, снимки оптического диапазона позволили выделить участки с наибольшим участием растительного покрова, что необходимо для учёта его влияния на характер обратного рассеяния. Сравнение РЛИ с более привычным космическим образом территории стало возможным благодаря безоблачной мозаике, составленной по снимкам Landsat-7.

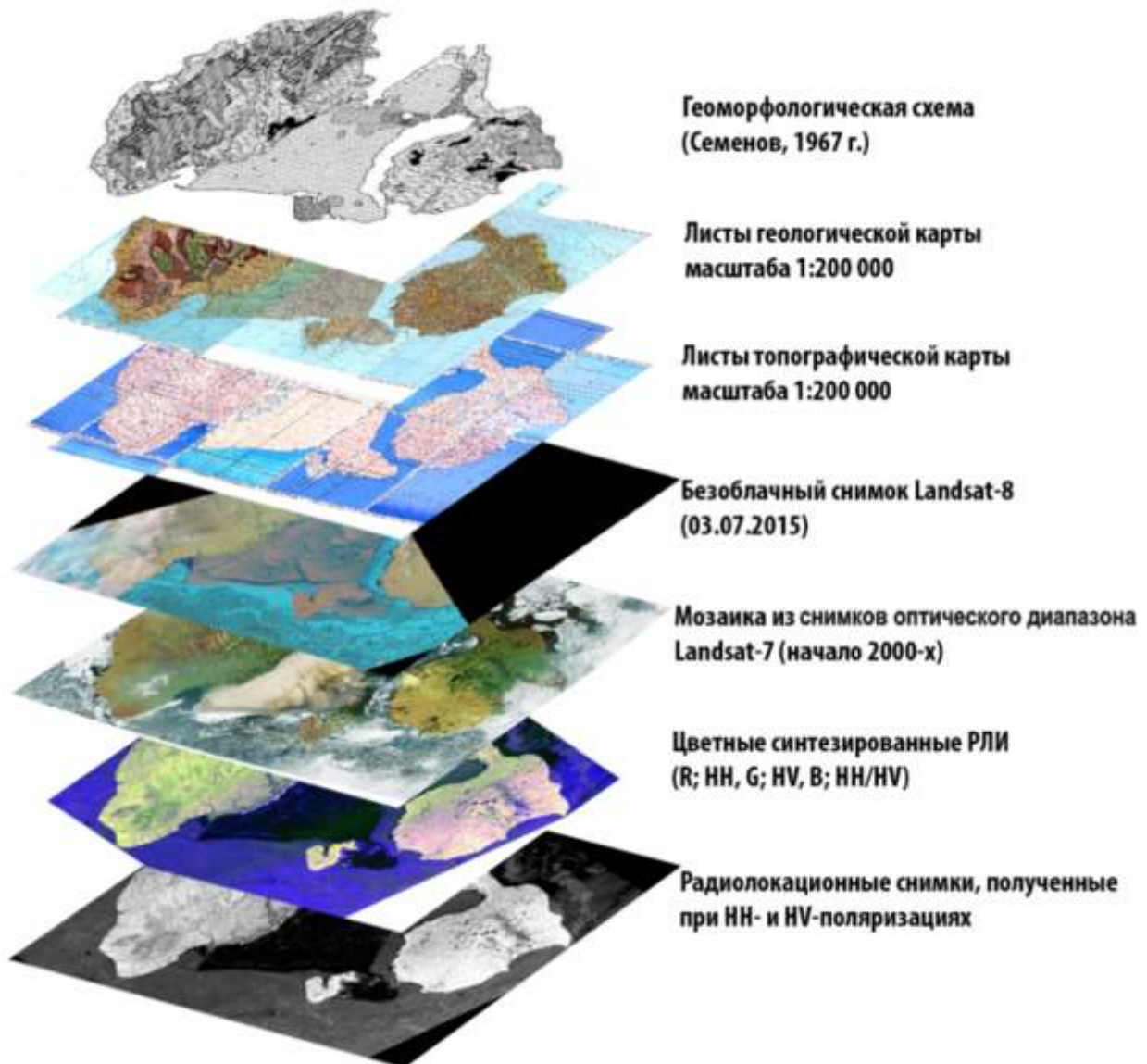


Рисунок 2. Набор пространственных данных, собранных для интерпретации РЛИ
Figure 2. Spatial data set for radar images interpretation

Помимо подобранных пространственно-координированных данных большую роль в исследовании территории о. Котельного сыграли литературные источники [Новосибирские острова, 1963, 1967; Советская Арктика, 1970; Государственная геологическая..., 1999, Материалы..., 2015].

Методы обработки

Большое значение для тематического анализа радиолокационных данных имеет их предварительная обработка, поскольку исходные изображения сложны для интерпретации. Предварительная обработка была осуществлена в программе SNAP, предназначенной для данных Sentinel, которая так же, как и сами данные, размещена на портале «Коперник». Для получения изображений, пригодных для последующего анализа и дешифрирования, были выполнены следующие процедуры: радиометрическая калибровка (переход от значений яркости к физическим характеристикам обратного рассеяния – УЭПР), фильтрация, корегистрация 4 отобранных снимков, полученных в летний период, и последующая кластеризация собранного из них многовременного снимка.

