

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАТУР МОРСКОГО ЛЬДА
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОБСТАНОВКИ В АРКТИЧЕСКИХ АКВАТОРИЯХ**

В.В. Мелентьев, И.В. Мателенок, А.С. Смирнова

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
РФ, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

E-mail: vv.melentyev@mail.ru, igor_matelenok@mail.ru

Рассмотрены вопросы информационного обеспечения анализа спутниковых радиолокационных данных в целях мониторинга обстановки в акваториях морей Северного Ледовитого океана. Предложены варианты визуального представления радиолокационных образов ледовых образований, опасных и экологически значимых явлений и процессов. На основе данных с космических аппаратов Sentinel-1 создан набор растровых и векторных информационных слоев геоданных, позволяющих продемонстрировать пространственную изменчивость отражательных свойств объектов, сформирован тестовый образец атласа радиолокационных сигнатур.

Ключевые слова: Арктика, интерактивный атлас, ледовые образования, радар с синтезированной апертурой, радиолокационная сигнатура, экологически значимые ледовые явления.

Поступила в редакцию: 03.04.2023. После доработки: 27.04.2023

Введение. За последние десятилетия радары с синтезированной апертурой (РСА) спутникового базирования стали важным инструментом оперативного мониторинга ледяного покрова морей. Такие качества РСА, как возможность получать информацию о подстилающей поверхности вне зависимости от условий освещения и наличия облачности, высокое пространственное разрешение (по сравнению с микроволновыми радиометрами, также работающими в радиодиапазоне), позволили значительно продвинуться в организации регулярных детальных наблюдений за динамикой морского льда и контроля изменения его характеристик в региональном масштабе [1]. Данные с РСА, наряду с другими видами данных, служат основой для формирования комплексных карт ледовой обстановки и составления ледовых прогнозов. Современные методики подготовки таких информационных продуктов предполагают использование радарных данных для определения положения кромки дрейфующего льда и припая, распознавания отдельных видов льда и описания параметров дрейфа. Так, созданные на основе РСА изображения производные геоданные в виде слоев тематических карт аккумулируются средствами автоматизированной ледово-

информационной системы «Север», поддерживаемой и развиваемой Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом [2]. Подготовленные материалы становятся доступны конечным пользователям через терминалы электронных картографических навигационно-информационных систем и используются для оперативной информационной поддержки арктического судоходства.

Немаловажную роль в информационном обеспечении решения задач в границах арктических акваторий играют не только оперативно составляемые и передаваемые пользователям (судоводителям, гидрологам и др.) готовые карты-материалы и указания, но и априорные данные, необходимые для углубленного анализа ситуации. Интерпретация спутниковых данных, отражающих обстановку в границах арктических акваторий, в ходе такого анализа сопряжена с серьезными сложностями при использовании в качестве основы содержащих преимущественно текстовую информацию руководств и методик, и в значительной мере зависит от опыта привлекаемых экспертов. В качестве дополнительного средства, упрощающего решение задачи, могут выступать специализированные атласы. Однако существуют

лишь единичные примеры подобных информационных продуктов, посвященных ледовым явлениям и процессам, но они не ориентированы на интерпретацию данных РСА съемки. Классическим примером атласа, предназначенного для многоцелевого использования, является «Атлас ледовых образований» [3]. Информационным продуктом следующего поколения стал цифровой атлас морского льда Арктики [4]. Он представляет собой иерархию html-страниц в сочетании с массивом данных и содержит не только описания ледовых образований и сопровождающие их фотоизображения, но и иную справочную информацию, а также архив карт ледовой обстановки. Однако остается неудовлетворенным запрос на специализированные информационные базы и атласы, облегчающие интерпретацию РСА данных. Это подчеркивает необходимость составления атласа РСА сигнатур (параметрических описаний радиолокационных образов), наполнение которого было бы посвящено радиопортретам ледовых образований, явлений и процессов.

