
**МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ АНАЛИЗА И КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ,
ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ**

**METHODS AND INSTRUMENTS FOR ANALYSIS AND MONITORING
OF THE NATURAL ENVIRONMENT, SUBSTANCES, MATERIALS AND PRODUCTS**

УДК 528.88:504.064:551.501.89
DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-4-359-367

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРИРОДНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ
ТАЗОВСКОГО ПОЛУОСТРОВА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МНОГОСПЕКТРАЛЬНОЙ
И РАДИОЛОКАЦИОННОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ**

Е. Ф. ЧИЧКОВА*, В. А. ХАМЕДОВ, С. А. РОГАЧЕВ

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Санкт-Петербург, Россия

**efchichkova@yandex.ru*

Аннотация. Рассмотрены особенности изучения внутрисезонной изменчивости природно-территориальных комплексов (ПТК) в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) средствами многоспектрального и радиолокационного космического мониторинга. Из-за особых условий освещенности и высокой облачности возможности космических аппаратов (КА) с оптическими приборами на борту ограничены для съемки территорий АЗРФ. Для обеспечения космического мониторинга природных территорий АЗРФ необходима разработка методик с использованием радиолокационных методов, не зависящих от условий съемки. На примере отдельно взятого региона АЗРФ — Тазовского полуострова — проанализирована внутрисезонная изменчивость наиболее характерных типов ПТК (кустарничко-лишайниковые тундры; сфагновые болота; ивняки травяные; песчаные отмели и антропогенные объекты). Методы исследования включают интерферометрическую обработку исходных радиолокационных данных SAR КА Sentinel-1B и обработку данных КА Sentinel-2A, 2B по алгоритмам классификации и расчета спектральных вегетационных индексов. На основе результатов классификации поверхностей полигона Тазовского полуострова, проведенной по многоспектральной космической информации, выбраны четыре опорных участка ПТК. Анализ стабильности и изменчивости поверхностей на выбранных участках полигона проведен на основе рассчитанных рядов интерферометрической когерентности для каждого типа ПТК в бесснежный период 2021 года. Для интерпретации полученных результатов использованы статистически обработанные ряды метеорологических наблюдений за температурой воздуха и осадками и данные вегетационных индексов. Результаты исследования могут быть наиболее востребованными в производственно-экологическом мониторинге нефтегазовой отрасли и охране окружающей среды с целью соблюдения техносферной безопасности и выявления степени антропогенной нарушенности территорий АЗРФ.

Ключевые слова: *космический мониторинг, арктическая зона, многоспектральные данные, радиолокационные данные, интерферометрическая когерентность, изменчивость, природно-территориальный комплекс*

Благодарности: авторский коллектив выражает искреннюю благодарность за профессиональные консультации при подготовке данной публикации начальнику Гидрометцентра ФГБУ „Северо-Западное УГМС“ А. М. Колесову и кандидату биологических наук, доценту РГПУ им. А. И. Герцена Н. В. Кобелевой. Работа выполнялась в рамках темы Госзадания № FSRF-2023-0003.

Ссылка для цитирования: *Чичкова Е. Ф., Хамедов В. А., Рогачев С. А. Исследование изменчивости природно-территориальных комплексов Тазовского полуострова на основе данных многоспектральной и радиолокационной космической съемки // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 4. С. 359—367. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-4-359-367.*

© Чичкова Е. Ф., Хамедов В. А., Рогачев С. А., 2024

**STUDY OF THE VARIABILITY OF NATURAL-TERRITORIAL COMPLEXES OF THE TAZ PENINSULA
BASED ON MULTISPECTRAL AND RADAR SPACE SURVEY DATA****E. F. Chichkova*, V. A. Khamedov, S. A. Rogachev***St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia
efchichkova@yandex.ru*