Определённым преимуществом кластеризации для обработки разновременных радиолокационных снимков является быстро обеспечиваемая группировка исходных данных в отдельные кластеры по признаку близости значений УЭПР, которые лучше поддаются интерпретации с опорой на дополнительные источники информации, чем исходное радиолокационное изображение.

Стоит отметить, что одной из ключевых особенностей радиолокационных изображений является их повышенная зернистость, обусловленная спекл-шумом [Верба и др, 2010]. При проведении визуального дешифрирования радиолокационных снимков мозг человека идентифицирует очертания отдельных объектов, несмотря на их внутреннюю яркостную неоднородность, чего нельзя сказать об автоматической обработке. Например, при кластеризации пиксели, соответствующие одному объекту местности, но различающиеся по уровню зарегистрированного обратного сигнала, будут отнесены к различным кластерам. Таким образом, кластеры, полученные при обработке зашумленного радиолокационного изображения, могут не формировать целостные ареалы (рисунок 3а).

Для автоматизированного создания наиболее достоверной с географической точки зрения схемы дешифрирования был осуществлен тщательный подбор параметров кластеризации. Так, было выявлено, что наилучшие результаты могут быть получены при использовании серии разновременных снимков, полученных при горизонтальной согласованной поляризации (НН). Дело в том, что снимки, полученные при HV-поляризации, вследствие особенностей съёмочного режима [Sentinel Online – ESA. URL: sentinel.esa.int] обладают рядом плохо устранимых радиометрических искажений, значительно ухудшающих результаты кластеризации изображений, содержащих HV-канал. Помимо выбора исходных данных для проведения кластеризации было необходимо определить оптимальное количество выделяемых кластеров. Предполагаемое число типов местности, которое может быть выделено и интерпретируемо по радиолокационным изображениям (10–12) было определено в результате анализа дополнительных источников информации.

Для повышения качества результатов кластеризации была проведена автоматизированная генерализация, заключающаяся в объединении и присоединении отдельных мелких полигонов с использованием ПК ArcGIS. Были последовательно использованы следующие инструменты: Focal Statistics, Boundary Clean, Region Group, Set Null, Nibble, Aggregate, что позволило устранить мелкие незначимые группы пикселей путём их присоединения к доминирующим кластерам.

Результатом процедуры отсекаемых малых незначимых полигонов (Nibble) является полученная автоматизированным путём «карта» районирования территории по характеру обратного рассеяния с пространственным разрешением 40 м (рисунок 3б). Сформированная «карта» избавлена от излишней мозаичности и пригодна для анализа и интерпретации. Про-

цедура агрегирования (Aggregate) позволяет сформировать обобщённую карту районирования территории с пространственным разрешением 400 м, удобную для проведения сравнения с доступными картографическими источниками (рисунок 3в).

Для ускорения процесса обработки вариантов кластеризации с помощью языка визуального программирования Model Builder был сформирован единый инструмент, позволяющий получить обработанные результаты с пространственным разрешением 40 и 400 м. Результаты обобщенной кластеризации в дальнейшем служили обоснованием легенды карты типов местности, объективно выделяющихся по радиолокационным данным.