Настоящая работа нацелена на создание такого информационного продукта, ориентированного на поддержку анализа ситуации в акваториях арктических морей для своевременного обнаружения опасных и экологически значимых ледовых явлений. К задачам работы относятся подбор, обработка и тематическая интерпретация РСА данных, демонстрирующих особенности ледовой обстановки и протекающие в акваториях морей Российской Арктики процессы, разработка вариантов визуального представления радиолокационных образов объектов и составление макетов атласа радиолокационных сигнатур, которые могли бы служить в качестве дополнительного средства экспертного анализа обстановки и быть интегрированными в процессы работы с данными ледово-информационных систем.

Материалы и методы. Для решения задач работы были применены следующие инструменты: язык программирования R [5], стандартизированный язык гипертекстовой разметки документов

HTML и используемый для программирования сценариев JavaScript, а также свободно распространяемое программное обеспечение для обработки данных дистанционного зондирования SNAP [6].

Предложено использовать в качестве основы для подготовки макетов атласа радиолокационных сигнатур опасных и экологически значимых ледовых явлений открытые данные радиолокационного зондирования с РСА С-диапазона С-SAR, установленных на борту спутников миссии Sentinel-1 европейского космического агентства, в рамках которой запущено два аппарата, Sentinel-1A и Sentinel-1B. С-SAR с центральной частотой 5,405 ГГц может вести съемку в четырех модах (маршрутный SM, интерферометрический широкозахватный IW, сверхширокозахватный EW, волновой WV) и четырех поляризационных режимах (HH+HV, VV+VH, VV, HH). Это позволяет применять его для зондирования разнообразных природных и антропогенных объектов. В будущем планируется модифицировать атлас, сформировав информационный продукт с аналогичной структурой на основе данных X-диапазона с перспективной системы дистанционного зондирования «Арктика-Р», которая, согласно программе развития орбитальной группировки РФ, должна быть развернута после 2024 г.

В настоящей работе использованы архивные данные Sentinel-1 Level-1 GRD (амплитудные данные в проекции наземной дальности) за 2019–2022 гг., открытые для загрузки зарегистрированным на портале программы Copernicus (Copernicus Open Access Hub) пользователям [7]. Поскольку проведение РСА картирования морских, осолонённых и речных льдов рекомендуется проводить на материалах съемки на поляризации HH, именно данные с соответствующего канала визуализируются при создании макетов атласа. Также данный поляризационный режим позволяет эффективно выполнять дистанционное обнаружение судов. Тем не менее, для формирования более полного радиолокационного образа собираются данные и с канала HV сенсора Sentinel C-SAR.

Подготовка данных для описания радиолокационных образов. Сечение обратного рассеяния σ^0 , значения которого определяются на основе исходных РСА данных, полученных в определенных режимах поляризации селекцией сигнала, выступает в качестве основного параметра, выражающего состояние участка акватории, и первичного дешифровочного признака. Визуально выражается яркостью радиолокационного изображения, по которой могут быть дифференцированы фрагменты подстилающей поверхности с различными физическими, физико-химическими, механическими, геометрическими свойствами. Однако, как показали исследования [8, 9], для дифференциации льда по возрасту/толщине, сплоченности, размеру ледяных полей и разводий, торосистости, выявления зон сжатия и разряджения, процессов таяния и т.п. на основе радиолокационных изображений необходимо использовать также производные параметры, характеризующие пространственную неоднородность поверхности в границах акваторий. Это позволяет поставить каждому виду льда и процессу ледообразования в соответствие свой радиолокационный образ, описываемый набором РСА сигнатур. РСА сигнатуры представляют собой совокупности значений статистических показателей, текстурных характеристик, пространственные и временные профили объекта (ледового образования, явления, процесса, оконтуриваемого в пространстве) с сопроводительной информацией.

