

## Картографирование природно-территориальных комплексов острова Котельный по разновременным радиолокационным снимкам Sentinel-1

© 2018 г. Е.А. Балдина<sup>1\*</sup>, К.А. Трошко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия;

<sup>2</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

\*baldina@geogr.msu.ru

## Mapping of the natural landscapes of Kotelny island using multi-temporal Sentinel-1 radar images

Е.А. Baldina<sup>1\*</sup>, К.А. Troshko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;

<sup>2</sup>Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

\*baldina@geogr.msu.ru

Received December 8, 2017

Accepted March 30, 2018

**Keywords:** backscatter dynamics, geographical image interpretation, image processing, natural landscapes, permafrost, satellite radar images, seasonal changes, Sentinel-1, thematic mapping.

**Summary.** Satellite synthetic aperture radar (SAR) remote sensing is the most suitable technique for studying and mapping of the vast uninhabited polar landscapes due to its capability to acquire the data regardless of daylight or cloud coverage. SAR data provide information not only about location of an object but also about its surface characteristic. The rapid increase of the open radar data volume after the launch of Sentinel-1 satellites suggests the relevance of a research aimed at developing methods of radar data use for thematic mapping. The research presents results of a new approach for mapping of the Arctic natural landscapes based on multi-temporal SAR data processing and interpretation. One of the Russian Arctic islands – Kotelny island (the New Siberian Islands archipelago) was chosen as an area of interest due to its rather high landscape diversity. 19 multi-seasonal Sentinel-1A SAR images, selected for the study, span the period from October 2015 to September 2016 with acquisitions every 12 days. So the images represent different ground conditions in each season of the year, covering all the seasons. Methods for creating modified radar images adjusted for visual and automated interpretation are proposed. The approach exploits the benefits of both the unsupervised classification applied to a large number of multi-temporal radar images, and the visual interpretation of modified preprocessed radar images of selected seasons as color composites. Spatial and temporal variations of backscattering coefficient gave the support for semi-automatic distinguishing the boundaries of landscapes which are characterized by different combination of the relief, vegetation and soils. Geographical interpretation of the outlined polygons and creation of the thematic map is based on the well-known principles of radio waves interaction with the Earth surface, as well as on supplementary geoinformation sources, such as optical satellite images (Landsat-8/OLI), weather data, and cartographic data available. The main result of the research is a map of natural landscapes of Kotelny island at a scale 1:750 000. The map contains information on landscapes features derived from seasonal backscatter behavior.

**Citation:** Baldina E.A., Troshko K.A. Mapping of the natural landscapes of Kotelny island using multi-temporal Sentinel-1 radar images. *Izvestiya vuzov «Geodeziya i aerofotosyemka»*. Izvestia vuzov «Geodesy and Aerophotosurveying». 2018, 62 (2): 162–172. [In Russian]. DOI: 10.30533/0536-101X-2018-62-2-162-172.

Поступила 8 декабря 2017 г.

Принята к печати 30 марта 2018 г.

**Ключевые слова:** географическое дешифрирование, динамика коэффициента обратного рассеяния, космические радиолокационные снимки, многолетняя мерзлота, обработка изображений, сезонные изменения, тематическое картографирование, Sentinel-1.

Исследованы возможности использования разносезонных радиолокационных снимков Sentinel-1A для картографирования природно-территориальных комплексов арктических районов на примере острова Котельный. Предложены способы создания производных радиолокационных изображений, пригодных для визуального и автоматизированного дешифрирования. Пространственные и временные различия

коэффициента обратного рассеяния позволили выделить границы природно-территориальных комплексов острова, характеризующихся разным сочетанием рельефа, растительного покрова и грунтов. Географическая интерпретация выделов и составление тематической карты выполнены с опорой на известные закономерности взаимодействия радиоволнового излучения с земной поверхностью и дополнительные источники.

**Для цитирования:** Балдина Е.А., Трошко К.А. Картографирование природно-территориальных комплексов острова Котельный по разновременным радиолокационным снимкам Sentinel-1 // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2018. Т. 62. № 2. С. 162–172. DOI: 10.30533/0536-101X-2018-62-2-162-172.

## Введение

Радиолокационное зондирование Земли и методы обработки получаемых в результате данных активно развиваются в последние десятилетия. Быстро растет и число спутников, и объемы поступающих данных. За несколько десятилетий разработки и использования радиолокационных систем съемки Земли установлена возможность применения этого вида данных в самых различных областях наук о Земле: геологии, гидрологии, океанологии, сельском, лесном и городском хозяйстве, при мониторинге чрезвычайных ситуаций и археологических изысканиях [1]. Одна из ранних областей применения радиолокационных снимков — инвентаризационное картографирование влажных тропических лесов, районы распространения которых особенно часто закрыты облаками; позже получило развитие картографирование запасов древесной фитомассы. К наиболее разработанным и нашедшим практическое применение относятся: создание оперативных карт ледовой обстановки для навигации, наводнений и пленочных загрязнений акваторий, а также формирование цифровых моделей рельефа и карт смещения поверхности на основе интерферометрических съемок.