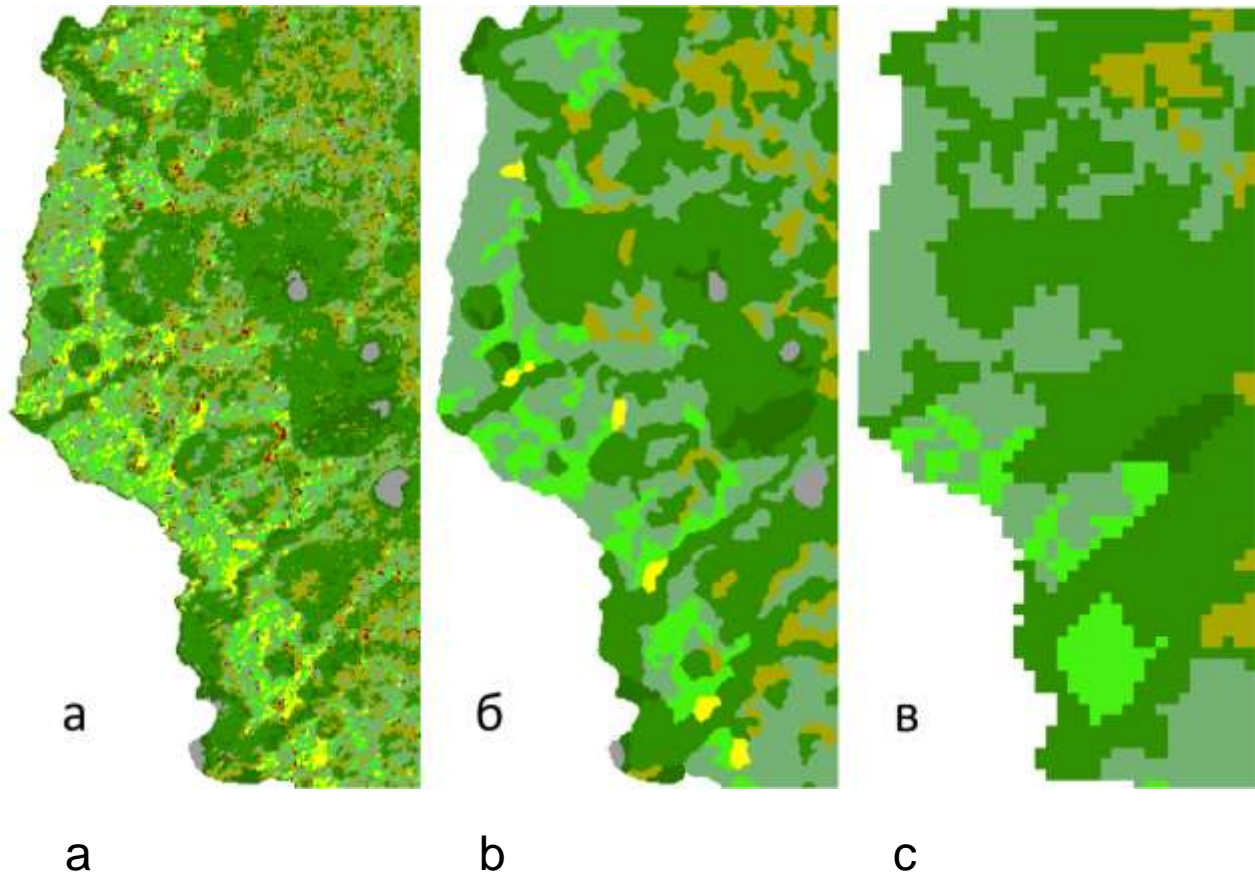


Рисунок 3. Обобщение результата кластеризации

- а) исходных снимков;
 - б) после отсечения малых незначимых полигонов (Nibble) с пространственным разрешением 40 м;
 - в) после процедуры агрегирования (Aggregate) 400 м
- Figure 3.** Clustering results after post processing:
 а) original;
 б) after removal of small units (Nibble), pixel size 40 m;
 в) after aggregation with pixel size 400 m

Для картографирования оказалось целесообразным сочетать методы автоматизированного и визуального дешифрирования, при котором возможен учёт косвенных признаков, и информации, представленной в дополнительных источниках. Разработана общая схема создания карты типов местности, выделяемых по РЛ данным, которая включает как этапы компьютерной обработки, так и требующие проведения визуального анализа (рисунок 4). Схема предполагает итеративную процедуру при определении типов местности, выделяемых при

кластеризации по радиолокационным снимкам: после первичной кластеризации происходит анализ результатов и корректировка её параметров. Подобный подход к картографированию значительно сокращает временные затраты на интерпретацию РЛ данных и выделение необходимых полигонов.

Для визуального анализа снимков в результате обработки были сделаны цветные синтезированные изображения. Комбинирование данных из разных каналов позволяет создать производные изображения, наилучшим образом отображающие различные особенности местности [Дмитриев и др., 2014]. Для интерпретации радиолокационных изображений в текущей работе был использован наиболее простой и информативный синтез – R: HH, G: HV, B: HH/HV (рисунок 1).