Abstract. The features of studying intraseasonal variability of natural-territorial complexes in the Arctic zone of the Russian Federation using multispectral and radar space monitoring are considered. Due to special lighting conditions and high cloudiness, the capabilities of spacecraft with optical instruments on board for surveying the territories of the Russian Arctic, are limited. To ensure space monitoring of natural territories of the Russian Arctic, it is necessary to develop techniques using radar methods that do not depend on shooting conditions. Using the example of a single region of the Russian Arctic – the Taz Peninsula – the intraseasonal variability of the most characteristic types of natural-territorial complexes (shrub-lichen tundra; sphagnum bogs; grass willows; sandbanks and anthropogenic objects) is analyzed. Research methods include interferometric processing of original SAR radar data from the Sentinel-1B spacecraft and processing of data from the Sentinel-2A, 2B spacecrafts using algorithms for classification and calculation of spectral vegetation indices. Based on the results of classification of the surfaces of the Taz peninsula test site, carried out using multispectral space information, four reference areas of the natural-territorial complex were selected. An analysis of the stability and variability of surfaces in selected areas of the test site was carried out on the basis of calculated series of interferometric coherence for each type of natural-territorial complex in the snow-free period of 2021. To interpret the results obtained, statistically processed series of meteorological observations of air temperature and precipitation and data from vegetation indices were used. The results of the study may be most in demand in industrial and environmental monitoring of the oil and gas industry and environmental protection in order to maintain technosphere safety and identify the degree of anthropogenic disturbance in the territories of the Russian Arctic.

Keywords: space monitoring, Arctic zone, multispectral data, radar data, interferometric coherence, variability, natural-territorial complex

Acknowledgments: The team of authors expresses sincere gratitude for the professional advice in the preparation of this publication to the head of the Hydrometeorological Center of the Federal State Budgetary Institution “North-West UGMS” A. M. Kolesov and to Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the A. I. Herzen Russian State Pedagogical University N. V. Kobeleva. The work was carried out within the framework of the theme of State Assignment No. FSRF-2023-0003.

For citation: Chichkova E. F., Khamedov V. A., Rogachev S. A. Study of the variability of natural-territorial complexes of the Taz peninsula based on multispectral and radar space survey data. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 4. P. 359—367 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-4-359-367.

Введение. Любой природно-территориальный комплекс (ПТК) Арктики является хрупкой и уникальной системой, которая неизбежно изменяется согласно естественным закономерностям, а также вследствие возрастающей антропогенной нагрузки на регион. Задачи мониторинга ПТК Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) в целом следующие: определение изменений компонентов окружающей среды, классификация изменений, выяснение их масштабов и определение допустимости изменений [1—4].

Современный подход к космическому мониторингу заключается в разработке методов и технологических решений, учитывающих значительные трудо-, время-, ресурсоемкость проведения контроля среды и позволяющих повышать его эффективность [5, 6]. В последнее время в исследованиях возможностей проведения мониторинга северных регионов РФ помимо многоспектрального зондирования все большее значение уделяется радиолокационным спутниковым данным [7—9].

Использование данных различных космических систем радиолокационного наблюдения (Radarsat-1,-2, ENVISAT/ASAR, ERS-1,-2, TerraSAR-X и др.) для исследований и самого мониторинга территорий долгое время было практически недоступно из-за высокой стоимости данных. С 2014 года после запуска КА Sentinel-1A Европейским космическим агентством (ESA) открыт бесплатный доступ к архиву снимков на портале программы „Коперник“^{4*}.

* Open Access Hub, <https://scihub.copernicus.eu>.

Для настоящей работы первостепенное значение имеет опыт исследования на основе радиолокационных данных тундровых территорий АЗРФ [10—13]. Понятие когерентности как результата интерферометрической обработки радиолокационных данных в настоящей работе характеризует стабильность и изменчивость в определенном временном интервале подстилающей поверхности Земли. В работе [12] значения интерферометрической когерентности используются для анализа тундровых территорий АЗРФ на примере острова Котельный. Особая результативность при проведении мониторинга различных ПТК АЗРФ свойственна совместному использованию многоспектральной и радиолокационной съемки [12, 13]. Для исследования изменчивости подстилающей поверхности был выбран полигон на Тазовском полуострове. Временной интервал для космического мониторинга — бесснежный период 2021 года.