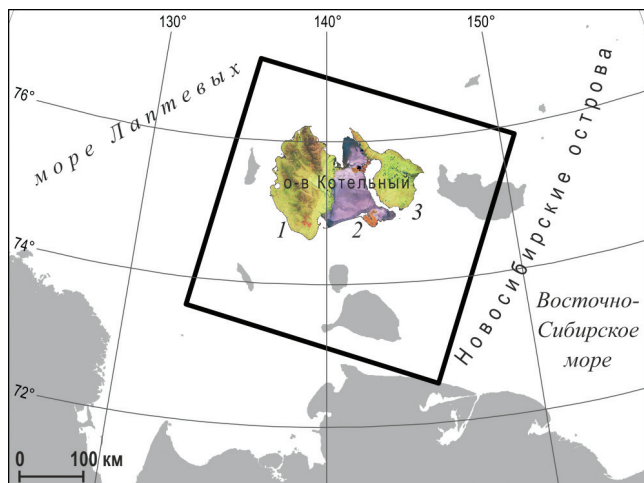
Космическая радиолокационная (РЛ) съемка позволяет круглосуточно при любой погоде вести наблюдения земной поверхности. Особо важна она для исследования и картографирования приполярных районов, где значительная часть года — полярная ночь, а короткий бесснежный период сопровождается сильной облачностью, ограничивающей применение снимков в оптическом диапазоне. Появление в открытом доступе современных (с 2014 г.) радиолокационных снимков со спутников

Sentinel-1 с высокой повторяемостью съемок [2] и распространение программных средств их обработки открывают новые возможности для географических исследований. За первые годы функционирования Sentinel-1 накоплены значительные объемы радиолокационных данных. Временные серии снимков этой космической системы уже применяются при исследованиях и мониторинге сельскохозяйственной [3] и лесной растительности [4], выявлении смещений поверхности [5].

В настоящей работе рассмотрены подходы к использованию многополяризационных и разновременных радиолокационных данных Sentinel-1 для картографирования природно-территориальных комплексов (ПТК) одного из островов Российской Арктики — острова Котельный.

## Характеристика исследуемой территории

Для исследования применимости радиолокационных снимков как источника данных для составления тематических карт выбран о. Котельный, входящий в состав архипелага Новосибирские острова. Он состоит из трёх частей (рис. 1), существенно различающихся по геологическому строению и рельефу. Исторически они получили следующие названия: о. Котельный, Земля Бунге и о. Фаддеевский. Западная часть острова — наиболее возвышенная, нижний гипсометрический уровень представлен прибрежной равниной со средними высотами 20–40 м, около половины площади занимают плато со средними высотами 80–120 м, а на юге некоторые отдельные вершины достигают высот более 200 м (максимальная — 361 м). Большая часть Земли Бунге представляет собой ровную не-



**Рис. 1. Остров Котельный.**

Рамкой выделен участок съемки Sentinel-1A; цифрами обозначены части острова: 1 — о. Котельный; 2 — Земля Бунге; 3 — о. Фаддеевский

**Fig. 1. Kotelniy island.**

Sentinel-1A scene location is highlighted by thick frame; numbers indicate the parts of the island: 1 — Kotelniy isl.; 2 — Bunge Land; 3 — Faddeevskiy isl

расчлененную песчаную пустыню с высотами 6–10 м. В центре ее расположена возвышенность Евсею-Булгуннях с высотами более 10 м, сложенная прочными дочетвертичными породами с признаками эрозионного расчленения, а на юго-востоке — возвышенность Земли Бунге высотой до 12–14 м с преимущественно термокарстовым расчленением. Восточная часть — о. Фаддеевский — представляет собой расчлененную низменную равнину со средними высотами 20–30 м, а на самом севере — до 65 м. Весь остров расположен в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты, поэтому его поверхность осложняют разнообразные микроформы криогенного рельефа.

Для этого района характерен арктический климат с низкими температурами и малым количеством осадков (130–140 мм), которые неравномерно распределены в течение года (максимум отмечается в июле и августе). Снежный покров держится не менее девяти месяцев, снегопады случаются и в летний период. Для островов Котельный и Фаддеевский характерна хорошо развитая речная сеть, распространены озера. Плоские понижения в пределах низменностей заболочены. Земля Бунге лиш-

на постоянных водотоков, но в летний период здесь образуются широкие ложбины стока талых вод. Растительный покров острова неравномерный и достаточно скудный, представлен кустарничками, многолетними травами, мхами и лишайниками, высота которых не превышает 10–15 см. Вегетационный период длится не более двух месяцев. Густота растительности во многом зависит от снежного покрова: в местах, лишенных снега в холодный период, растительность разрежена или полностью отсутствует. Наиболее богата флора в защищенных речных долинах и аласах [6–9]. Относительно большое для высоких широт ландшафтное разнообразие о. Котельный позволяет оценить возможности радиолокационных снимков для картографирования северных приполярных территорий в целом.

### **Космические радиолокационные снимки Sentinel-1A и их предварительная обработка**

В работе использованы радиолокационные снимки, полученные со спутника Sentinel-1A. Из архива [10] отобрано 19 разновременных снимков, охватывающих период с октября 2015 г. по сентябрь 2016 г. (таблица). Важно отметить, что с октября 2015 г. по май 2016 г. по данным двух метеостанций на территории острова наблюдались устойчивые отрицательные температуры воздуха, а в период с июня по сентябрь 2016 г. — преимущественно положительные. Выбранный сверхширокозахватный режим съемки (Extra-Wide Swath) обеспечивает одномоментное покрытие территории всего острова. Для исключения влияния факторов, не связанных с изменениями местности (угол, направление визирования и др.), подобраны разновременные снимки, полученные при одинаковых параметрах съемки.