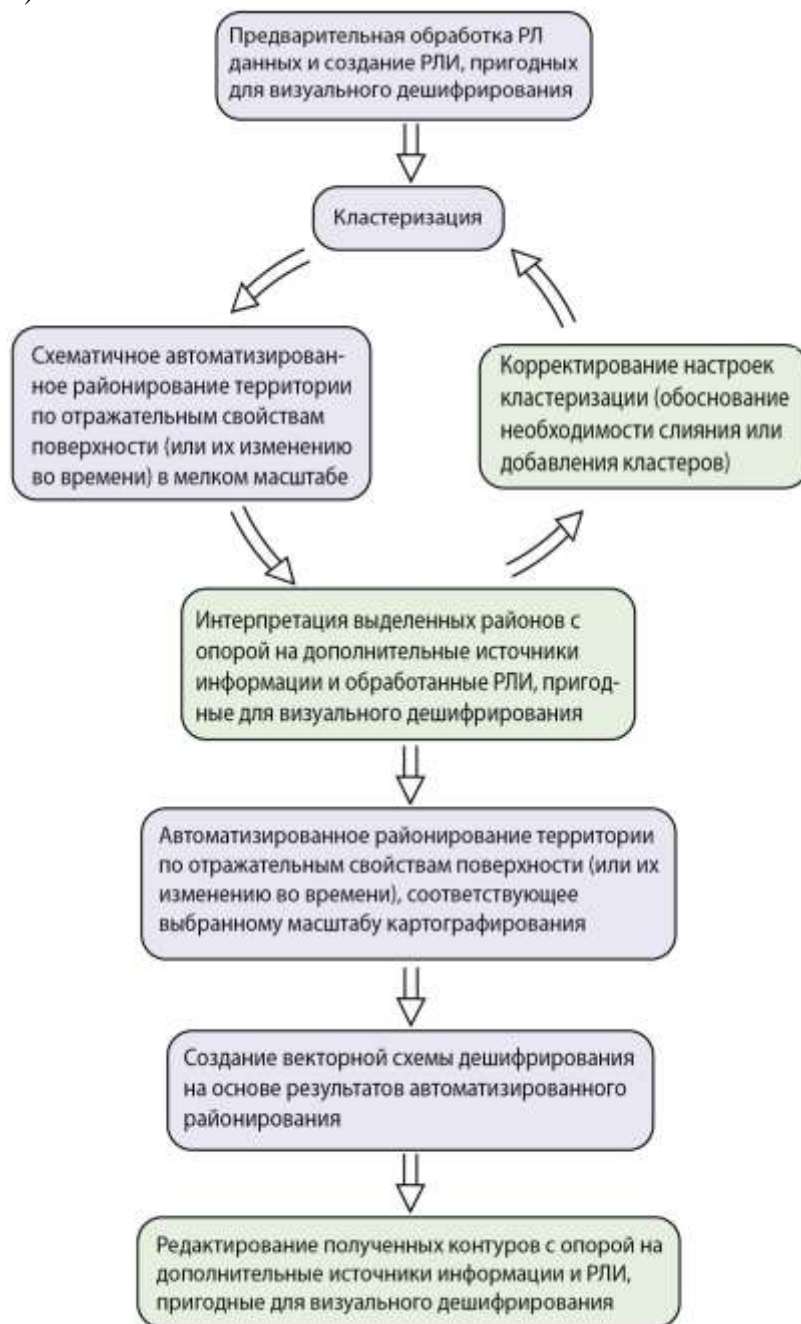


Рисунок 4. Схема создания карты районирования территории на основе радиолокационных данных

Figure 4. Scheme of creating territorial zoning map based on radar images

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате обработки получено два вида материалов, созданных на основе исходных радиолокационных данных – цветные синтезированные изображения разных сроков и результат кластеризации многовременного снимка после автоматизированной генерализации. На их основе проведено районирование территории по характеру обратного рассеяния и его изменению за летний период 2015 г. Изменение характеристик обратного рассеяния сигнала при взаимодействии с поверхностью различных участков территории, которые выявляются по снимкам, полученным при идентичных параметрах съёмки, в нашем случае могут быть обусловлены как постепенным развитием растительного покрова, так и изменением увлажнения поверхности вследствие оттаивания и просыхания сезонно-талого слоя или выпадения осадков. Известно, в частности, [например, Antonova *et al.*, 2016], что в течение летнего периода значения УЭПР арктических тундр снижаются вследствие затухания сигнала в развивающемся растительном покрове или промерзания верхнего слоя почвы, а увеличение УЭПР может вызвать увлажнение поверхности вследствие протаивания верхнего слоя. Эти явления по-разному проявляются на участках, различающихся по своим физико-географическим характеристикам, что и является основанием для их различения и картографирования.

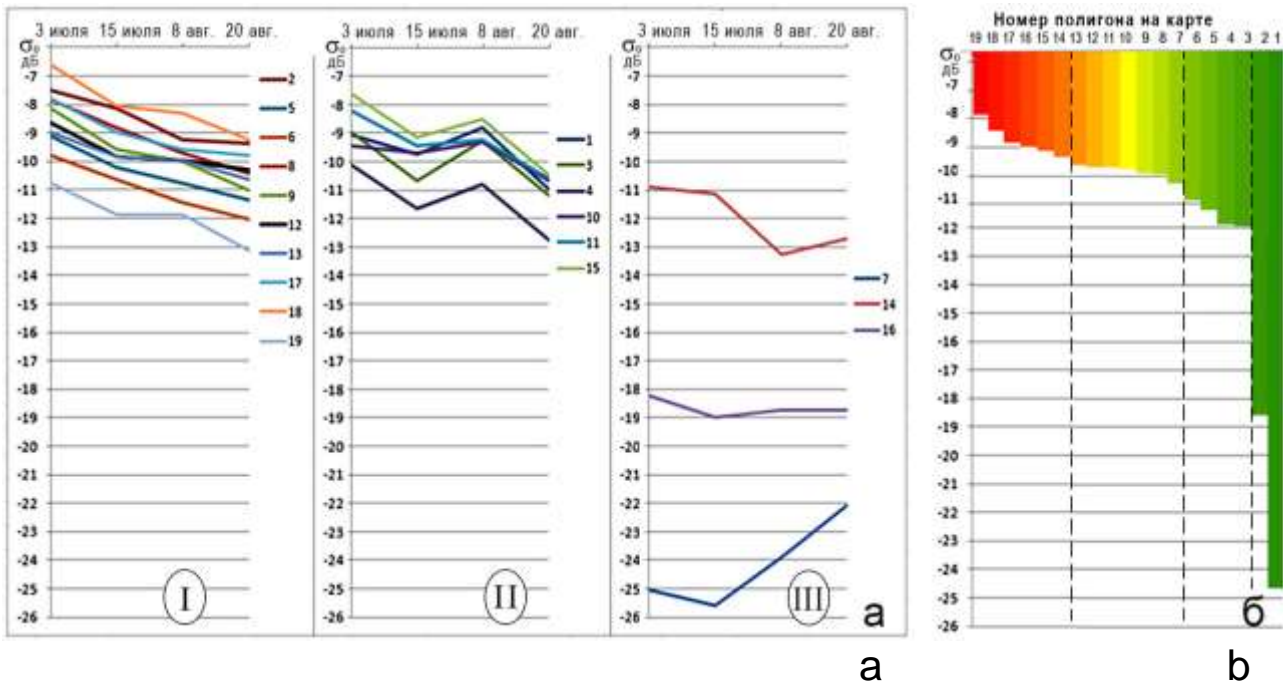


Рисунок 5. Результаты статистической обработки значений УЭПР (σ_0) по выделенным на карте районирования полигонам:

