

## Классификация РСА-изображений ледовых полей Арктики, основанная на использовании мультифрактальных признаков

Д. В. Учаев, Дм. В. Учаев, В. А. Малинников

*Московский государственный университет геодезии и картографии  
Москва, 105064, Россия  
E-mail: d-uchaev@yandex.ru*

Представлен метод мультифрактальной классификации радиолокационных изображений ледовых полей Арктики, полученных с помощью радиолокационных станций с синтезированной апертурой (РСА). Данный метод предназначен для дифференциации на радиолокационных снимках участков ледовых полей, характеризующихся разной степенью сплочённости. В основу метода положен тот факт, что ледяной покров Арктики имеет сложную иерархическую (мультифрактальную) структуру, которая может значительным образом изменяться в зависимости от региональных и сезонных особенностей ледового режима, а также динамики атмосферных и океанических процессов. Основные этапы предлагаемого метода классификации РСА-изображений ледовых полей следующие: предварительная обработка радиолокационного изображения; формирование многослойного изображения мультифрактальных признаков; классификация сформированных векторов мультифрактальных признаков с помощью классификатора, основанного на случайных мультиграфах. Экспериментальная верификация предложенного метода классификации РСА-изображений проведена на более чем 50 фрагментах радиолокационных снимков покрытых льдом морских районов Арктики, полученных со спутников серии Sentinel-1 в летний период. Результаты верификации показали, что предлагаемый метод мультифрактальной классификации РСА-изображений допускает использование относительно небольших по объёму обучающих выборок и достигает в этом случае достаточно высоких значений общей и средней точности классификации снимков.

**Ключевые слова:** арктические моря, ледовый покров, сплочённость морского льда, РСА-изображение, мультифрактальная классификация

Одобрена к печати: 22.11.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-18-28

### Введение

Мониторинг состояния ледяного покрова Арктики — одна из ключевых задач развития Сибирского и Арктического регионов России (Миронов и др., 2020). В последние годы для наблюдений за изменениями ледового покрова Арктики всё чаще используются космические станции радиолокационного зондирования (Митник, Хазанова, 2015; Репина, Иванов, 2012; Park et al., 2020; Zakhvatkina et al., 2019). При этом среди радиолокационных систем космического зондирования Земли наибольшее применение сегодня находят радиолокационные станции с синтезированием апертуры антенны, которые формируют радиолокационное изображение (РЛИ) местности когерентной обработкой отражённых от подстилающей поверхности сигналов. Такие станции позволяют получать изображения очень высокого качества, поскольку их разрешающая способность существенно возрастает в сравнении с системами, имеющими реальные размеры апертуры антенны. Стоит отметить также, что современные радиолокационные станции космического базирования, в которых используется синтезирование апертуры, практически не уступают оптическим космическим средствам по пространственному разрешению на местности. Космические радиолокаторы хороши также тем, что обеспечивают охват обширных территорий, не зависят от погодных условий и условий освещённости (Никольский, 2008). Это ставит данные средства дистанционного зондирования Земли на особое место при получении информации об арктических морях, которые большую часть года скрыты облачностью или не освещены солнцем.

Характеристиками ледовых полей, наиболее адекватно отражающими ледовую ситуацию на радиолокационных снимках, являются сплочённость льда, возраст (толщина) льда, разрушенность льда, форма и размеры льдин, положение ледников, айсбергов, ледовых островов и других обнаруживаемых на снимках объектов ледовой топографии. Один из наиболее важных параметров морских льдов — сплочённость морского льда, которая, согласно номенклатуре морских льдов (WMO..., 2014), определяется как отношение, выраженное в десятых долях и описывающее общую площадь морской поверхности, покрытую льдом, как часть всей рассматриваемой площади. Сведения о сплочённости морских льдов — определяющие для навигации судов в полярных регионах (Mironov et al., 2007): морские районы, покрытые льдом высокой степени сплочённости, как правило, избегают. Сплочённость морского льда выступает также входным параметром для различных моделей прогнозирования климата и погоды (Vihma, 2014).

В последние годы в России и за рубежом было представлено достаточно большое число методов классификации льдов по их изображениям, полученным с помощью радаров с синтезированной апертурой (РСА) (Захваткина, Бычкова, 2015; Han et al., 2021; Khaleghian et al., 2021; Park et al., 2020; Zakhvatkina et al., 2019). Однако предложенные к настоящему времени методы, как правило, не учитывают того, что процессы нарастания и таяния льда вызывают перестройку его структуры, в результате чего ледяной покров приобретает сложную иерархическую (мультифрактальную) структуру, которая может значительно изменяться в зависимости от региональных и сезонных особенностей ледового режима, а также динамики атмосферных и океанических процессов (Смирнов, 2007). В связи с этим ледовые карты, получаемые при помощи упомянутых выше методов, зачастую не отражают реальной ледовой ситуации.