Описание полигона исследования. Выбор полигона для исследования ПТК на территории Тазовского полуострова обусловлен географическим расположением с типичными для АЗРФ климатическими и ландшафтными характеристиками и наличием техногенных объектов Ямбургского месторождения природного газа. Полигон расположен в центральной части полуострова Тазовский (выделено на рис. 1).

Поверхность Тазовского полуострова, особенно прибрежных террас, расчленена густой сетью оврагов, логов, ложбин и мелких речных долин. Поймы рек нередко представляют собой песчаные равнины, не закрепленные растительностью; многие поймы сильно заболочены и изрезаны многочисленными старицами и протоками. Сплошное распространение многолетней мерзлоты и ее поверхностное залегание приводят к повсеместному развитию криогенных и термокарстовых форм рельефа [14]. Следствием разнообразия форм микрорельефа и микроклиматических условий является растительный покров с ярко выраженным неоднородным горизонтальным сложением: бугорковатые, полигональные, пятнистые тундры, полигональные болота, лиственничные редколесья [15].

На формирование климата влияют многолетняя мерзлота, близость холодного Карского моря, обилие болот, озер и рек. Долгая зима, короткое прохладное лето, сильные ветра, незначительный снежный покров — все это способствует промерзанию почвы на большую глубину. Климатические условия 2021 года характеризовались аномально теплыми весенним и летним, а также аномально холодным зимним сезонами [16]. Наиболее значительный дефицит осадков в районе Обской губы наблюдался в январе—феврале (40—80 % нормы для севера страны), поэтому здесь были получены значительные отрицательные аномалии запаса воды в снеге.

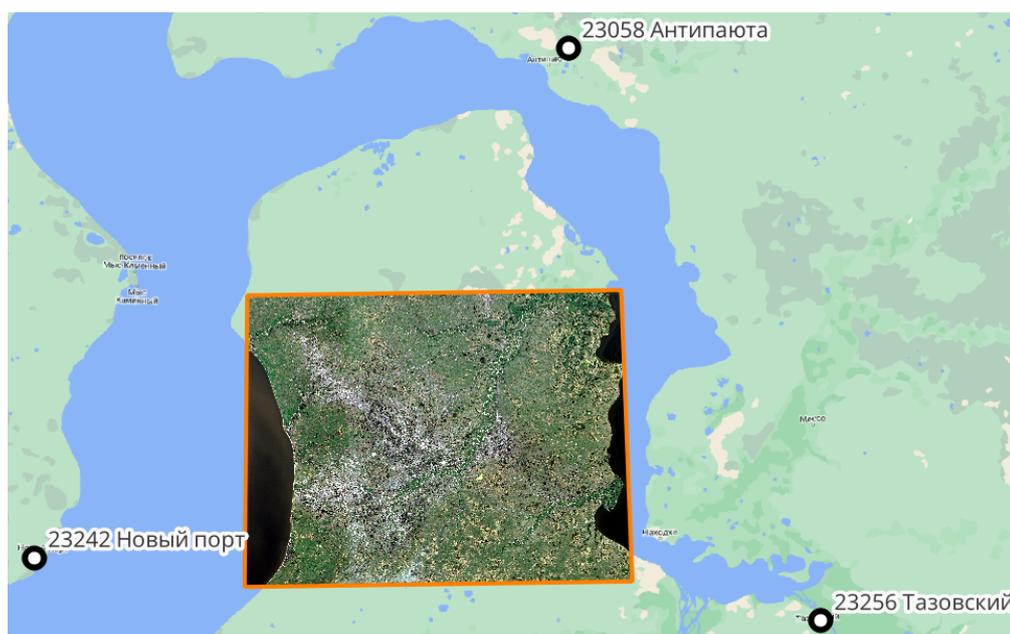


Рис. 1

Данные и методы исследования. При выполнении исследований использованы данные с космических аппаратов Sentinel-1B и Sentinel-2A, 2B ESA. Обработка данных проводилась с помощью специализированных программ Sentinel Application Platform (SNAP) ESA и ERDAS Imagine.