а) разделённые на 3 группы по виду графиков изменения значений УЭПР (σ_0) в НН-поляризации;

б) разделённые на 4 группы по средним значениям УЭПР за летний период
Figure 5. Results of the statistical analysis of backscatter values (σ_0 , HH polarization) for the polygons of the zoning map:

a) classified into 3 groups by graphs of the backscatter values changes;

b) classified into 4 levels by mean summer backscatter values

Так как различные типы местности наилучшим образом различаются на результатах кластеризации многовременного снимка, в основу легенды карты районирования был положен вид изменения и средний уровень значений УЭПР различных типов местности за летний период. Для каждого выделенного полигона выявлен характер изменения обратного рассеяния между съёмками, в соответствии с которым графики разделены на три группы по виду кривой (рисунок 5а): I – с монотонным падением значений, II – с общим падением значений и ярко выраженным повышением в начале августа, III – прочие. Осреднённые за летний период значения УЭПР выделенных полигонов разделены на 4 группы по диаграмме (рисунок 5б): относительно высокие (полигоны 14-19), средние (7-13), относительно низкие (3-6), низкие (1, 2).

После выделения границ полигонов, характеризующихся различным ходом УЭПР в летний период и их средними значениями, каждый из них был идентифицирован с объектами местности на основе дополнительных источников информации. К существенным характеристикам были отнесены положение в рельефе, характер поверхности, общая расчленённость местности, преобладающий растительный покров. Информация о рельефе территории и характере поверхности в основном была получена с помощью геоморфологической схемы и топографической карты. Общая расчленённость территории была оценена с помощью топографической карты и литературных описаний. Преобладающий растительный покров был определён с опорой на снимки оптических съёмочных систем, цветные синтезированные РЛИ и литературные описания. Полученная карта районирования приведена на рисунке 6, а описание выделенных полигонов – в таблице 2.

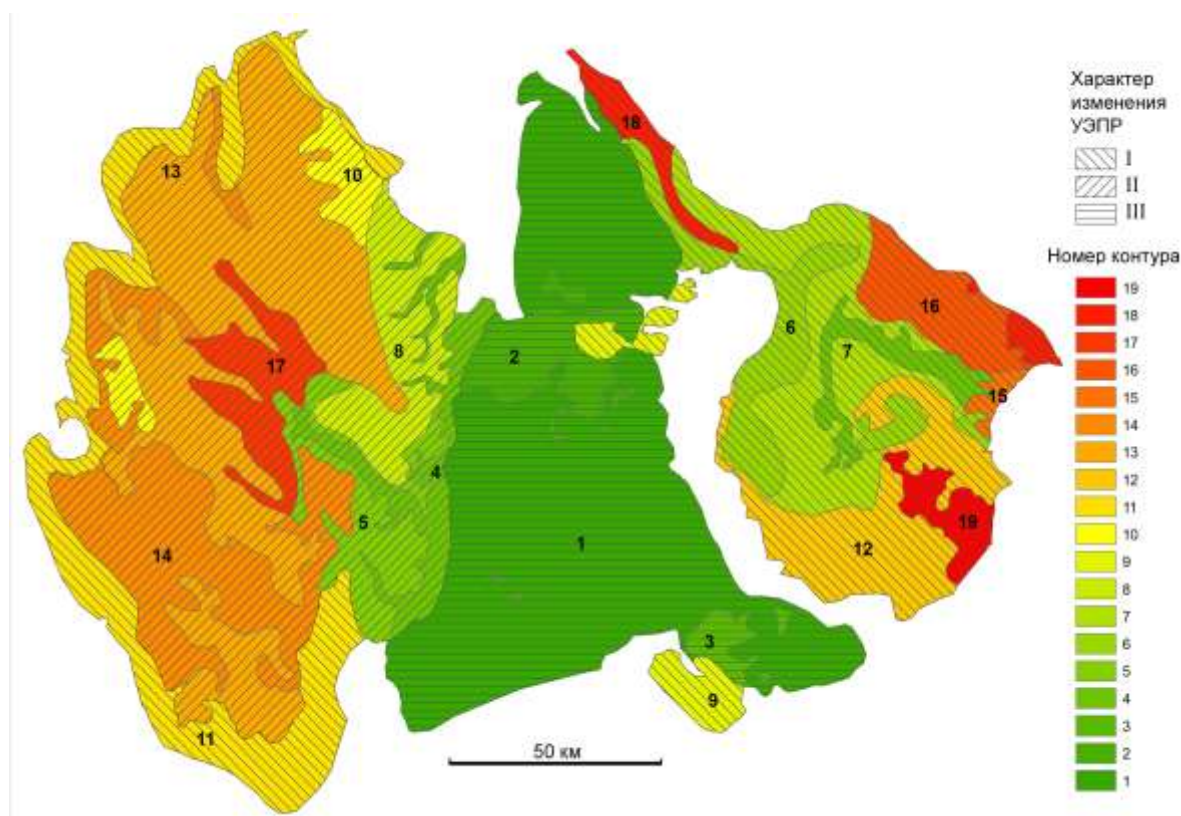


Рисунок 6. Карта районирования территории о. Котельный по среднему значению УЭПР и его изменениям за летний период 2015 г. (легенда в таблице 2)