В настоящей работе для дифференциации участков ледовых полей, характеризующихся разной степенью сплочённости, предлагается метод классификации РСА-изображений ледовых полей, основанный на использовании мультифрактальных признаков. Данный метод, в отличие от упомянутых выше, исходит из мультифрактальной структуры ледового покрова Арктики и основан на использовании для классификации РСА-изображений ледовых полей различного рода локальных и глобальных скейлинговых экспонент изображений. Предлагаемый метод классификации РСА-изображений ледовых полей позволяет различить на радиолокационных снимках морских районов Арктики очень сплочённый лёд, сплочённый лёд, разреженный лёд, редкий лёд и чистую воду. Эти пять типов плавающего льда, как было установлено нами в ходе анализа большого числа спутниковых снимков Дальнего Заполярья, представляются наиболее характерными для арктических морей.

### **Метод классификации радиолокационных изображений ледовых полей Арктики, основанный на использовании мультифрактальных признаков**

Предлагаемый метод классификации РСА-изображений ледовых полей Арктики представляет собой модификацию приведённого в работе (Uchaev et al., 2020b) метода спектрально-пространственной классификации гиперспектральных изображений, в котором в качестве исходных данных вместо гиперспектральных снимков используются РСА-изображения ледовых полей, а этап извлечения главных компонент из гиперспектральных данных заменён на этап предварительной обработки РСА-снимков. В основу разработанного метода классификации легло положение о мультифрактальной структуре ледового покрова Арктики.

Блок-схема предложенного нами метода классификации приведена на *рис. 1*. Как видно из *рис. 1* (см. с. 20), исходными данными для классификации являются РСА-изображения покрытых льдом морей Арктики с поляризациями НН (горизонтально-горизонтальная, Н от *англ.* horizontal) и НV (горизонтально-вертикальная, V от *англ.* vertical). Изображения, полученные при различной поляризации радиосигнала, использованы потому, что на них льды разной степени сплочённости выглядят по-разному (см. работу (Zakhvatkina et al., 2019)).

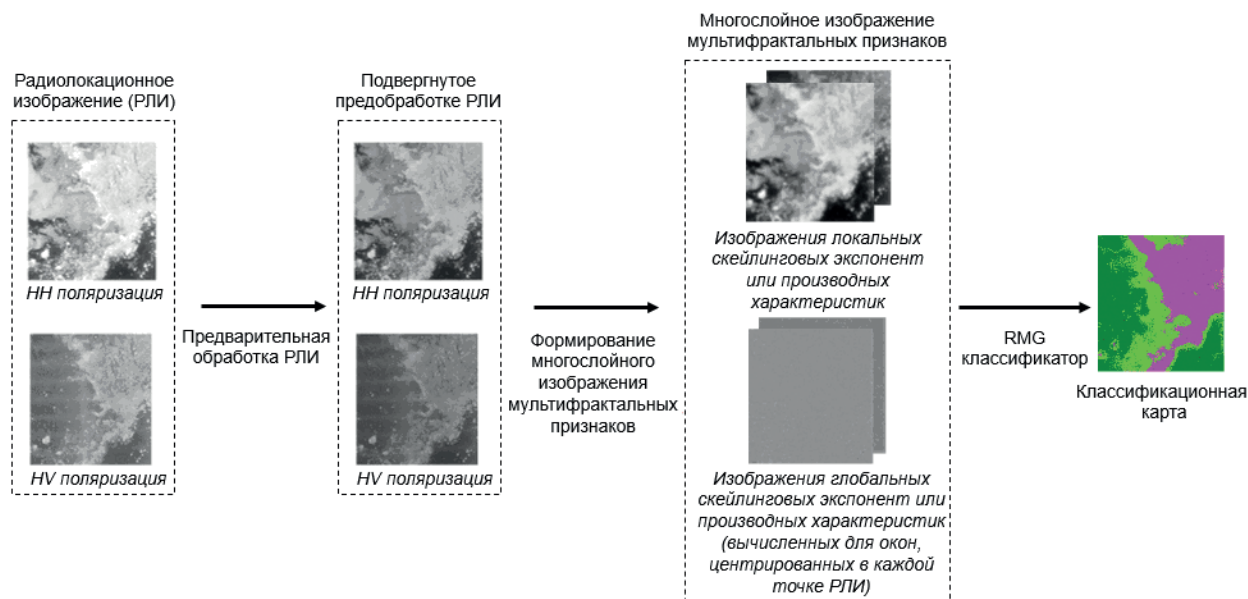


Рис. 1. Предлагаемый метод классификации РСА-изображений ледовых полей Арктики, основанный на использовании мультифрактальных признаков

Предварительную обработку РСА-снимков предлагается осуществлять в пакете SNAP (англ. Sentinel Application Platform) (<http://step.esa.int/main/toolboxes/snap>). При этом предполагается, что проводимая в пакете SNAP предобработка радиолокационных изображений включает следующие шаги: применение файла орбиты, радиометрическая калибровка, фильтрация спекл-шума, коррекция по местности и преобразование в децибелы.