Данные РСА, которые легли в основу карт атласа, были отобраны в ходе предварительного экспертного анализа обстановки в акваториях окраинных морей Северного Ледовитого океана. В процессе анализа выделялись области интереса, соответствующие конкретным видам ледовых образований, с визуально типизируемым по РСА данным состоянием акваторий, а также участки, на которых отмечено проявление опасных и экологически значимых ледовых явлений. Так, в массив исходных данных для формирования атласа были добавлены РСА изображения, демонстрирующие про-

цессы ледообразования на всей площади акватории Карского моря в условиях меняющихся метеоусловий, изображения, отражающие ледовую обстановку в период «певекского кризиса» и данные за другие временные интервалы.

Отобранные изображения были подвергнуты предварительной обработке, в которую входила радиометрическая и геометрическая коррекция (с перепроецированием), фильтрация, подавление спекл-шума и улучшение контрастности, калибровка изображений и удаление различных артефактов. Далее был выполнен анализ и тематическая интерпретация данных с привлечением данных о климатической изменчивости характеристик ледяного покрова в рассматриваемых акваториях, данных о ледовой обстановке за предшествующие периоды, гидрометеорологической информации [10]. В результате области изображений, демонстрирующие процессы и закономерности формирования, преобразования и разрушения ледяного покрова, получили прикрепленные к ним текстовые описания (аннотации) на основе принятых номенклатур.

Визуальное представление радиолокационных образов объектов и создание тестовых образцов атласа. Поскольку яркостные различия областей в поле радиолокационных изображений предоставляют ограниченные возможности по дифференциации ледовых образований, что было обнаружено еще в ранних работах по анализу РСА сигнатур [11], в структуру параметрического описания сигнатур вошли не только гистограммы и описательные статистики для выборки значений σ^0 , характеризующие область акватории, но и набор параметров, отражающих пространственную изменчивость σ^0 в ее границах. Так как ледовые образования и связанные с ними явления и процессы многообразны, для описания их изменчивости использован расширенный диапазон выразительных средств. В визуализируемую часть образа включены составляющие частотной картины колебаний, полученной в результате двумерного преобразования Фурье, коррелограммы, а также

классические текстурные признаки, значения которых вычисляются на основе градационных матриц смежности: энергия (uniformity), корреляция (correlation), энтропия (entropy), несхожесть (dissimilarity) и контраст (contrast) [12]. Это позволит оператору при использовании атласа быстро принимать решения на любом этапе анализа РСА данных, сопоставлять образы в процессе разведывательного анализа и проверять результаты работы алгоритмов автоматизированной обработки изображений.

Фрагменты радиолокационных изображений в пределах предварительно выбранных и описанных пространственных областей были подвергнуты автоматизированной машинной обработке для получения параметрических и визуальных описаний радиолокационных образов. Данные описания были снабжены пояснительными текстами и объединены в архив для последующего включения в состав атласа.

Был предложен вариант визуального представления совокупности радиолокационных образов в виде традиционного атласа, содержащего в себе набор разворотов, посвященных сигнатурам определенных ледовых образований, явлений и процессов. Большую часть площади каждого разворота занимает синтезированное радиолокационное изображение с отмеченными на нем границами областей интереса. Текстово-графические описания областей вынесены в полосы по обеим сторонам изображения. Пример фрагмента разворота данной версии атласа показан на рис. 1. Ранее авторами рассматривались и другие тестовые варианты разворотов атласа [13].

Ориентация на использование описаний радиолокационных образов ледовых образований, процессов и явлений в автоматизированных системах управления и системах принятия решений в целях информационной поддержки арктического судоходства требует обеспечения пользователя возможностью оперирования такими данными в интерактивном режиме. Это сделало необходимой разработку альтернативного варианта пред-

ставления совокупности радиолокационных сигнатур в виде цифрового продукта – массива данных в комплекте с оболочкой для их визуализации.