Figure 6. The map of the Kotelny Island zoning based on mean backscatter values and their changes during the summer of 2015 (the legend is in Table 2)

ВЫВОДЫ

В результате проведения экспериментальных работ был сформирован общий подход к использованию радиолокационных данных для картографирования и изучения состояния местности на примере о. Котельный. В частности, было определено, что для кластеризации выбранных разновременных радиолокационных снимков Sentinel-1 с целью обзорного картографирования достаточно использования данных в согласованной горизонтальной поляризации, поскольку данные перекрёстной поляризации обладают плохо устранимыми радиометрическими искажениями. Составленная модель автоматизированной генерализации результатов кластеризации позволила оперативно формировать схемы дешифрирования, значительно облегчающие процесс картографирования и изучения местности по радиолокационным данным.

Таблица 2. Интерпретация полигонов, выделенных на карте районирования

Table 2. Interpretation of the zoning map contours

	Осреднённые за летний период значения УЭПР	Тип местности
I. Территории, характеризующиеся монотонным падением значений УЭПР за летний период		
19	Относительно высокие	Возвышенная денудационная равнина с сильно выраженным эрозионным расчленением, с тундровой растительностью
18		Морская аккумулятивная равнина с сильно выраженным эрозионным расчленением, с растительностью тундрового типа
16		Пологохолмистая равнина с сильно выраженным эрозионным и местами аласным расчленением, с тундровой растительностью
15		Аккумулятивная прибрежная низменная равнина с полигональным микрорельефом, периодически заливаемая морем, с галофитной тундровой растительностью
12		Средние
11	Аккумулятивно-денудационная прибрежная равнина с выраженным эрозионным расчленением, с тундровой растительностью	
9	Озёрно-расчленённая аккумулятивная вторая морская терраса с тундровой и болотной растительностью	
7	Озёрно-аллювиальная аккумулятивно-денудационная равнина с хорошо выраженным аласным расчленением, с тундровой растительностью	
6	Относительно низкие	Аккумулятивная озёрно-аллювиальная равнина с умеренным аласным расчленением, с тундровой и болотной растительностью
II. Территории, характеризующиеся общим падением значений УЭПР за летний период и ярко выраженным повышением в начале августа		
17	Относительно высокие	Сильно расчленённая аккумулятивно-денудационная равнина с эрозионными и термокарстовыми формами рельефа, с преимущественно тундровой растительностью

14		Сильно расчленённая денудационно-эрозионная платообразная пологоувалистая возвышенная равнина с тундровой растительностью
13	Средние	Низкогорный рельеф – полого-вершинное слаборасчленённое плато с растительностью полярных пустынь
10		Сильно расчленённая денудационно-эрозионная платообразная пологоувалистая возвышенная равнина с преимущественно полярно-пустынной и местами тундровой растительностью
8		Озёрно-аллювиальная равнина с выраженным аласным и эрозионным расчленением, с тундровой растительностью
5	Относительно низкие	Возвышенная пологоволнистая денудационно-аккумулятивная едомная равнина с высокой степенью эрозионного расчленения, с тундровой растительностью
4		Долины крупных рек с плоским заболоченным дном, с болотной и тундровой растительностью
III. Территории, характеризующиеся прочими типами изменения значений УЭПР за летний период		
3	Относительно низкие	Возвышенная равнина с умеренной степенью эрозионного расчленения, с разреженной болотной и тундровой растительностью
2	Низкие	Возвышенная равнина с умеренной степенью эрозионного расчленения, лишенная растительного покрова
1		Нерасчленённая плоская морская песчаная низменная равнина, лишённая растительного покрова

Сопоставление предварительно обработанных радиолокационных снимков и обобщённой карты кластеризации с обширной пространственно-координированной базой источников тематической информации позволяет проследить факторы, влияющие на отражающие свойства зондируемых объектов.

Особый интерес представляют изменения значений УЭПР различных типов местности за 4 съёмочных срока. Так, выделенные типы изменения УЭПР в целом соответствуют трём основным типам рельефа острова: платообразным возвышенностям о. Котельного, возвышенным равнинам о. Котельного и Фаддеевского, плоской песчаной низменной равнине Земли Бунге.