На первом этапе космического мониторинга полигона использовались данные мультиспектральной камеры MSI КА Sentinel-2 A, B в трех каналах видимого (0,490; 0,560; 0,665 мкм) и в одном ближнем инфракрасном (0,842 мкм) диапазоне спектра. Успешная совместная работа обоих спутников обеспечивает систематическое покрытие космическими снимками территории между 84° с.ш. и 56° ю.ш. с пространственным разрешением 10 м в надире. Исходные данные КА Sentinel-2 размещены в открытом доступе.

В результате отбора в бесснежный период 2021 года при малооблачной атмосфере были получены многоспектральные спутниковые данные за 17.06.2021, 15.07.2021, 05.09.2021. Пример снимка КА Sentinel-2 для полигона приведен на рис. 1. Тематическая обработка многоспектральных данных заключалась в классификации подстилающих поверхностей, идентификации типов выбранных классов и в построении индексов вегетации. Для классификации выбрано растровое изображение космической съемки КА Sentinel-2 за 15.07.2021. Был использован метод неуправляемой классификации ISODATA — итерационная самоорганизующаяся методика анализа данных (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique).

В качестве объекта при использовании спектральных индексов чаще всего выступает растительность. Наиболее используемый индекс NDVI — нормализованный разностный индекс растительности (Normalized Difference Vegetation Index) — впервые был описан В. J. Rouse в 1974 г. [17]. NDVI рассчитывается как соотношение разности значений радиационной яркости ближнего инфракрасного и красного каналов к их сумме. Индекс может принимать значения от -1 до 1 . Для растительности индекс NDVI принимает положительные значения, и чем больше зеленой фитомассы, тем он выше. На значение индекса влияет также видовой состав растительности, ее сомкнутость, состояние, экспозиция и угол наклона поверхности, цвет почвы под разреженной растительностью. Индекс умеренно чувствителен к изменениям почвенного фона, кроме случаев, когда густота растительного покрова ниже 30 %. NDVI был рассчитан для всего набора данных КА Sentinel-2.

На втором этапе космического мониторинга территории полигона Тазовского полуострова для получения информации об изменчивости наблюдаемой поверхности в работе использовались комплексные радиолокационные данные (продукт SLC уровня обработки Level-1), включающие амплитуду и фазу сигнала. Радиолокационная станция с синтезированной апертурой Synthetic Aperture Radar (SAR) на борту КА Sentinel-1B обеспечивает всепогодную съемку в С-диапазоне (длина волны 6 см). При помощи программного обеспечения SNAP выполнен автоматизированный расчет когерентности для десяти интерферометрических пар изображений, полученных с периодичностью в двенадцать суток в бесснежный период с 16.06.2021 по 02.10.2021. В итоге получены значения интерферометрической когерентности в согласованной вертикальной поляризации VV для выбранных типов подстилающей поверхности.

Для интерпретации результатов при дешифрировании космических снимков проанализированы погодные условия полигона в бесснежный период 2021 года по данным наблюдений трех станций 23058 Антипаюта (69,15 с.ш. и 77,00 в.д.), 23256 Тазовский (67,47 с.ш. и 78,73 в.д.) и 23242 Новый порт (67,68 с.ш. и 72,87 в.д.). Использовались следующие метеоданные: температура воздуха и количество осадков. Данные по трехчасовым срокам наблюдений осреднены за метеорологические сутки с 21:00 предыдущей даты до 18:00 текущей.