Данный вариант атласа представляет собой иерархию html-страниц, посвященных ледовым образованиям, явлениям и процессам. Центральное место в данной иерархии занимают страницы с интерактивными картами радиолокационных сигнатур. Каждая такая страница имеет в своем составе основное окно графической визуализации, область отображения текстовых заголовков, а также органы управления (вкладки, кнопки, селекторы). При переключении между вкладками на базовую карту Ocean Basemap от провайдера Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI) (доступ на бесплатной основе [14]), по умолчанию визуализируемую в основном окне, накладываются растровые изображения, сформированные по данным РСА за определенные даты на подготовительном этапе, а также векторные полигональные слои, содержащие контуры пространственных областей интереса. При этом основным вариантом отображения радиолокационных данных является вывод на экран значений σ^0 с канала НН с визуальным представлением их в градациях серого. При щелчке в пределах области интереса (полигона) во всплывающее окно выводится буквенный индекс области, наименование вида (стадии развития) льда и значение общей сплоченности (рис. 2). Также доступна визуализация значений сплоченности по доминирующим в области видам льда – соответствующая информация включена в состав используемой базы данных. В центре полигона каждой области интереса размещен условный знак, являющийся дополнительным органом управления (маркером), при нажатии на который на экран выводится окно с текстово-графическим описанием радиолокационной сигнатуры, характеризующей ледовые образования, явления и процессы в области (рис. 3).

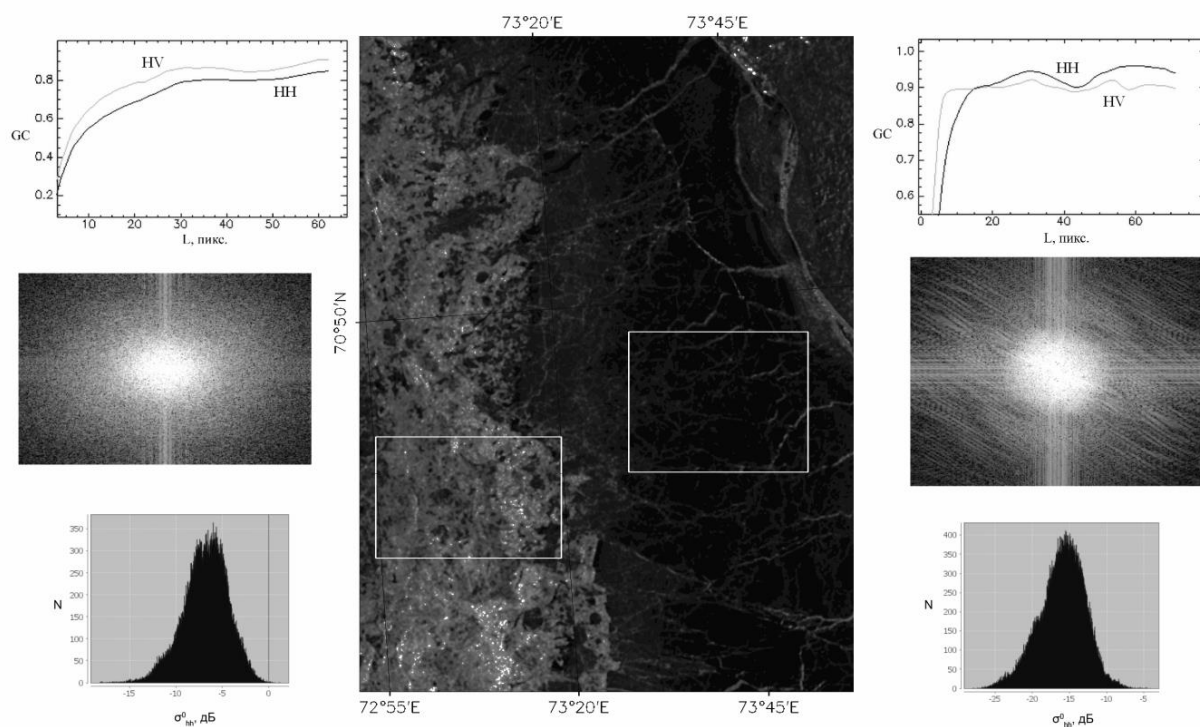


Рис. 1. Фрагмент макета разворота, демонстрирующий радиолокационные сигнатуры льда в Обской губе 07.11.2020 г. (Sentinel 1A C-SAR, поляризация HH, мода EW): GC – значения индекса Джери, L – пространственный лаг, N – количество пикселей с определенными значениями, σ_{hh}^0 – сечение обратного рассеяния (поляризация HH)