Радиометрическая калибровка РСА-изображений позволяет добиться того, что значения пикселей данных изображений соответствуют значениям обратного рассеяния луча радара от отражающей поверхности. При выполнении яркостной коррекции радиолокационных изображений в пакете SNAP ставится также задача устранения спекл-шума, представляющего собой значительные вариации уровня яркости соседних пикселей на изображении однородной поверхности. Первопричиной спекл-шума является когерентное сложение откликов от большого количества элементарных отражателей, находящихся в пределах одного поверхностного элемента разрешения, и изменение их состава при переходе от одного элемента к другому (Коберниченко и др., 2013). В подавляющем большинстве случаев спекл-шум затрудняет дешифрирование радиолокационных снимков (например, может приводить к пропуску слабоконтрастных объектов или ложному обнаружению точечных целей). Для фильтрации спекл-шумов радиолокационных снимков предлагается использовать алгоритм локальных статистик (Lee, 1981; Lee et al., 1994), относящийся к адаптивным алгоритмам подавления спекл-шума, являющимся на сегодняшний день наиболее предпочтительным для сглаживания спекл-шумов. Суть адаптивных алгоритмов подавления спекл-шумов состоит в том, что параметры алгоритмов подбираются в зависимости от статистических характеристик фрагмента радиолокационного снимка, ограниченного текущим положением «окна» обработки.

При осуществлении геометрической коррекции РСА-изображений в пакете SNAP принимается в расчёт то, что данным изображениям свойственны такие геометрические искажения, как искажение наклонной дальности (неравномерность разрешения снимка по дальности), эффект складки, переналожения и радиолокационные тени (Никольский, 2008). Для устранения перечисленных выше искажений радиолокационных снимков должна проводиться корректировка по местности с использованием цифровой модели высот. Корректировка по местности геокодирует изображение, исправляя геометрические искажения радиолокационных изображений, и позволяет получить продукт в картографической проекции.

В качестве мультифрактальных признаков могут быть использованы различного рода локальные и глобальные скейлинговые экспоненты изображений, широкий перечень которых представлен в работе (Малинников и др., 2018). Целесообразность использования мультифрактальных признаков для классификации PCA-изображений ледовых полей определяется мультифрактальной природой ледового покрова Арктики, а также тем, что при использовании данных признаков удаётся дифференцировать на радиолокационных снимках арктических морей участки ледовых полей, характеризующиеся разной степенью сплочённости (Uchaev et al., 2020a). Стоит также отметить и то, что классификация оптических изображений, основанная на мультифрактальных признаках, как было продемонстрировано нами в работах (Uchaev et al., 2020b, 2021a), превосходит по качеству классификацию, основанную на использовании таких текстурных описателей изображений, как локальные бинарные шаблоны (Li et al., 2015), расширенные мультиатрибутивные профили (Dalla Mura et al., 2010) и геометрические моменты (Mirzapour, Ghassemian, 2016).

В качестве классификатора векторов мультифрактальных признаков предлагается задействовать классификатор, основанный на использовании случайных мультиграфов (*англ.* Random Multi-Graphs — RMGs), который обеспечивает получение классификационных результатов высокого качества для небольших по объёму обучающих данных (Uchaev, Uchaev, 2021). При этом обучение RMG-классификатора предлагается осуществлять на ледовых картах из архива цифровых данных по морскому льду Северного Ледовитого океана, сформированного в рамках проекта Всемирной метеорологической организации (ВМО, *англ.* World Meteorological Organization — WMO) «Глобальный банк цифровых данных по морскому льду», поддержку которого осуществляет Мировой центр данных по морскому льду при Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Основу архива ледовых данных составляют регулярные ледовые карты отдельных акваторий Северного Ледовитого океана, которые были получены разными национальными ледовыми службами мира (России, США, Канады, Дании) и представлены в единых форматах.

Оценка качества классификации фрагментов PCA-изображений ледовых полей может проводиться двумя способами: визуальным анализом получаемых классификационных карт и выявлением в них ошибок первого и второго рода, а также с помощью количественных критериев, рассчитываемых на основе матрицы ошибок: общей точности (*англ.* overall accuracy — OA), средней точности (*англ.* average accuracy — AA) и коэффициента каппа (kappa) (Congalton, Green, 2008).

### **Экспериментальная верификация предлагаемого метода классификации PCA-изображений ледовых полей Арктики**

Верификация предлагаемого метода мультифрактальной классификации PCA-изображений была проведена на более чем 50 фрагментах радиолокационных снимков покрытых льдом морских районов Арктики, полученных 6 и 18 июля 2017 г. со спутников серии Sentinel-1 (*рис.* 2–3, см. с. 22). Изображения Sentinel-1 использовались потому, что они предоставляются на бесплатной основе, имеют широкий пространственный охват и высокое пространственное разрешение (от 5 до 20 м в зависимости от режима съёмки). Стоит также отметить, что для верификации были взяты радиолокационные снимки с HH- и HV-поляризацией, поскольку на них льды разной степени сплочённости выглядят иначе.