Дешифрирование радиолокационных снимков затруднено ввиду различных причин (наличие спекл-шума, радиометрических и геометрических искажений, связанных с боковым обзором и др.), что обуславливает необходимость их предварительной обработки, направленной на создание производных радио-

Характеристика радиолокационных снимков Sentinel-1A

|                                      |                                                                                                                                                            |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Диапазон съемки, ГГц/см              | C (5,4/5,6)                                                                                                                                                |
| Режим съемки                         | EW – Extra-Wide Swath, сверхширокозахватный                                                                                                                |
| Уровень обработки                    | GRDM – Ground Range Detected Medium resolution – амплитудное изображение в проекции наклонной дальности со средним уровнем детальности                     |
| Пространственный охват, км           | 400×400                                                                                                                                                    |
| Размер пиксела, м                    | 40×40                                                                                                                                                      |
| Поляризация                          | Согласованная горизонтальная (ГГ), перекрестная горизонтально-вертикальная (ГВ)                                                                            |
| Даты съемки                          | 2015 г.: 7, 31 октября, 12, 24 ноября, 6, 18, 30 декабря; 2016 г.: 11, 23 января, 4 февраля, 10, 22 мая, 3, 15 июня, 9 июля, 2, 26 августа, 7, 19 сентября |
| Время съемки, UTC                    | 21:37                                                                                                                                                      |
| Угол падения излучения, угл. градусы | 19,2–46,5<br>(о. Котельный — в пределах 28,6–42,9)                                                                                                         |
| Номер витка                          | 105                                                                                                                                                        |
| Направление орбиты                   | Нисходящая                                                                                                                                                 |

локационных изображений (РЛИ), улучшенных с точки зрения их визуального восприятия и дальнейшей компьютерной обработки (прежде всего классификации). Этапы обработки различаются в зависимости от вида исходных данных (рис. 2).

Получаемые в результате производные радиолокационные изображения пригодны для дешифрирования. При этом изображения

для визуального дешифрирования могут быть представлены в единицах яркости и состоять не более чем из трех разновременных или разнополяризационных снимков. Изображения для автоматизированного дешифрирования должны быть выражены в физических единицах — удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР), которую называют также коэффициентом обратного рассеяния; они могут

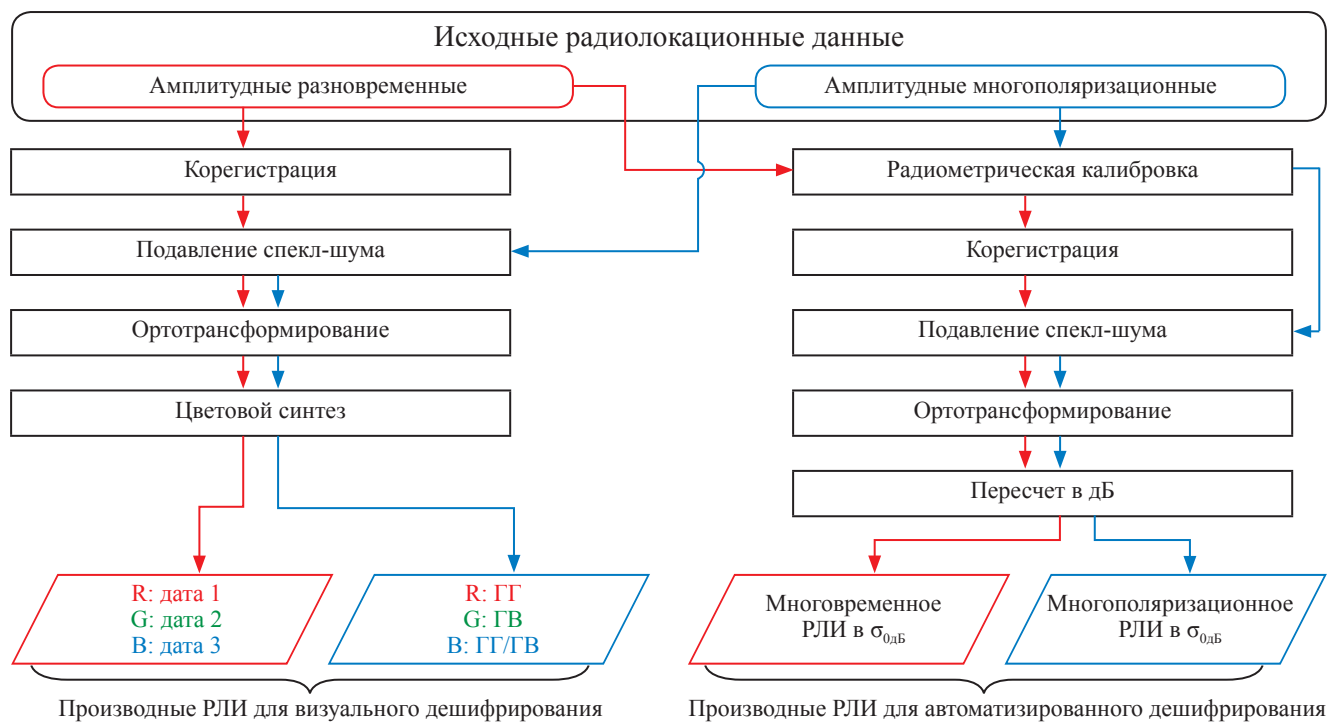
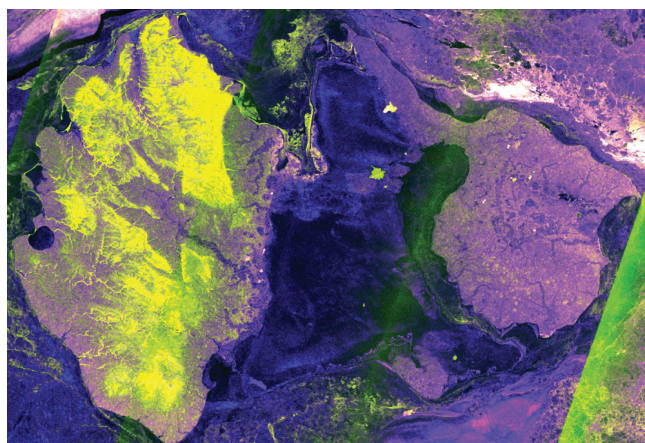
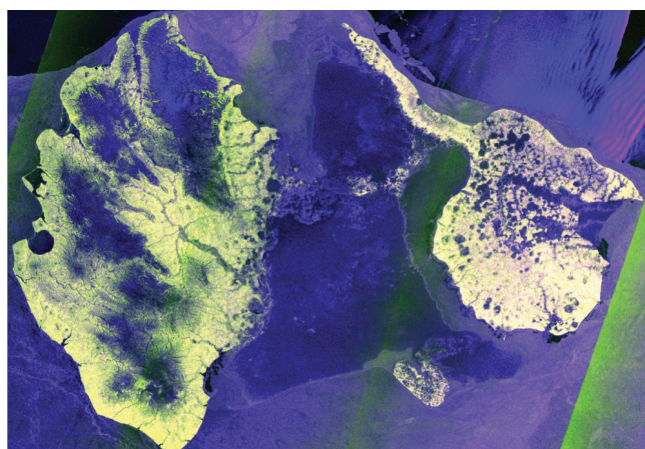