По средней интенсивности значений обратного рассеяния можно уверенно говорить о наличии влияющего на них растительного покрова в пределах аласов, крупных речных долин и участков арктической тундры, распространённой преимущественно в пределах равнин о. Котельного и Фаддеевского, при этом Земля Бунге и поверхность плато о. Котельного практически полностью лишены растительного покрова. Низкие значения УЭПР Земли Бунге объясняются прежде всего низкой диэлектрической проницаемостью и слабо выраженной шероховатостью ровной песчаной поверхности. Совместный анализ цветных синтезированных изображений и различных дополнительных источников информации о местности позволили идентифицировать большинство объектов, выделяющихся по радиолокационным снимкам, а статистический анализ – оценить свойства, определяющие особенности их радиолокационного изображения, которые представлены на карте районирования территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балдина Е.А., Трошко К.А., Николаев Н.Р. Радиолокационные данные Sentinel-1 и возможности их обработки для дешифрирования форм рельефа острова Котельный // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016. – №3. – С. 78–85.
2. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В. С. Вербы. – М.: Радиотехника, 2010. – 675 с.
3. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (новая серия). Лист S-53-55 – Новосибирские острова. Объяснительная записка. – СПб., Изд-во ВСЕГЕИ, 1999. – 208 с. (МПР России, ВСЕГЕИ, ВНИИ Океангеология, ГНПП «Аэрогеология», ПМГРЭ).
4. Дмитриев А.В., Чимитдорджиев 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. DOI: 10.7868/S0205961414050042.
5. Материалы комплексного экологического обследования участков территории, обосновывающего придание этой территории правового статуса особо охраняемой природной территории федерального значения – государственного природного заказника «Новосибирские острова». – Издание Фонда дикой природы, 2015. – 484 с.
6. Новосибирские острова. Сборник статей / Под ред. Г.Л. Рутилевского и Р.К. Сиско. – Л.: Мор. Транспорт, 1963. – 233 с.
7. Новосибирские острова. Физ.-геогр. характеристика архипелага / Под ред. Я.Я. Гаккеля. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 212 с.
8. Советская Арктика. Моря и острова Северного Ледовитого океана. – М.: Наука, 1970. – 526 с.
9. Antonova S., Kääh A., Heim B., Langer M., Boike J. Spatio-temporal variability of X band radar backscatter and coherence over the Lena River Delta, Siberia // Remote Sensing of Environment, 182, 2016. – Pp. 169–191. DOI:10.1016/j.rse.2016.05.003.
10. Duguay C.K., Rouse W.R., Lafleur P.M., Boudreau L.D., Crevier Y., Pultz T.J. Analysis of Multi-Temporal ERS-1 SAR Data of Subarctic Tundra and Forest in the Northern Hudson Bay Lowland and Implications for Climate Studies // Canadian Journal of Remote Sensing, 1999. – Pp. 21–33. DOI: 10.1080/07038992.1999.10855260.
11. Pivot F. C-Band SAR imagery for snow-cover monitoring at Treeline, Churchill, Manitoba, Canada // Remote Sens. – 2012, № 4. – Pp. 2133–2155. DOI:10.3390/rs4072133.
12. Regmi P., Grosse G., Jones M.C., Jones B.M., Walter A.K. Characterizing post-drainage succession in thermokarst lake basins on the Seward Peninsula, Alaska with TerraSAR-X backscatter and Landsat-based NDVI data // Remote Sens. – 2012, № 4. – Pp. 3741–3765. DOI:10.3390/rs4123741.
13. Wall J., Collingwood A., Treitz P. Monitoring surface moisture state in the Canadian High Arctic using synthetic aperture radar (SAR) // Can. J. Remote Sensing. – Vol. 36, Suppl. 1. – Pp. S124–S134, 2010. DOI: 10.5589/m10-017.
14. Widhalm B., Bartsch A., Heim B. A novel approach for the characterization of tundra wetland regions with C-band SAR satellite data // International Journal of Remote Sensing. – 2015, 36:22. – Pp. 5537–5556. DOI: 10.1080/01431161.2015.1101505.

Elena A. Baldina¹, Nikita R. Nikolaev², Ksenia A. Troshko³

APPLICATION OF SENTINEL-1 RADAR DATA FOR MAPPING HARD-TO-REACH NORTHERN TERRITORIES

ABSTRACT

The new European space satellites Sentinel-1A and 1B with C-band radars on board, launched in 2014 and 2016 respectively, provide regular radar data on the Earth's surface with high temporal resolution. These new non-commercial data provides extensive opportunities for research of remote Arctic territories, poorly supplied with optical images due to cloud conditions. Difficulties in recognizing objects on radar images can be compensated for by the possibility of using multiple repeated surveys, which make it possible to identify areas of the terrain which are similar in character of changes. In the study, four Sentinel-1A images of the largest from the New Siberian islands – Kotelny – were used, which were acquired during the summer period from July 3 to August 20, 2015. After preprocessing aimed at improving the visual properties and coregistration of the multitemporal images, an automated clustering of the multitemporal image set was carried out. Clustering results were analyzed on comparison with additional sources of spatial information. Both specialized software for Sentinel-1 radar data processing - SNAP, and the GIS software complex ArcGIS were used. The latter provided the creation of the spatial data base for comparing the results of radar data processing and cartographic sources. The map of the territory zoning was obtained as clustering results which is based on the changes in the normalized radar cross section (σ^0) over the summer period, and the approximate correspondence of the areas to the main types of the relief and landscapes of the island was established.