Предварительная обработка участвующих в экспериментальной верификации снимков осуществлялась в пакете SNAP, который ориентирован непосредственно на обработку радиолокационных данных, получаемых со спутников серии Sentinel. Проводимая в пакете SNAP предобработка PCA-снимков включала все пять упомянутых в предыдущем разделе шагов (применение файла орбиты, радиометрическую калибровку, фильтрацию спекл-шума, коррекцию по местности и преобразование в децибелы).



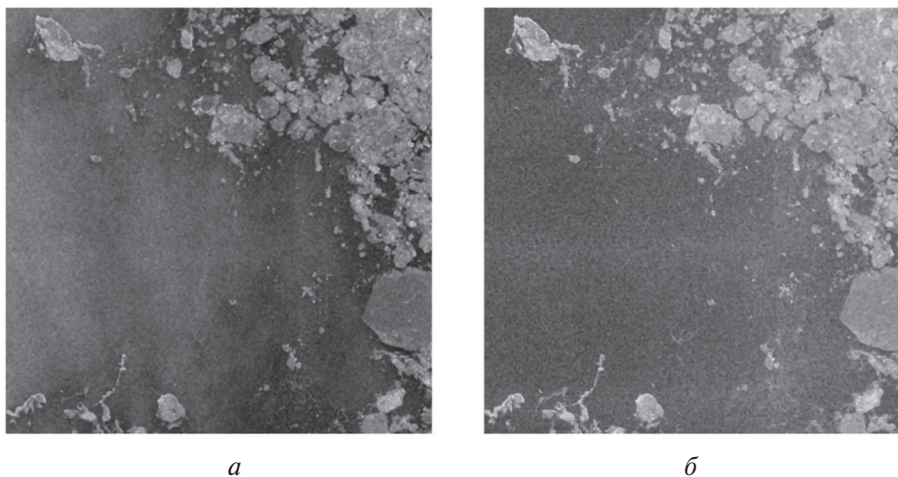


Рис. 2. Фрагмент РСА-изображения Sentinel-1В, полученного 6 июля 2017 г. при поляризации: *a* — HH; *б* — HV

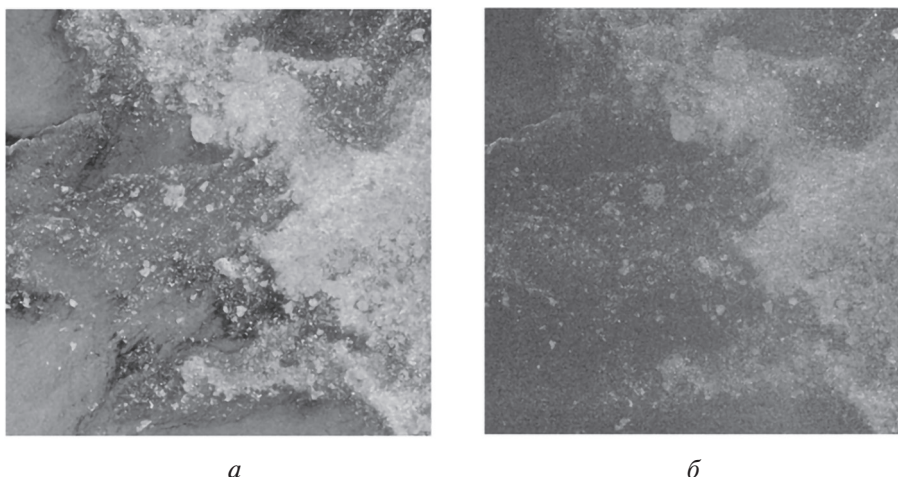


Рис. 3. Фрагмент РСА-изображения Sentinel-1В, полученного 18 июля 2017 г. при поляризации: *a* — HH; *б* — HV

Для каждого из участвующих в верификации фрагментов радиолокационных снимков были сформированы векторы мультифрактальных признаков (мультифрактальные профили). Отбор информативных мультифрактальных признаков РСА-изображений, полученных в летний период, оценка их значений и включение в мультифрактальные профили осуществлялись с помощью разработанных нами для этих целей программных модулей к пакету GMAToolbox (<https://github.com/UchaevD/GMAToolbox>). По результатам проведённого с помощью разработанного программного обеспечения (ПО) отбора признаков в формируемые мультифрактальные профили были включены значения локальных гёльдеровских экспонент РСА-снимков и, кроме того, значения грубых гёльдеровских экспонент, рассчитанных для окон размером 3, 7, 15, 31, 63 и 127 пикселей. Гёльдеровские экспоненты, выбранные для формирования мультифрактальных профилей, представляют собой характеристики локальной регулярности функций (Jaffard, 1997) и достаточно хорошо подходят для дифференциации разных по своему характеру текстур, каковыми и являются текстуры льдов на РСА-снимках (Захваткина и др., 2009). Процедура формирования карт значений гёльдеровских экспонент РСА-изображений, реализованная в разработанном нами ПО, приведена на рис. 4 (см. с. 23).