Рис. 2. Блок-схема формирования производных радиолокационных изображений на основе исходных снимков Sentinel-1

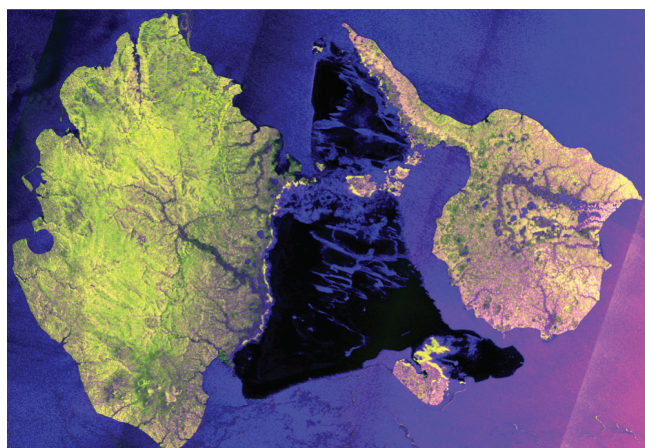
Fig. 2. The flowchart for modified Sentinel-1 radar images creation



*a*



*б*



*в*

**Рис. 3. Цветные синтезированные многополяризационные изображения Sentinel-1A (RGB синтез каналов: R — поляризация ГГ; G — ГВ; B — ГГ/ГВ) разных сроков съемки:**

*a* — 04.02.2016 г.; *б* — 03.06.2016 г.; *в* — 02.08.2016 г.

**Fig. 3. Time series of color composites from multi-polarized Sentinel-1A images (RGB synthesis: R — polarization HH; G — HV; B — HH/HV):**

*a* — 04.02.2016; *б* — 03.06.2016; *в* — 02.08.2016

содержать более трех каналов, представленных разновременными или разнополяризационными снимками.

### Дешифрирование производных изображений Sentinel-1A

Рассмотрим особенности отображения различных объектов на преобразованных многополяризационных радиолокационных изображениях, полученных в разные сроки. На рис. 3 представлены снимки, которые характеризуют типичное зимнее (04.02.2016 г.) состояние местности, ранневесеннее состояние после перехода температуры воздуха через 0 °C (03.06.2016 г.) и летнее (02.08.2016 г.) состояние.

На изображениях всех сроков отчетливо видны различия трех частей острова. Более разнообразные по рельефу и характеру растительного покрова острова Котельный и Фаддеевский имеют относительно высокую яркость и отображаются большим разнообразием цветов, в то время как однообразная песчаная пустыня Земли Бунге, практически лишенная растительности, имеет низкую яркость и изображается преимущественно черным и синим цветами. Особенности изображения некоторых объектов о. Котельный на многополяризационном снимке одного летнего срока были подробно рассмотрены авторами ранее [11]. На снимке зимнего периода (см. рис. 3, *a*) наиболее отчетливо выделяются следующие объекты: плато в центральной части и низкие горы на юге о. Котельный (желтый цвет), границы которых гораздо хуже различимы на летнем снимке (см. рис. 3, *в*). Части озер, имеющие высокую яркость на зимнем снимке, на местности соответствуют не промерзшим до дна участкам, в то время как полностью промерзшие части озер на РЛ изображении имеют низкую яркость [12]. На ранневесеннем снимке (см. рис. 3, *б*), благодаря наличию мокрого снега, приводящего к поглощению радиоволн и, как следствие, к понижению яркости на РЛ изображении [13], синим цветом выделяются плато и низкогорья в пределах о. Котельный,

а также речные долины и термокарстовые котловины.

Обращают на себя внимание яркие наклонные полосы, присутствующие на всех цветосинтезированных РЛ изображениях (см. рис. 3). Такие регулярные полосы, перпендикулярные к направлению полета космического аппарата (показаны голубыми стрелками на рис. 4) и направлению визирования (см. рис. 4, красные стрелки), свойственны снимкам в перекрестной поляризации и обусловлены особенностями съемки. Наиболее отчетливо эти искажения выражены на слабо рассеивающих сигнал поверхностях (участки морской поверхности, песчаные отложения). Их наличие на изображении ограничивает применение снимков в перекрестной поляризации для автоматизированного дешифрирования.

Автоматизированное выделение объектов, схожих по характеру обратного рассеяния, выполнялось с использованием неконтролируемой классификации (кластеризации) массива из 19 разносезонных снимков в согласованной горизонтальной (ГГ) поляризации, объединенных в одно многоканальное многовременное изображение. В этом случае выделяемые путем кластеризации объекты характеризуются сходным характером изменений УЭПР во времени. Рассмотрим объекты, выделяющиеся при кластеризации многовременного изображения при разном заданном числе кластеров (два и пять) и соответствующие им временные образы УЭПР (рис. 5).