Результаты исследования. Использование данных оптических и радиолокационных космических снимков в совокупности повышает оперативность мониторинга ПТК в любой географической зоне. Это особенно важно для территории АЗРФ, где многоспектральная

спутниковая съемка может дать опорную информацию приблизительно 1—5 раз в год из-за сильной облачности.

Анализ результатов проведенного спутникового мониторинга по данным различных космических систем показал, что территория полигона на Тазовском полуострове обладает значительной внутрисезонной изменчивостью (среднестатистический коэффициент интерферометрической когерентности по радиолокационной съемке не превышает 0,4 единиц). На рис. 2 представлен фрагмент растрового изображения результатов классификации по данным 15.07.2021 с КА Sentinel-2 с обозначенными опорными участками для исследования изменчивости типов ПТК. Выбраны наиболее значимые для данного полигона четыре типа ПТК: кустарничко-лишайниковые тундры (68,108712° с.ш. и 76,228135° в.д.); сфагновые болота (68,095094° с.ш., 76,321931° в.д.); ивняки травяные (68,1013062° с.ш., 76,234993° в.д.); песчаные отмели (68,093949° с.ш., 76,300009° в.д.) и антропогенные объекты. Другие виды тундровых сообществ объединены в отдельный тип (рис. 2).



Рис. 2

Индекс вегетации был рассчитан для статистически значимых наборов точек, выбранных по всему полигону Тазовского полуострова. В таблице представлены статистические характеристики NDVI (среднее значение/среднеквадратическое отклонение) для классов ПТК с размером выборки набора данных *n*.

Дата съемки КА Sentinel-2	Песчаные отмели и антропогенные объекты (<i>n</i> = 32)	Кустарничково-лишайниковые тундры (<i>n</i> = 42)	Сфагновые болота (<i>n</i> = 37)	Ивняки травяные (<i>n</i> = 39)
17.06.2021	0,059/0,016	0,154/0,024	0,261/0,043	0,185/0,019
15.07.2021	0,076/0,021	0,206/0,034	0,326/0,039	0,425/0,039
05.09.2021	0,067/0,024	0,156/0,020	0,268/0,033	0,269/0,024

На рис. 3, *а* построены график внутрисезонной изменчивости средней температуры *T* и гистограмма суммарного количества осадков *R* за 12-дневные периоды для территории полигона. На рис. 3, *б* для четырех выбранных участков ПТК представлены графики интерферометрической когерентности *K*, построенные на основе обработки радиолокационных данных Sentinel-1B, и гистограмма средних значений вегетационного индекса NDVI из таблицы.