Классификация РСА-изображений ледовых полей была проведена программными средствами пакета GMAToolbox. Обучение использованного нами для классификации

RMG-классификатора осуществлялось на арктических ледовых картах Национального ледового центра США (англ. National Ice Center — NIC), которые содержат сведения о сплочённости и толщине льдов. При этом размеры обучающих выборок для каждого из классов были крайне невелики и составили 0,03 % пикселей, случайным образом отобранных из соответствующих классов ледовой карты. По результатам классификации РСА-снимков каждый из обнаруживаемых на них типов льдов был причислен к одному из пяти приведённых в *таблице* классов.

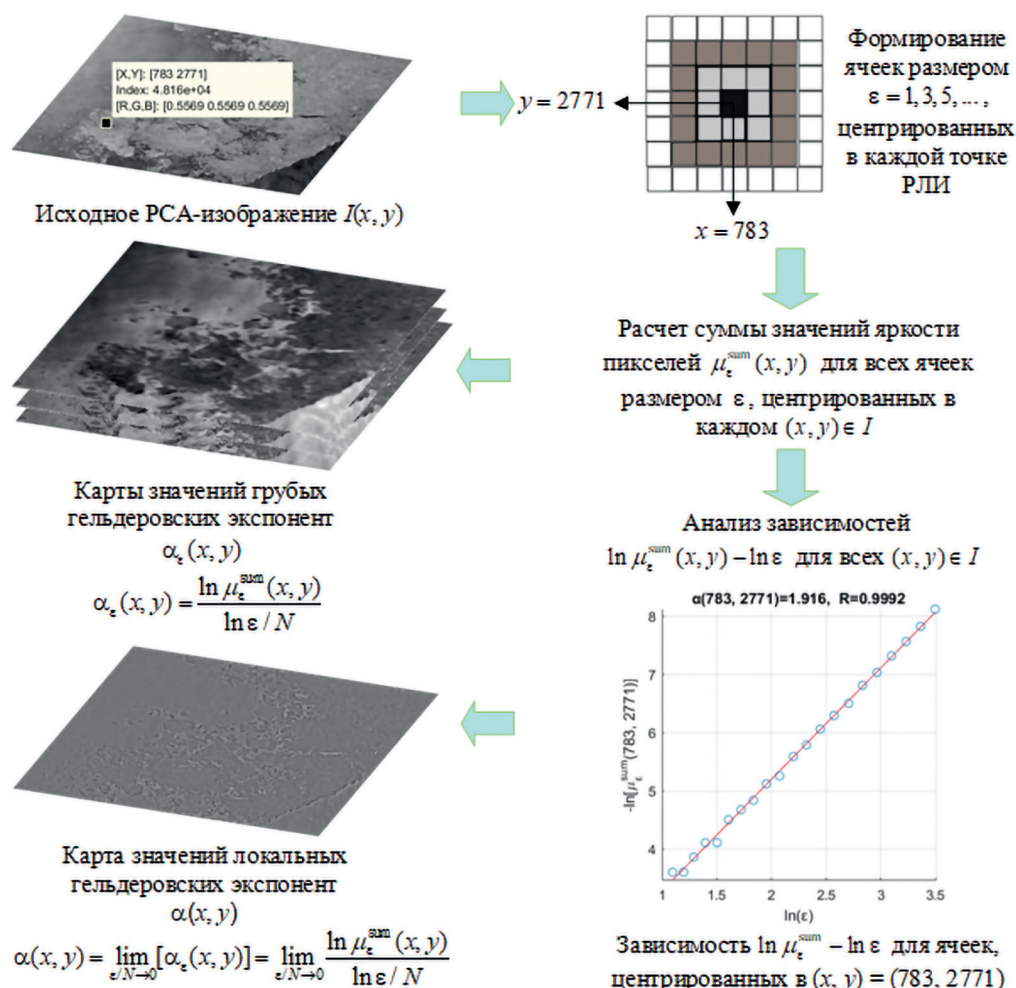
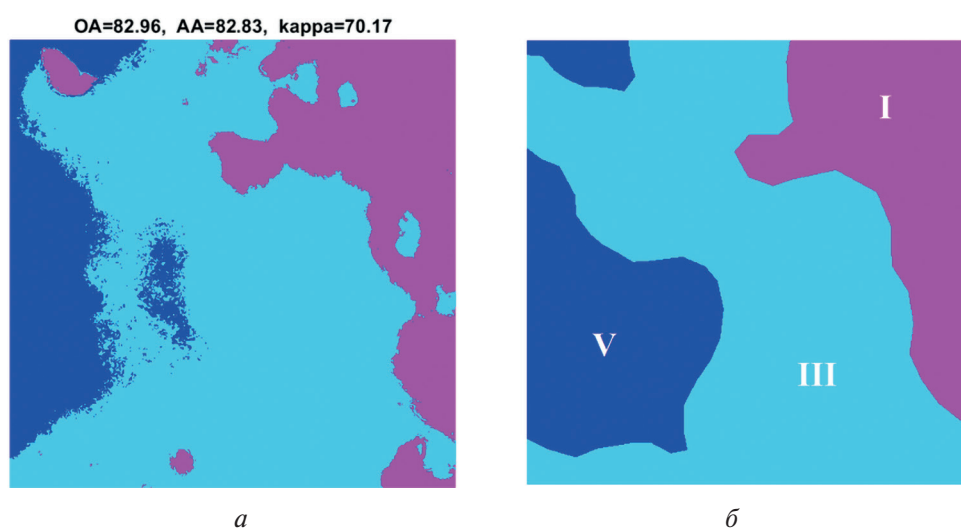