При задании двух классов (см. рис. 5, а, б) выделяются следующие объекты:

*класс 1* — относительно ровная песчаная пустыня Земли Бунге, практически лишенная растительности. Невысокие значения УЭПР этого класса объясняются низкой степенью шероховатости поверхности и тем, что она сложена песчаными отложениями. Снижение значений УЭПР в летний период связано, вероятно, с просыханием песков (сухие песчаные отложения характеризуются низкой диэлектрической проницаемостью и способны пропускать радиоволну до глубины, где она встречается

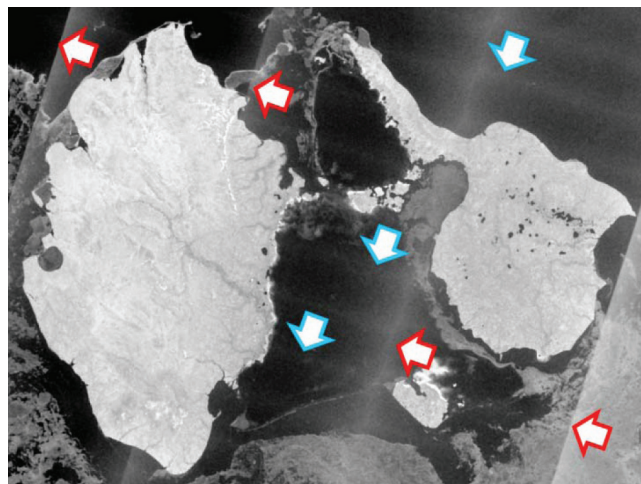


Рис. 4. Радиометрические искажения (показаны стрелками) на снимке Sentinel-1A, полученном в ГВ поляризации

Fig. 4. Radiometric distortions (marked by the arrows) on the Sentinel-1A HV-polarized image

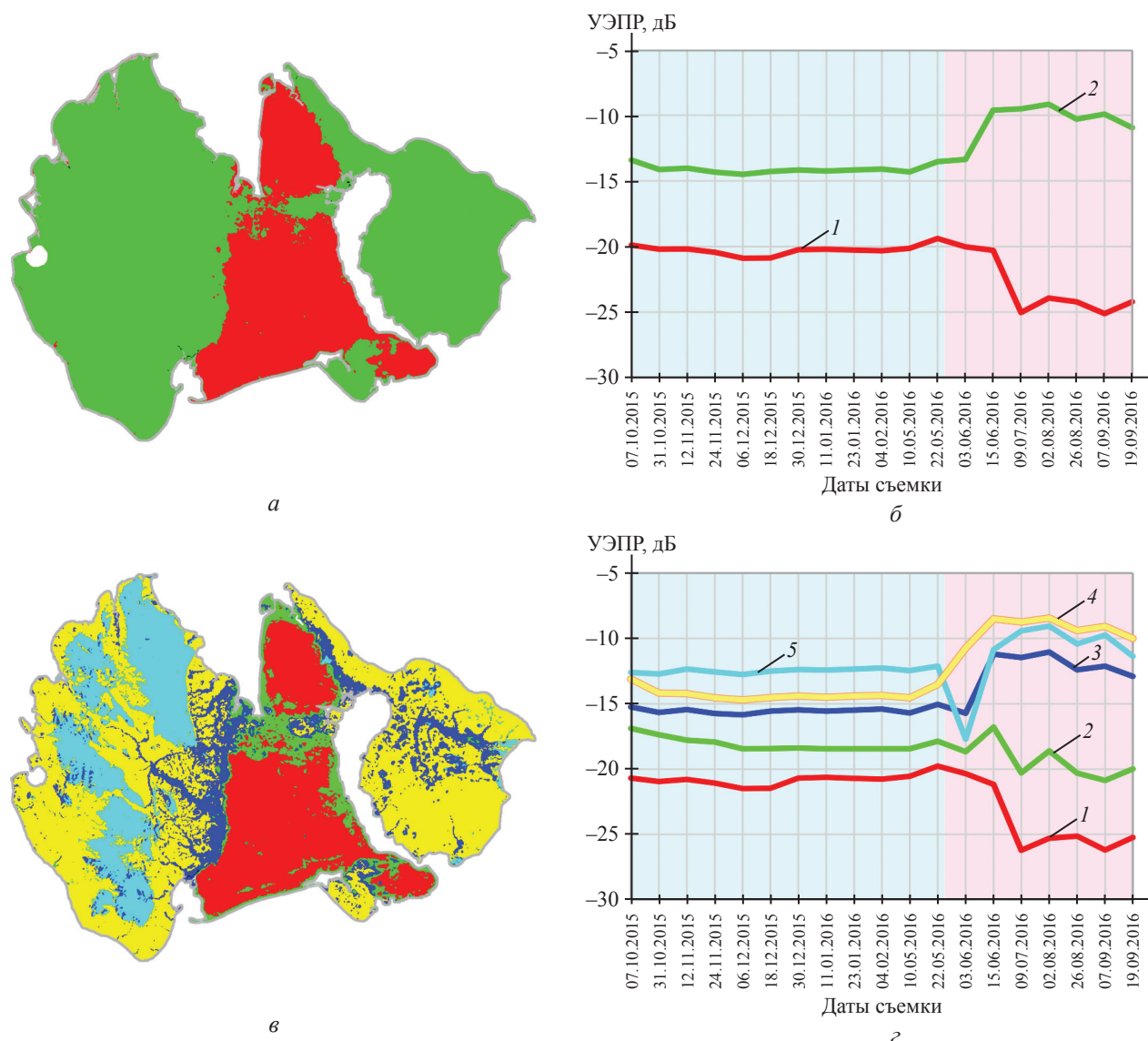
с объектом, имеющим иные диэлектрические свойства [13]);

*класс 2* — все остальные участки острова, характеризующиеся разными типами и степенью расчленения рельефа и разными типами растительного покрова. Для этого класса свойственны более высокие, чем для класса 1, значения УЭПР и зимой, и летом. Относительно низкие значения УЭПР в холодный период объясняются низкой диэлектрической проницаемостью промерзших грунтов, а относительно высокие значения в теплый период — более высокой диэлектрической проницаемостью протаявших грунтов и развитием растительности.