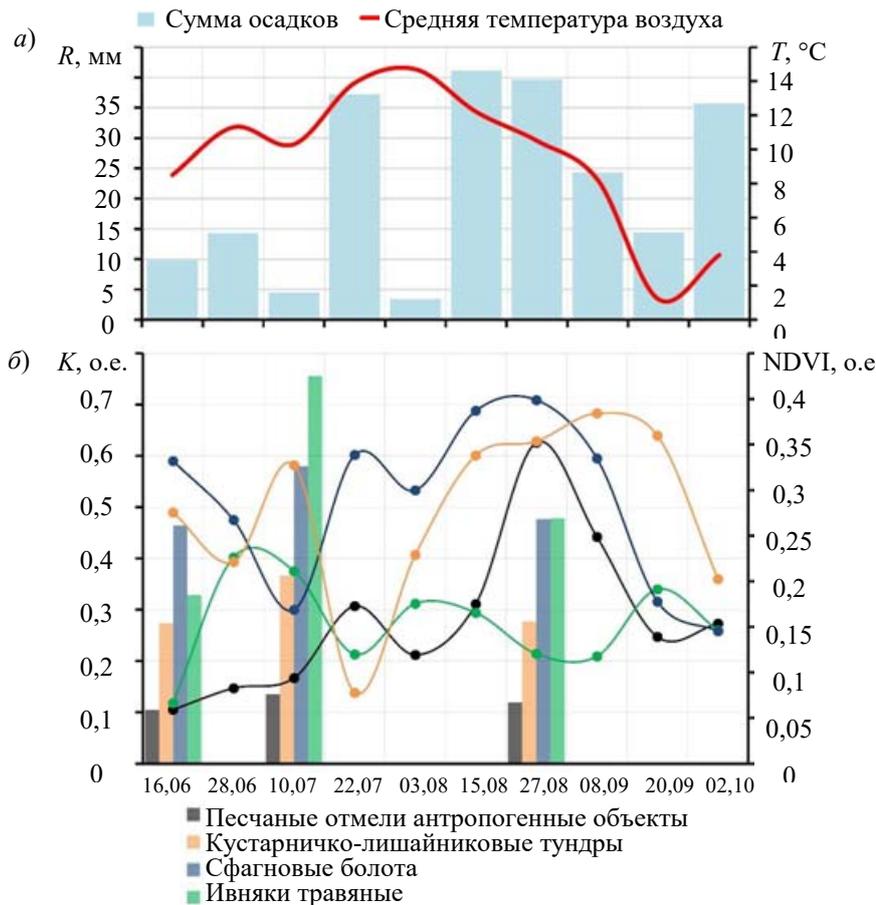


Рис. 3

Значения когерентности сопоставлены с результатами расчетов по данным метеорологических станций (температура воздуха, количество осадков), а также значениями вегетационных индексов, полученных по спутниковым данным в оптическом диапазоне. Ввести в рассмотрение характеристику скорости ветра оказалось невозможно из-за частой повторяемости сильного ветра (более 10 м/с).

Комплексный анализ временных рядов рассчитанных характеристик за бесснежный период 2021 года позволяет сделать общие выводы об изменчивости выбранных участков ПТК (рис. 3):

1) интерферометрическая когерентность на исследуемых участках варьирует в пределах $K = 0,11—0,71$;

2) наиболее стабильна поверхность сфагновых болот и кустарничко-лишайниковых тундр;

3) максимальная изменчивость поверхностей кустарничко-лишайниковых тундр с $K = 0,21$ соответствует периоду активной вегетации в конце июля при выпадении значительной суммы осадков и высокой температуре ($T = 14^\circ \text{C}$);

4) участок травяных ивняков, расположенный на хасырее, обладает наибольшей изменчивостью из всех ПТК при $K = 0,12—0,40$ и достигает максимальной устойчивости лишь в первой половине июля, в период максимальной вегетации травянистых растений;

5) для участка на песчаной отмели отмечается устойчивость покрова с конца августа до середины сентября, вероятно, вследствие большого для этого региона количества осадков ($R = 40$ мм за 12 дней);

6) при появлении осадков в виде снега (рис. 3, б, 02.10.2021) состояние поверхностей всех типов ПТК нестабильно;

7) характеристики вегетационных индексов, как показатели изменчивости подстилающих поверхностей на полигоне Тазовского полуострова, имеют небольшой разброс для каждого выбранного типа ПТК с коэффициентом вариации 0,07—0,15;

8) самый высокий вегетационный индекс на полигоне Тазовского полуострова имеет ПТК „ивняки травяные“ (значение 0,4 в июле).