Рис. 4. Процедура формирования карт значений локальных и грубых гьльдеровских exponent РСА-изображений размером  $N \times N$  (Uchaev, 2021b)

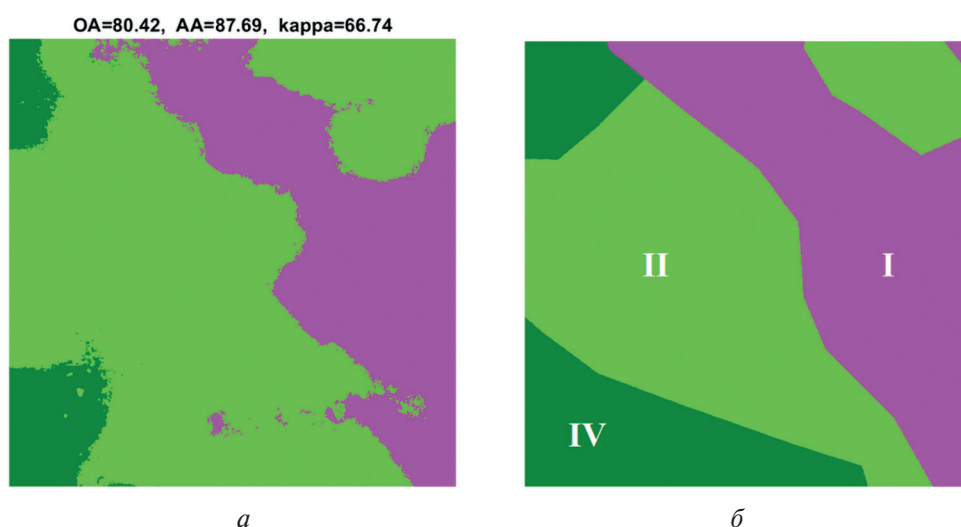
Классы, соответствующие обнаруживаемым на РСА-изображениях типам плавучего льда из номенклатуры ВМО (WMO..., 2014)

Класс	Описание класса
I	Очень сплочённый лёд: плавучий лёд, сплочённость которого больше 8/10, но меньше 10/10
II	Сплочённый лёд: плавучий лёд, сплочённость которого равна от 6/10 до 8/10, состоящий из льдин, большинство из которых соприкасается друг с другом
III	Разреженный лёд: плавучий лёд, сплочённость которого составляет от 4/10 до 6/10 с большим числом разводий; льдины обычно не соприкасаются одна с другой
IV	Редкий лёд: плавучий лёд, в котором сплочённость составляет от 1/10 до 3/10 и пространства чистой воды преобладают над льдом
V	Чистая вода: льда нет

Результаты классификации РСА-изображений были сопоставлены с соответствующими им фрагментами ледовых карт. В качестве примера на *рис. 5а* и *6а* продемонстрированы классификационные карты, полученные с помощью разработанного нами метода для фрагментов РСА-изображений, приведённых на *рис. 2–3*. Из *рис. 5–6* видно, что при использовании разработанного нами метода классификации РСА-снимков ледовых полей Арктики удаётся дифференцировать на снимках участки ледовых полей, характеризующиеся разной степенью сплочённости. При этом наилучшей разделимости удаётся добиться для классов I и III (см. *рис. 5*), которые соответствуют очень сплочённому и разреженному льдам, а также для классов I и II (см. *рис. 6*), соответствующих очень сплочённому и сплочённому льдам. О высоком качестве классификации фрагментов радиолокационных снимков, представленных на *рис. 2–3*, свидетельствуют также и полученные для них оценки величин OA и AA, которые приведены в верхней подписи классификационных карт на *рис. 5а* и *6а*. Схожие оценки величин OA и AA были получены и для всех других участвующих в верификации фрагментов радиолокационных снимков.