При задании пяти классов (см. рис. 5, в, г) выделяются:

*класс 1* — песчаная пустыня Земли Бунге, практически лишенная растительного покрова. График изменений средних значений УЭПР в целом похож на график класса 1 при кластеризации с выделением двух классов;

*класс 2* — преимущественно участки выхода прочных дочетвертичных пород с признаками эрозионного расчленения, практически лишенных растительного покрова. Этому классу свойственны достаточно низкие значения УЭПР в течение года, но выше, чем для ровной



**Рис. 5. Результаты неконтролируемой классификации многовременного производного РЛ изображения Sentinel-1A, составленного из 19 снимков в ГГ поляризации (07.10.2015–19.09.2016):**

*a* — два класса (1, 2); *v* — пять классов (1–5); *б* и *г* — графики временных образов кластеров; бледно-голубым цветом выделен период с устойчивыми отрицательными температурами воздуха; бледно-розовым — с преимущественно положительными

**Fig. 5. The results of unsupervised classification of multi-temporal Sentinel-1A image made up from 19 HH-polarized images (07.10.2015–19.09.2016):**

*a* — 2 classes (1, 2), *v* — 5 classes (1–5), *б* and *г* — temporal signatures of clusters; pale blue background corresponds to the period with stable negative air temperatures, pale pink — to mainly positive temperatures

песчаной пустыни, что объясняется большей шероховатостью поверхности;

*класс 3* — речные долины и термокарстовые котловины преимущественно с болотной растительностью. График УЭПР этого класса похож на график для класса 4, однако значения УЭПР несколько ниже, особенно летом. Это может быть связано с более плоским рельефом (по сравнению с участками расчлененной рав-

нины) и высокой степенью заболоченности; понижению значений УЭПР данного класса может способствовать как наличие пятен открытой водной поверхности между вегетирующей растительностью, суммарно приводящих к снижению интенсивности обратного рассеяния в пикселе РЛ изображения, так и тем, что относительно низкорослая растительность не препятствует прохождению радиоволны

до гладкой поверхности воды, что приводит к преобладанию однократного рассеяния;

*класс 4* — равнинные участки с разной степенью эрозионного и термокарстового расчленения, с тундровой растительностью. График изменений средних значений УЭПР похож на график класса 2 при кластеризации с выделением двух классов;

*класс 5* — участки платообразных возвышенных равнин. Для этого класса характерны самые высокие значения УЭПР в зимний период и одни из самых высоких — в летний, что можно связать как с большим числом склонов, обращенных в сторону радиолокатора, которые дают повышенный уровень обратного сигнала, так и с высокой степенью шероховатости поверхности за счет наличия грубообломочного материала. Понижение значений УЭПР 3 июня 2016 г. связано с присутствием мокрого снега на поверхности плато, который приводит к поглощению радиоволн.

Дальнейшая обработка многовременного снимка с увеличением задаваемого числа классов приводит к выделению природно-территориальных комплексов более низкого иерархического уровня. Некоторые участки, отчетливо распознаваемые при визуальном дешифрировании, начинают выделяться на результатах автоматизированного дешифрирования только при большом числе классов. Например, участок с высокой степенью эрозионного расчленения и обилием микроформ криогенного рельефа (байджарахов) в юго-восточной части о. Фаддеевский проявляется только при кластеризации с числом задаваемых классов 20 и более. При этом остальные выделяемые классы получают излишне дробными, что затрудняет использование такого результата для всей территории.

Кластеризация радиолокационного снимка позволяет выявлять радиogeосистемы [14] — участки со сходными значениями коэффициента обратного рассеяния радиосигнала, а в случае многовременного снимка — еще и со сходным характером его временной изменчивости. Создание карт радиogeосистем возможно, однако их понимание специалистами в

различных областях наук о Земле, не имеющих представления о радиолокационном зондировании и способности разных объектов рассеивать радиосигнал, затруднительно. В связи с этим проведено соотнесение радиogeосистем с природно-территориальными комплексами (ПТК), которым соответствует уникальное сочетание рельефа, растительного покрова и других компонентов среды.

### **Создание карты природно-территориальных комплексов острова Котельный**

При создании карты ПТК о. Котельный их границы были выделены с использованием результатов кластеризации производного многовременного радиолокационного изображения с последующим редактированием границ выделенных кластеров на основе визуального дешифрирования. При интерпретации полученных выделов существенную роль играл обширный комплект пространственно-координированных дополнительных источников. Это объясняется тем, что на обратный сигнал от различных участков острова влияет целый комплекс характеристик местности (рельеф, растительный покров, степень увлажнения поверхности и т.д.), и объяснение различий в интенсивности обратного сигнала только с опорой на известные закономерности взаимодействия радиоволнового излучения с поверхностями, имеющими разную шероховатость и диэлектрические свойства, является недостаточным. Дополнительные картографические источники (топографическая и геологическая карты масштаба 1:200 000, геоморфологические схемы масштаба 1:2 500 000, схема геоботанического районирования и др.) позволили установить соответствие областей, выделенных по многовременному радиолокационному снимку, объектам местности, представленным на уже созданных картах. Снимки в оптическом диапазоне Landsat-8/OLI дали возможность на отдельных участках оценить вклад в обратный сигнал таких характеристик местности, как обилие растительности, тип и степень расчленения поверхности и др.