Fig. 1. Fragment of the spread layout demonstrating the radar signatures of ice in the Gulf of Ob on 7 November 2020 (Sentinel 1A C-SAR, polarisation HH, mode EW): GC – Geary's C, L – spatial lag, N – pixel value frequency, σ_{hh}^0 – radar cross-section backscatter value (HH polarisation)

В зоне *a* всплывающего окна размещается гистограмма значений индекса однородности – одного из основных текстурных признаков, в зоне *b* располагается таблица с описательными статистиками по выборке значений σ^0 , соответствующей области интереса, в зону *c* выводится Фурье-образ области, зона *d* содержит гистограмму σ^0 , а зона *e* служит для вывода коррелограммы (в виде графика зависимости коэффициента Джери [15] от пространственного смещения). Пояснительная надпись к визуализации расположена в центральной части всплывающего окна.

Для начала работы с описанным вариантом атласа необходимо открыть html-файл и выбрать одну из вкладок, на которой будет визуализирована конкретная радиолокационная сцена с тематическими слоями. Предложенная структура атласа и схема вывода информации обладает существенной гибкостью, позволяет визуализировать радиолокационные образы, представленные в альтернативных формах, и обеспечивает быструю адаптацию к требованиям по отображению.

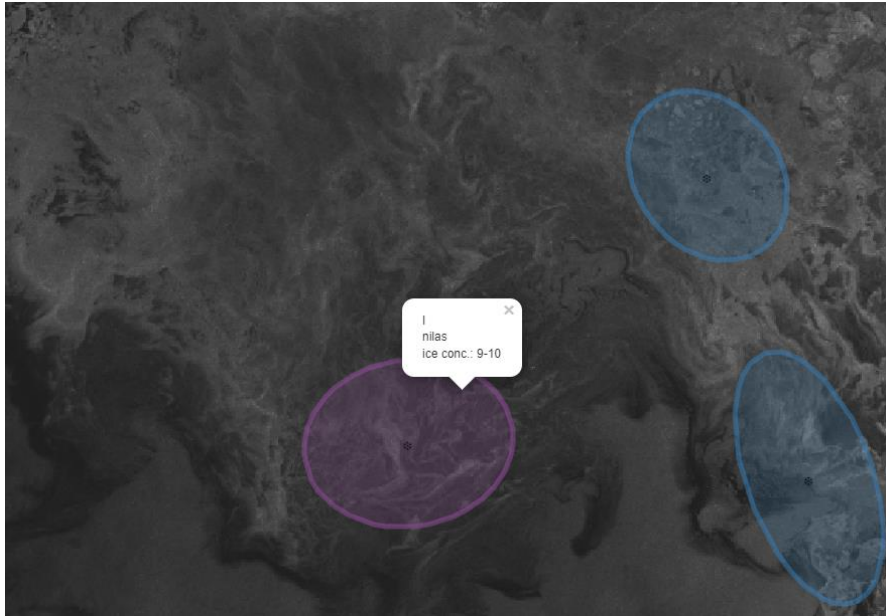


Рис. 2. Используемый в атласе вариант вывода основной информации об оконтуренной области, ледовые образования, процессы и явления в которой представляют интерес
Fig. 2. The option used in the atlas to display basic information about the delineated area, ice formations, processes and phenomena in which are of interest