*Рис. 5.* Классификационная карта, полученная с помощью предлагаемого метода для фрагмента РСА-изображения на *рис. 2 (а)*; соответствующий ей фрагмент ледовой карты за 06.07.2017, на котором каждый из присутствующих классов помечен соответствующей ему римской цифрой (*б*)



*Рис. 6.* Классификационная карта, полученная с помощью предлагаемого метода для фрагмента РСА-изображения на *рис. 3 (а)*; соответствующий ей фрагмент ледовой карты за 20.07.2017, на котором каждый из присутствующих классов помечен соответствующей ему римской цифрой (*б*)

По результатам проведённых экспериментальных исследований может быть сделан вывод, что векторы признаков, образованные значениями локальных и грубых гёльдеровских экспонент, рассчитанных по РСА-изображениям ледовых полей с НН- и НV-поляризацией, позволяют разделить на этих изображениях очень сплочённый лёд, сплочённый лёд, разрезанный лёд, редкий лёд и чистую воду. Стоит также отметить, что задействованный в нашем методе классификатор, основанный на случайных мультиграфах, обеспечивает получение классификационных карт высокого качества для достаточно небольших по объёму обучающих данных.

## Заключение

В работе представлен метод автоматизированной классификации РСА-изображений ледовых полей Арктики, основанный на использовании мультифрактальных признаков. Данный метод исходит из того, что ледовый покров Арктики имеет сложную мультифрактальную структуру и позволяет дифференцировать на РСА-снимках арктических морей участки ледовых полей, характеризующиеся разной степенью сплочённости. В ходе экспериментальной верификации метода на фрагментах РСА-изображений, полученных спутниками Sentinel-1, показано, что в случае, когда для дифференциации льдов используются локальные и грубые гёльдеровские экспоненты РСА-изображений, и общая, и средняя точность классификации этих изображений достигает 80 %. В дальнейшем планируется также исследовать возможность использования иных мультифрактальных характеристик РСА-изображений арктических морей для дифференциации на них льдов разной степени сплочённости.

Разработка метода классификации РСА-изображений ледовых полей Арктики, основанного на использовании мультифрактальных признаков, выполнена в рамках государственного задания № 0708-2020-0001 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки). Разработка программных модулей, реализующих отбор информативных мультифрактальных признаков изображений и включение их в мультифрактальные профили, а также экспериментальная верификация разработанного метода классификации РСА-изображений были выполнены в рамках государственного задания № FSFE-2022-0003 Минобрнауки России.

## Литература

1. *Захваткина Н. Ю., Бычкова И. А.* Классификация ледового покрова арктических морей с использованием метода Байеса // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 4. С. 60–66. DOI: 10.7868/S0205961415020128.
2. *Захваткина Н. Ю., Александров В. Ю., Коросов А. А., Йоханнессен О. М.* Классификация морских льдов на РСА изображениях спутника ENVISAT // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 1. № 6. С. 373–379.
3. *Коберниченко В. Г., Иванов В. Г., Сосновский А. В.* Обработка радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли: лабораторный практикум. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2013. 64 с.
4. *Малинников В. А., Савиных В. П., Учаев Д. В., Учаев Д. В.* Мультифрактальная оценка ледовой обстановки по материалам космической съёмки // Идеи и новации. 2018. Т. 6. № 3. С. 69–74.
5. *Мионов Е. У., Клячкин С. В., Смоляницкий В. М., Юлин А. В., Фролов С. В.* Современное состояние и перспективы исследований ледяного покрова морей российской Арктики // Российская Арктика. 2020. № 10. С. 13–29. DOI: 10.24411/2658-4255-2020-12102.
6. *Митник Л. М., Хазанова Е. С.* Динамика ледяного покрова в морях Восточно-Сибирском и Лаптевых по данным спутникового микроволнового зондирования во второй половине октября 2014 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 2. С. 100–113.
7. *Никольский Д. Б.* Сравнительный обзор современных радиолокационных систем // Геоматика. 2008. № 1. С. 11–17.