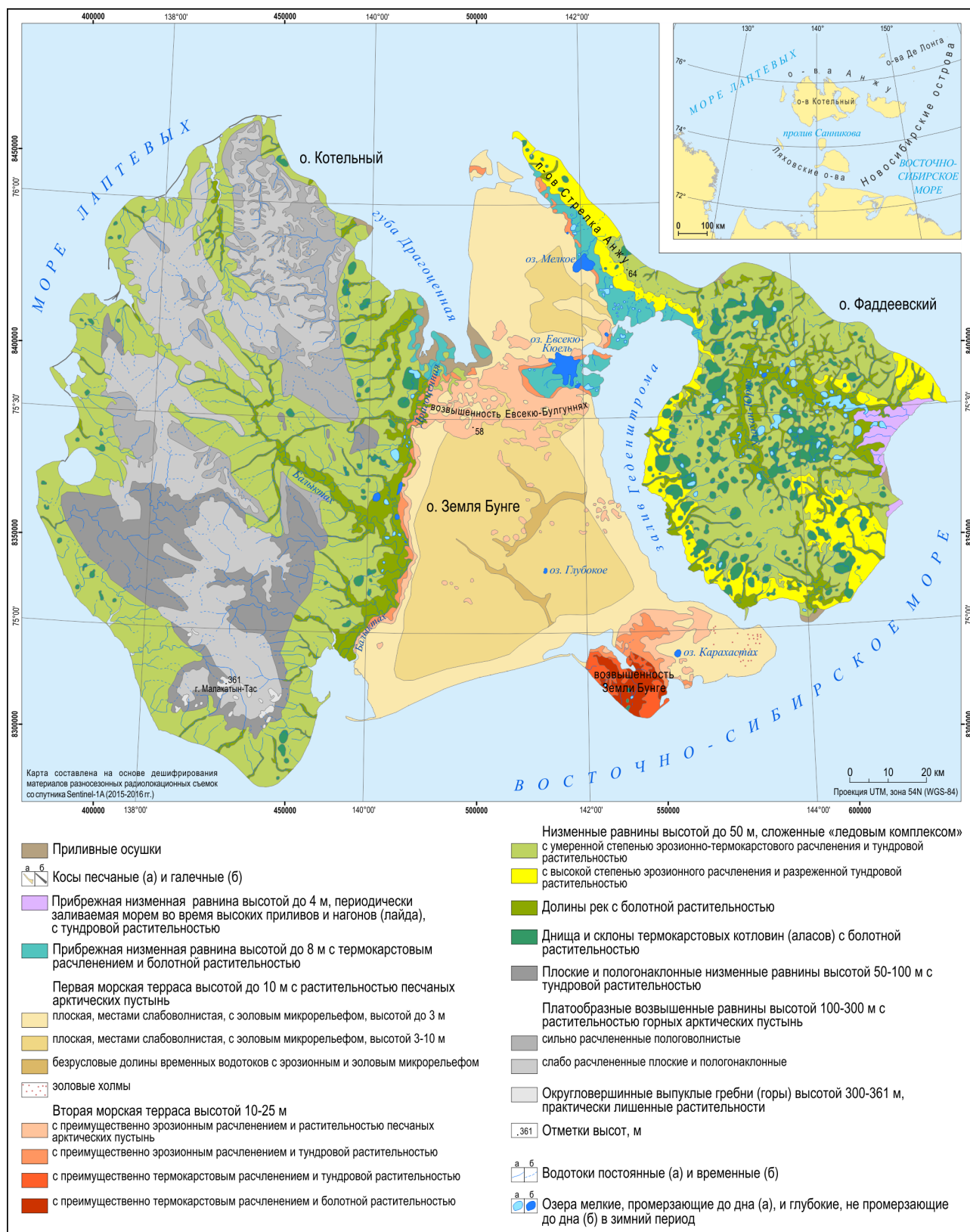


Рис. 6. Карта природно-территориальных комплексов острова Котельный, составленная на основе разносезонных снимков Sentinel-1A

**Fig. 6. The map of natural landscapes of Kotelny island created on the base of multi-seasonal Sentinel-1A images**

Таким образом, итоговая карта масштаба 1:750 000 (рис. 6) отражает современные природно-территориальные комплексы о. Котельный, границы которых проведены на основе многовременного радиолокационного изображения, а тематическое содержание базируется на сведениях, приведенных в дополнительных картографических источниках. Комплексы различаются по характеру сезонной изменчивости УЭПР, который обусловлен уникальным сочетанием рельефа, растительного покрова и грунтов. Благодаря наличию многовременных радиолокационных данных, итоговая карта характеризуется значительно большей детальностью и более крупным масштабом по сравнению с использованными тематическими источниками.

### Заключение

Благодаря гарантированному получению снимков независимо от облачности, солнечного освещения и высокой периодичности, радиолокационная съемка Sentinel-1 — ценный источник информации для картографирования удаленных и труднодоступных арктических районов. В результате проведения экспериментальных работ сформирован общий подход к использованию снимков Sentinel-1 для картографирования ПТК этих районов. В первую очередь, исходные РЛ данные требуют создания производных многополяризационных или многовременных изображений, пригодных для визуального и автоматизированного дешифрирования. Автоматизированное дешифрирование наиболее эффективно выполняется при использовании многовременного изображения, составленного из разносезонных сним-

ков в горизонтальной поляризации, однако его результаты нуждаются в редактировании с опорой на визуальный анализ. Сложность однозначной интерпретации радиолокационных изображений требует привлечения разнообразных дополнительных источников — карт и космических снимков в оптическом диапазоне. На основе разработанного подхода составлена среднемасштабная (1:750 000) карта природно-территориальных комплексов о. Котельный, характеризующая особенности рельефа, объектов гидрографии, растительности и грунтов этой территории.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность канд. геогр. наук Ф.А. Романенко, ведущему научному сотруднику географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, за консультации и ценные сведения об исследуемой территории, а также рекомендации по разработке легенды карты. Работа выполнена в рамках темы «Разработка технологий и методов мониторинга природно-антропогенных геосистем на основе данных дистанционного зондирования различного пространственного разрешения», рег. №0148-2018-0001.