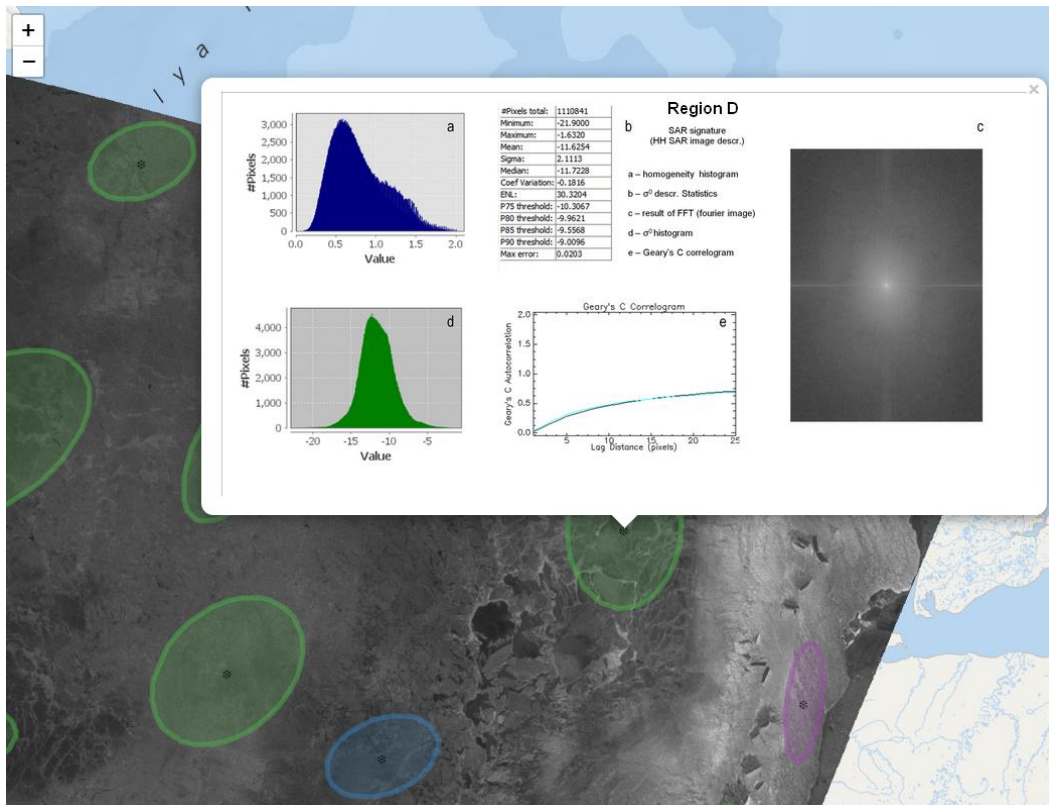


Рис. 3. Пример вывода текстово-графического описания радиолокационной сигнатуры для выбранной пользователем области интереса в поле изображения PCA
Fig. 3. An example which illustrates mapping the text and graphic description of the radar signature of a user-selected area over SAR image