Заключение. По результатам космического мониторинга, проведенного на территории тестового полигона Тазовского полуострова, выявлены особенности динамики состояния ПТК для преобладающих типов подстилающих поверхностей в бесснежный период 2021 года. Совместное использование данных многоспектральной и радиолокационной космической съемки территории полигона позволяет отслеживать временную и пространственную изменчивость ПТК АЗРФ. Совместный статистический анализ данных о погодных условиях и дополнительных источников информации о характере местности позволяет интерпретировать результаты космического мониторинга. Вместе с этим для изучения взаимосвязи результатов, полученных с использованием данных многоспектральной и радиолокационной космической съемки, требуются дополнительные исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кобелева Н. В. Крупномасштабное эколого-фитоценотическое картографирование на основе аэроснимков и ГИС-технологий (на примере центральной части Тазовского полуострова) // Изв. Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14, № 1-6. С. 1607—1617.
2. Московченко Д. В., Арефьев С. П., Глазунов В. А., Тигеев А. А. Изменение состояния растительности и геоэкологических условий Тазовского полуострова (восточная часть) за период 1988—2016 гг. // Криосфера Земли. 2017. Т. 21, № 6. С. 3—13. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-6(3-13).
3. Московченко Д. В., Глазунов В. А., Тигеев А. А. Исследование динамики растительного покрова восточной части Тазовского полуострова // Экологический мониторинг и биоразнообразие. 2016. № 1(11). С. 91—96.
4. Арефьев С. П. Реакция деревьев и кустарников восточной части Тазовского полуострова на потепление климата // Экологический мониторинг и биоразнообразие. 2016. № 1(11). С. 5—9.
5. Минаков Е. П., Чичкова Е. Ф. Мониторинг чрезвычайных ситуаций с использованием дистанционного зондирования Земли // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 4. С. 23—27.
6. Чичкова Е. Ф., Кочин Д. А., Рогачев С. А. Информационно-аналитический сервис и технологии мониторинга потенциально опасных зон по данным спутникового многоспектрального зондирования // Космические аппараты и технологии. 2023. Т. 7, № 2. С. 132—141. DOI: 10.26732/j.st.2023.2.06.
7. Мазуров Б. Т., Аврунев Е. И., Хамедов В. А. Оперативный мониторинг лесных земель северных регионов на основе использования оптических и радарных космических снимков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 4. С. 103—111.
8. Мышляков С. Г. Возможности радарных снимков Sentinel-1 для решения задач сельского хозяйства // Геоматика. 2016. № 2. С. 16—24.
9. Копылов В. Н., Полищук Ю. М., Хамедов В. А. Синтез оптических и радиолокационных космических снимков при решении задачи оперативного обнаружения лесных гарей // Гео-Сибирь. 2007. Т. 3. С. 157—162.
10. 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.
11. Antonova S., Käab 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. Vol. 182. P. 169—191. DOI:10.1016/j.rse.2016.05.003.
12. Трошко К. А., Балдина Е. А., Мартыянов А. С., Денисов П. В. Географическая интерпретация временных изменений когерентности по радиолокационным данным Sentinel-1 (на примере острова Котельный) // Матер. 17-й Всерос. открытой конф. „Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса“. М., 11—15 ноября 2019 г. М.: Ин-т космических исследований РАН, 2019. С. 461.

13. 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. N 4. P. 3741—3765. DOI:10.3390/rs4123741.
14. Строительство поглощающих скважин № 1п, 2п, 3п месторождения Каменномысское-море. Оценка воздействия на окружающую среду. М., 2022. 274 с. [Электронный ресурс]: <https://seaprojects.gazprom.ru/d/textpage/9b/155/ovos_1p-2p-3p.pdf>.
15. Валеева Э. И., Московченко Д. В. Зональные особенности растительного покрова Тазовского полуострова и его техногенная трансформация // *Вестн. экологии, лесоведения и ландшафтоведения.* 2008. № 9. С. 174—191.
16. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. М.: Росгидромет, 2022. 104 с. [Электронный ресурс]: <<https://www.meteorf.gov.ru/images/news/20220324/4/Doklad.pdf>>.
17. Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A. et al. Monitoring the vernal advancements and retrogradation of natural vegetation // *NASA/GSFC, Final Report. Greenbelt, MD, USA, 1974.* P. 1—137.