KEYWORDS

satellite radar data, Sentinel-1, data processing, image interpretation, Kotelny Island

REFERENCES

1. Baldina E.A., Troshko K.A., Nikolaev N.R. Radiolokacionnye dannye Sentinel-1 i vozmozhnosti ikh obrabotki dlya deshifirovaniya form rel'efa ostrova Kotel'nyj [Sentinel-1 radar data and their processing capabilities for relief features interpretation of Kotelny Island]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Geodeziya i aerofotos'yomka*, 2016, No 3, pp. 78–85 (in Russian).
2. Verba V.S., Neronskiy L.B., Osipov I.G., Turuk V.E. Radiolokacionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya [Spaceborne Earth Surveillance Radar Systems]. 2010, 675 p. (in Russian).
3. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1 000 000 (novaya seriya). List S–53–55. Novosibirskiye ostrova. Ob'yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1 million (new series). Sheet S–53–55. The Novosibirsk Islands. Explanatory note]. St. Petersburg: Izd-vo VSEGEI, 1999, 208 p. (MPR Rossii, VSEGEI, VNII Okeangeologiya, GNPP "Aerogeologiya", PMGRE) (in Russian).
4. Dmitriev A.V., Chimitdordzhiev T.N., Gusev M.A., Dagurov P.N., Emel'yanov K.S., Zakharov A.I., Kirbizhekova I.I. Bazovye produkty zondirovaniya Zemli kosmicheskimi radiolokatorami s sintezirovannoj aperturoj [Basic products of the Earth remote sensing by space-

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 119991, Leninskie Gory, 1, Moscow, Russia;
e-mail: eabaldina@yahoo.com

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 119991, Leninskie Gory, 1, Moscow, Russia;
e-mail: nikolaevnikita@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 119991, Leninskie Gory, 1, Moscow, Russia;
e-mail: troshko_ka@ntsomz.ru

- borne synthetic aperture radars]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, No 5, pp. 83–91. DOI: 10.7868/S0205961414050042 (in Russian).
5. Materialy kompleksnogo ekologicheskogo obsledovaniya uchastkov territorii, obosnovyayushchego pridanie etoj territorii pravovogo statusa osobo okhranyaemoj prirodnoj territorii federal'nogo znacheniya – gosudarstvennogo prirodnogo zakaznika “Novosibirskie ostrova” [The materials of a complex ecological survey of sites that justify bringing in this area the legal status of specially protected natural area of federal significance - the state natural reserve “New Siberian Islands”]. WWF, 2015, 484 p. (in Russian).
 6. Novosibirskie ostrova. Sbornik statej [New Siberian Islands. The collection of articles]. Pod red. G.L. Rutilevskogo i R.K. Sisko, 1963, 233 p. (in Russian).
 7. Novosibirskie ostrova. Fiziko-geograficheskaya kharakteristika arkhipelaga [New Siberian Islands. Geographical characteristic of the archipelago]. Pod red. Ya.Ya. Gakkelya, 1967, 212 p. (in Russian).
 8. Sovetskaya Arktika. Morya i ostrova Severnogo Ledovitogo okeana. [Soviet Arctic. Seas and islands of the Arctic Ocean]. 1970, 526 p. (in Russian).
 9. Antonova S., Kääh A., Heim B., Langer M., Boike J. Spatio-temporal variability of X band radar backscatter and coherence over the Lena River Delta, Siberia. *Remote Sensing of Environment*, 2016, No 182, pp. 169–191. DOI:10.1016/j.rse.2016.05.003.
 10. Duguay C.K., Rouse W.R., Lafleur P.M., Boudreau L.D., Crevier Y., Pultz T.J. Analysis of Multi-Temporal ERS-1 SAR Data of Subarctic Tundra and Forest in the Northern Hudson Bay Lowland and Implications for Climate Studies. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1999, pp. 21–33. DOI: 10.1080/07038992.1999.10855260.
 11. Pivot F. C-Band SAR imagery for snow-cover monitoring at Treeline, Churchill, Manitoba, Canada. *Remote Sens.*, 2012, No 4, pp. 2133–2155. DOI:10.3390/rs4072133.
 12. Regmi P., Grosse G., Jones M.C., Jones B.M., Walter A.K. Characterizing post-drainage succession in thermokarst lake basins on the Seward Peninsula, Alaska with TerraSAR-X backscatter and Landsat-based NDVI data. *Remote Sens.*, 2012, 4, pp. 3741–3765. DOI:10.3390/rs4123741.
 13. Wall J., Collingwood A., Treitz P. Monitoring surface moisture state in the Canadian High Arctic using synthetic aperture radar (SAR). *Can. J. Remote Sensing*, 2010, Vol. 36, Suppl. 1, pp. S124–S134. DOI: 10.5589/m10-017.
 14. Widhalm B., Bartsch A., Heim B. A novel approach for the characterization of tundra wetland regions with C-band SAR satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, 36:22, pp. 5537–5556. DOI: 10.1080/01431161.2015.1101505.
-