Заключение. В ходе проведенной работы накоплены и проанализированы радиолокационные изображения, демонстрирующие особенности ледовой обстановки, пространственную и временную изменчивость ледяного покрова арктических морей и протекающие в их акваториях процессы. Подготовленный тестовый вариант интерактивного атласа радиолокационных сигнатур, будучи созданным с использованием современных инструментов обработки и визуализации геопространственной информации, может быть сопряжен с информационными системами, обеспечивающими оперирование данными мониторинга обстановки в арктических акваториях, и интегрирован в рабочий процесс лиц, проводящих углубленный анализ спутниковых радиолокационных изображений для контроля ледовых образований, явлений и процессов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2020-0004, «Научные основы построения архитектур и систем связи бортовых информационно-вычислительных комплексов нового поколения для авиационных, космических систем и беспилотных транспортных средств» (№ гос. регистрации АААА-А20-120060290131-9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Johannessen O.M., Alexandrov V.Yu., Frolov I.Ye., Sandven S., Pettersson L.H., Bobylev L.P., Kloster K., Smirnov V.G., Mironov Ye.U., Babich N.G. Remote sensing of sea ice in the Northern Sea Route: studies and applications. Springer Science & Business Media. 2006. 528 p.
2. Девятаев О.С., Бресткин С.В., Быченков Ю.Д., Фоломеев О.В. Получение, обработка и передача потребителям гидрометеорологической информации – информационное производство на примере ледово-информационной системы «Север» // Сборник тезисов докладов Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации». СПб.: РГГМУ. 2019. С. 447–448.
3. Бушуев А.В., Волков Н.А., Лоцилов В.С. Атлас ледовых образований. Л.: Гидрометеиздат. 1974. 140 с.
4. Environmental Working Group Joint U.S.-Russian Arctic Sea Ice Atlas, Version 1 / Edited by F. Tanis, V. Smolyanitsky. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center. 2000. Digital media.
5. <https://www.R-project.org/> (дата обращения: 15.12.2022).
6. <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/> (дата обращения: 15.12.2022).
7. <https://scihub.copernicus.eu> (дата обращения: 15.12.2022).
8. Soh L.K., Tsatsoulis C. Texture analysis of SAR sea ice imagery using gray level co-occurrence matrices // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. 1999. Vol. 37. No. 2. P. 780–795.
9. Barber D., LeDrew E. SAR sea ice discrimination using texture statistics- A multivariate approach // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1991. Vol. 57. No. 4. P. 385–395.
10. Мелентьев В.В., Мелентьев А.В., Черноок В.И., Пащенко Б.Е., Петтерссон Л.Х. Материалы к атласу PCA сигнатур ледяного покрова арктических морей. Часть 1. PCA сигналы опасных ледовых явлений и их использование для оптимизации ледового плавания в морях российской Арктики и эстуариях великих сибирских рек // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2019. № 594. С. 24–62.
11. Lyden J.D. Burns B.A., Maffett A.L. Characterization of sea ice types using synthetic aperture radar // IEEE transactions on geoscience and remote sensing. 1984. No. 5. P. 431–439.
12. Haralick, R.M. Shanmugam K., Dinstein I.H. Textural features for image classification // IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics. November 1973. V. SMC-3. No. 6. P. 610–621.
13. Мелентьев В.В., Смирнова А.С., Милова В.М., Коврижных А.А., Мателе-

нок И.В. Атлас РСА сигнатур ледяного покрова арктических морей: особенности подготовки и использования // Тезисы докладов XIX международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, 15–19 ноября 2021 г. М.: ИКИ РАН. 2021. С. 255.

14. <https://www.esri.com/news/arcuser/0911/files/oceanbasemap.pdf> (дата обращения: 15.12.2022).

15. Geary R.C. The contiguity ratio and statistical mapping // *The Incorporated Statistician*. 1954. Vol. 5. No. 3. P. 115–146.

VISUALIZATION OF SEA ICE RADAR SIGNATURES FOR SITUATION MONITORING IN ARCTIC WATERS

V.V. Melentyev, I.V. Matelenok, A.S. Smirnova

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
RF, Saint-Petersburg, Bolshaya Morskaya St., 67A

The issues of information support for the analysis of satellite SAR data to monitor the situation in the Arctic Basin are considered. Options regarding visual representation of descriptive radar images (patterns) of ice formations, hazardous and environmentally significant phenomena and processes are proposed. Based on the data from Sentinel-1 satellites, a set of geospatial layers was created to demonstrate spatial variability in reflectivity of objects in Arctic waters, and a test instance of the radar signature atlas was prepared.

Keywords: Arctic, ecologically significant phenomenon, ice formations, interactive atlas, SAR signature, synthetic aperture radar.

REFERENCES

1. Johannessen O.M., Alexandrov V.Yu., Frolov I.Ye., Sandven S., Pettersson L.H., Bobylev L.P., Kloster K., Smirnov V.G., Mironov Ye.U., and Babich N.G. Remote sensing of sea ice in the Northern Sea Route: studies and applications, Springer Science & Business Media, 2006, 528 p.