**Acknowledgements.** The authors are grateful to PhD F.A. Romanenko, the leading scientist of Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, for consultations, valuable information about Kotelny island and the recommendations on the map legend elaboration. The work is completed within the scope of the topic: «Development of methods and techniques of natural-anthropogenic geosystems monitoring based on the data of the remote sensing with different spatial resolution», Reg. No. 0148-2018-0001.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ouchi K. Recent Trend and Advance of Synthetic Aperture Radar with Selected Topics // Remote Sensing. 2013. V. 5. № 2. P. 716–807. DOI:10.3390/rs5020716.
2. Электронный ресурс: Sentinel Online — ESA. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home>
3. Мышляков С.Г. Возможности радарных снимков Sentinel-1 для решения задач сельского хозяйства // Геоматика. 2016. № 2. С. 16–24.
4. Родионова Н.В. Сезонные вариации обратного рассеяния от естественных покровов Подмоскovie в сезон 2015–2016

### REFERENCES

1. Ouchi K. Recent Trend and Advance of Synthetic Aperture Radar with Selected Topics. Remote Sensing. 2013, 5 (2): 716–807. DOI:10.3390/rs5020716.
2. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home>
3. Myshlyakov S.G. Possibilities of Sentinel-1 radar imagery for agriculture. *Geomatica*. Geomatics. 2016, 2: 16–24. [In Russian].
4. Rodionova N.V. Seasonal variations of backscatter from natural covers of Moscow region during the season 2015–2016 based on Sentinel-1A radar data. *Materialy XIV Vserossiyskoy otkrytoy konferentsii «Sovremennyye problemy dstantsionnogo*

годов по радарным данным Sentinel-1A // Материалы XIV Всерос. открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2016. С. 367–367.

5. Crosetto M., Monserrat O., Devanthery N., Cuevas-González M., Barra A., Crippa B. Persistent scatterer interferometry using Sentinel-1 data // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. 2016. XLI-B7. P. 835–839. doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B7-835-2016.

6. Новосибирские острова: Сб. статей / Под ред. Г.Л. Рутилевского и Р.К. Сиско. Л.: Морской транспорт, 1963. 233 с.

7. Новосибирские острова: Физико-географическая 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. Материалы комплексного экологического обследования участков территории, обосновывающего придание этой территории правового статуса особо охраняемой природной территории федерального значения – Государственного природного заказника «Новосибирские острова»: Т. 1. М.: Всемирный фонд дикой природы, 2015. 484 с.

10. Электронный ресурс: Scientific Data Hub. <https://scihub.copernicus.eu/>

11. Балдина Е.А., Трошко К.А., Николаев Н.Р. Радиолокационные данные Sentinel-1 и возможности их обработки для дешифрирования форм рельефа острова Котельный // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2016. № 3. С. 78–85.

12. Atwood D.K., Gunn G.E., Roussi C., Wu J., Duguay C., Sarabandi K. Microwave backscatter from Arctic lake ice and polarimetric implications // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2015. № 53. P. 5972–5982. DOI: 10.1109/TGRS.2015.2429917.

13. Woodhouse I. Introduction to Microwave Remote Sensing. CRC Press, 2005. 400 p.

14. Некос В.Е. Основы радиофизической географии. Харьков: изд. Харьковского ун-та, 1986. 89 с.

zondirovaniya Zemli iz kosmosa». Proceedings of XIV all-Russian open conference «Actual problems of space remote sensing of the Earth». Moscow: SRI RAS, 2016: 367–367. [In Russian].

5. Crosetto M., Monserrat O., Devanthery N., Cuevas-González M., Barra A., Crippa B. Persistent scatterer interferometry using Sentinel-1 data. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. 2016, XLI-B7: 835–839. DOI:10.5194/isprsarchives-XLI-B7-835-2016.

6. Novosibirskie ostrova: Sbornik statey. The New Siberian Islands: Collected articles. Edited by G.L. Rutilevsky and R.K. Sisko. Leningrad: Morskoy Transport, 1963: 233 p. [In Russian].

7. Novosibirskie ostrova. Fiziko-geograficheskaya kharakteristika arhipelaga. The New Siberian Islands. Geographical characteristics of the archipelago. Edited by Ya.Ya. Gakkel. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1967: 212 p. [In Russian]

8. Sovetskaya Arktika. Morya i ostrova Severnogo Ledovitogo okeana. Soviet Arctic. Seas and islands of the Arctic Ocean. Moscow: Nauka, 1970: 526 p. [In Russian].

9. Materialy kompleksnogo ekologicheskogo obsledovaniya uchastkov territorii, obosnovyuyushhego pridanie etoy territorii pravovogo statusa osobo okhranyaemoy prirodnoy territorii federal'nogo znacheniya — gosudarstvennogo prirodnogo zakaznika «Novosibirskie ostrova»: Tom 1. The materials of a complex ecological survey of sites that justify granting this area the status of specially protected natural area of federal significance — the state natural reserve «New Siberian Islands»: t. 1. Moscow: WWF, 2015: 484 p. [In Russian].

10. URL: <https://scihub.copernicus.eu/>

11. Baldina E.A., Troshko K.A., Nikolaev N.R. Sentinel-1 radar data and their processing capabilities for relief features interpretation of Kotelnny island. Izvestiya vuzov «Geodeziya i aerofotosyemka». Izvestia vuzov «Geodesy and Aerophotosurveying». 2016, 3: 78–85. [In Russian].

12. Atwood D.K., Gunn G.E., Roussi C., Wu J., Duguay C., Sarabandi K. Microwave backscatter from Arctic lake ice and polarimetric implications. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2015, 53: 5972–5982. DOI: 10.1109/TGRS.2015.2429917.

13. Woodhouse I. Introduction to Microwave Remote Sensing. CRC Press, 2005: 400 p.

14. Nekos V.E. Osnovy radiofizicheskoy geografii. Fundamentals of radiophysical geography. Kharkiv: Kharkiv University, 1986: 89 p. [In Russian].