Сведения об авторах

Елена Федоровна Чичкова

— канд. геогр. наук; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, КосмоИнформ-центр ГУАП; директор ЦКУ; E-mail: efchichkova@yandex.ru

Владимир Александрович Хамедов

— канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, КосмоИнформ-центр ГУАП; вед. науч. сотр. ЦКУ; E-mail: khamedov.vladimir@mail.ru

Сергей Александрович Рогачев

— Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра компьютерных технологий и программной инженерии; старший преподаватель; E-mail: rogachev.seal@gmail.com

Поступила в редакцию 04.12.23; одобрена после рецензирования 11.12.23; принята к публикации 08.02.24.

REFERENCES

1. Kobeleva N.V. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012, no. 1-6(14), pp. 1607–1617. (in Russ.)
2. Moskovchenko D.V., Arefyev S.P., Glazunov V.A., Tigeev A.A. *Earth's Cryosphere*, 2017, no. 6(21), pp. 3–13, DOI 10.21782/KZ1560-7496-2017-6(3-13). (in Russ.)
3. Moskovchenko D.V., Glazunov V.A., Tigeev A.A. *Environmental monitoring and biodiversity*, 2016, no. 1(11), pp. 91–96. (in Russ.)
4. Arefyev S.P. *Environmental monitoring and biodiversity*, 2016, no. 1(11), pp. 5–9. (in Russ.)
5. Minakov E.P., Chichkova E.F. *Journal of Instrument Engineering*, 2009, no. 4(52), pp. 23–27. (in Russ.)
6. Chichkova E.F., Kochin D.A., Rogachev S.A. *Spacecrafts and Technologies*, 2023, no. 2(7), pp. 132–141, DOI: 10.26732/j.st.2023.2.06. (in Russ.)
7. Mazurov B.T., Avrunev E.I., Khamedov V.A. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, no. 4(14), pp. 103–111. (in Russ.)
8. Myshlyakov S.G. *Geomatics*, 2016, no. 2, pp. 16–24. (in Russ.)
9. Kopylov V.N., Polishchuk Yu.M., Khamedov V.A. *Geo-Siberia*, 2007, vol. 3, pp. 157–162. (in Russ.)
10. Baldina E., Troshko K., Nikolaev N. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*, 2016, no. 3, pp. 78–85. (in Russ.)
11. Antonova S., Käb A., Heim B., Langer M., Boike J. *Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 182, pp. 169–191, DOI:10.1016/j.rse.2016.05.003.
12. Troshko K.A., Baldina E.A., Martyanov A.S., Denisov P.V. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa (Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space)*, Proceedings of the 17th All-Russian open Conf., Moscow, November 11–15, 2019, pp. 461. (in Russ.)
13. Regmi P., Grosse G., Jones M.C., Jones B.M., Walter A.K. *Remote Sens.*, 2012, no. 4, pp. 3741–3765, DOI:10.3390/rs4123741.
14. https://seaprojects.gazprom.ru/d/textpage/9b/155/ovos_1p-2p-3p.pdf. (in Russ.)
15. Valeeva E.I., Moskovchenko D.V. *Bulletin of ecology, forestry and landscape science*, 2008, no. 9, pp. 174–191. (in Russ.)
16. <https://www.meteorf.gov.ru/images/news/20220324/4/Doklad.pdf>. (in Russ.)
17. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A. et al. *NASA/GSFC, Final Report, Greenbelt, MD, USA, 1974*, pp. 1–137.

Data on authors

- Elena F. Chichkova** — PhD; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Center of space services "Kosmo-Inform-Center"; Director of the Center;
E-mail: efchichkova@yandex.ru
- Vladimir A. Khamedov** — PhD; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Center of space services "Kosmo-Inform-Center"; Leading Researcher;
E-mail: khamedov.vladimir@mail.ru
- Sergei A. Rogachev** — PhD; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Computer Technologies and Software Engineering; Senior Lecturer;
E-mail: rogachev.seal@gmail.com

Received 04.12.23; approved after reviewing 11.12.23; accepted for publication 08.02.24.