2. Devyataev O.S., Brestkin S.V., Bychenkov Yu.D., and Folomeev O.V. Poluchenie, obrabotka i peredacha potrebitelyam gidrometeorologicheskoi informatsii – informatsionnoe proizvodstvo na primere ledovo-informatsionnoi sistemy “Sever” (Obtaining, processing and transmission of hydrometeorological information to consumers – information enterprise on the example of the ice information system “Sever (North)”), Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya “Sovremennye problemy gidrometeorologii i ustoichivogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii” (All-Russia Scientific-Practical Conference “Contemporary issues in hydrometeorology and sustainable development of Russian Federation”), Saint-Petersburg, 14–15 March 2019, Book of Abstracts, Saint-Petersburg: RSHU, 2019, pp. 447–448.

3. Bushuev A.V., Volkov N.A., and Loshchilov V.S. Atlas ledovykh obrazovaniy (Atlas of ice formations), Leningrad: Hydrometeoizdat, 1974, 140 p.

4. Environmental Working Group Joint U.S.-Russian Arctic Sea Ice Atlas, Version 1, edited by F. Tanis, V. Smolyanitsky. Boulder, Colorado USA, National Snow and Ice Data Center, 2000, Digital media.

5. <https://www.R-project.org/> (December 15, 2022).

6. <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/> (December 15, 2022).

7. <https://scihub.copernicus.eu> (December 15, 2022).

8. Soh L.K. and Tsatsoulis C. Texture analysis of SAR sea ice imagery using gray level co-occurrence matrices. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 1999, Vol. 37. No. 2, pp. 780–795.

9. Barber D. and LeDrew E. SAR sea ice discrimination using texture statistics - A multivariate approach. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1991, Vol. 57, No. 4, pp. 385–395.

10. Melentyev V.V., Melentyev A.V., Chernook V.I., Pashchenko B.E., and Pettersson L.H. Materialy k atlasu RSA signatur ledyanogo pokrova arkticheskikh morei. Chast' 1. RSA signaly opasnykh ledovykh yavlenii i ikh ispol'zovanie dlya optimizatsii ledovogo plavaniya v moryakh rossiiskoi Arktiki i estuariyakh velikikh sibirskikh rek (Materials to the Atlas of satellite synthetic aperture radar signatures of the ice cover of the Arctic seas. Part 1. Retrieval of hazardous ice phenomena by use of SAR satellite remote sensing data and their applications for the optimization of ice). *Trudy Glavnoi geofizicheskoi observatorii im. A. I. Voeikova*, 2019, No. 594, pp. 24–62.

11. Lyden J.D., Burns B.A., and Maffett A.L. Characterization of sea ice types using synthetic aperture radar. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 1984, No. 5, pp. 431–439.

12. Haralick R.M., Shanmugam K., and Dinstein I.H. Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, November 1973, Vol. SMC - 3, No. 6, pp. 610–621.

13. Melentyev V.V., Smirnova A.S., Milova V.M., Kovrizhnyh A.A., and Matelenok I.V. Atlas RSA signatur ledyanogo pokrova arkticheskikh morei: osobennosti podgotovki i ispol'zovaniya (Atlas of SAR signatures of the arctic sea ice cover: features of preparation and utilization), XIX Mezhdunarodnaya konferentsiya “Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa” (XIX International Conference “Current Problems of Remote Sensing of the Earth from Space”), Moscow, 15–19 November 2021, Book of Abstracts, Moscow: IKI RAS, 2021, pp. 255.

14. <https://www.esri.com/news/arcuser/0911/files/oceanbasemap.pdf> (December 15, 2022).

15. Geary R.C. The contiguity ratio and statistical mapping. *The incorporated statistician*, 1954, Vol. 5, No. 3, pp. 115–146.