8. Репина И. А., Иванов В. В. Применение методов дистанционного зондирования в исследовании динамики ледового покрова и современной климатической изменчивости Арктики // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 89–103.
9. Смирнов В. Н. Особенности динамики и механики деформирования льда арктического бассейна // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 1(75). С. 73–84.
10. Congalton R. G., Green K. Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices. 2<sup>nd</sup> ed. Boca Raton: CRC Press, 2008. 210 p.
11. Dalla Mura M., Benediktsson J. A., Waske B., Bruzzone L. Extended profiles with morphological attribute filters for the analysis of hyperspectral data // Intern. J. Remote Sensing. 2010. V. 31. No. 22. P. 5975–5991. DOI: 10.1080/01431161.2010.512425.
12. Han Y., Liu Y., Hong Z., Zhang Y., Yang S., Wang J. Sea ice image classification based on heterogeneous data fusion and deep learning // Remote Sensing. 2021. V. 13. No. 4. Art. No. 592. DOI: 10.3390/rs13040592.
13. Jaffard S. Multifractal formalism for functions part I: results valid for all functions // SIAM J. Mathematical Analysis. 1997. V. 28. No. 4. P. 944–998. DOI: 10.1137/S0036141095282991.
14. Khaleghian S., Ullah H., Kræmer T., Hughes N., Eltoft T., Marinoni A. Sea ice classification of SAR imagery based on convolution neural networks // Remote Sensing. 2021. V. 13. No. 9. Art. No. 1734. DOI: 10.3390/rs13091734.
15. Lee G. Refined filtering of image noise using local statistics // Computer Graph Image Processing. 1981. V. 15. No. 4. P. 380–389. DOI: 10.1016/S0146-664X(81)80018-4.
16. Lee J. S., Jurkevich L., Dewaele P., Wambacq P., Oosterlinck A. Speckle filtering of synthetic aperture radar images: a review // Remote Sensing Reviews. 1994. V. 8. No. 4. P. 313–340. DOI: 10.1080/02757259409532206.
17. Li W., Chen C., Su H., Du Q. Local binary patterns and extreme learning machine for hyperspectral imagery classification // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2015. V. 53. No. 7. P. 3681–3693. DOI: 10.1109/TGRS.2014.2381602.
18. Mironov Ye. U., Frolov I. Ye., Spichkin V. A., Karklin V. P., Karelin I. D., Gorbunov Y. A., Losev S. M. Sea ice conditions observed from satellite remote-sensing data // Remote Sensing of Sea Ice in the Northern Sea Route: Studies and Applications. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. P. 253–322. DOI: 10.1007/978-3-540-48840-8\_5.
19. Mirzapour F., Ghassemian H. Moment-based feature extraction from high spatial resolution hyperspectral images // Intern. J. Remote Sensing. 2016. V. 37. No. 6. P. 1349–1361. DOI: 10.1080/2150704X.2016.1151568.
20. Park J.-W., Korosov A. A., Babiker M., Won J.-S., Hansen M. W., Kim H.-C. Classification of sea ice types in Sentinel-1 synthetic aperture radar images // The Cryosphere. 2020. V. 14. No. 8. P. 2629–2645. DOI: 10.5194/tc-14-2629-2020.
21. Uchaev Dm. V., Uchaev D. V., Malinnikov V. A. (2020a) Chebyshev multifractal signatures and their use in multifractal interpretation of SAR images of ice-covered sea areas // Proc. SPIE. 2020. V. 11433. Art. No. 1143307. DOI: 10.1117/12.2559391.
22. Uchaev Dm. V., Uchaev D. V., Malinnikov V. A. (2020b) Spectral-spatial classification of hyperspectral images based on multifractal features // Proc. SPIE. 2020. V. 11533. Art. No. 115330T. DOI: 10.1117/12.2573715.
23. Uchaev D. V., Uchaev Dm. V. Feature profiles for semisupervised hyperspectral image classification with limited labeled training samples // Proc. SPIE. 2021. V. 11862. P. 235–243. DOI: 10.1117/12.2599182.
24. Uchaev Dm. V., Uchaev D. V., Malinnikov V. A. (2021a) Hyperspectral image classification by Chebyshev moment multifractal profiles // Recent Progress in Moments and Moment Invariants / ed. Papakostas G. A. Thrace: Science Gate Publ. P. C., 2021. V. 7. P. 75–99. DOI: 10.15579/gcsr.vol7.ch4.
25. Uchaev Dm. V., Uchaev D. V., Malinnikov V. A., Savinykh V. P. (2021b) Multifractal classification of Sentinel-1 SAR images of ice-covered sea areas // Proc. SPIE. 2021. V. 11862. Art. No. 118620S. DOI: 10.1117/12.2599886.
26. Vihma T. Effects of arctic sea ice decline on weather and climate: a review // Surveys in Geophysics. 2014. V. 35. No. 5. P. 1175–1214. DOI: 10.1007/s10712-014-9284-0.
27. WMO sea-ice nomenclature. WMO-No. 259. 2014. V. I, II and III.
28. Zakhvatkina N., Smirnov V., Bychkova I. Satellite SAR data-based sea ice classification: an overview // Geosciences. 2019. V. 9. No. 4. Art. No. 152. DOI: 10.3390/geosciences9040152.

## Classification of SAR images of Arctic ice fields based on the use of multifractal features

D. V. Uchaev, Dm. V. Uchaev, V. A. Malinnikov

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow 105064, Russia

E-mail: d-uchaev@yandex.ru

The article presents a method for multifractal classification of radar images of Arctic ice fields obtained using synthetic aperture radars (SAR). This method is aimed at distinguishing areas of ice fields in SAR images, characterized by different values of sea ice concentration. The method is based on the fact that Arctic ice cover has a complex hierarchical (multifractal) structure, which can vary significantly depending on the regional and seasonal features of the ice regime, as well as the dynamics of atmospheric and oceanic processes. The main steps of the proposed method for classifying SAR images of ice fields are as follows: preliminary processing of SAR images, forming a multiband image of multifractal features, classification of the formed multifractal feature vectors using a classifier based on random multigraphs. Experimental verification of the proposed method for classifying SAR images was carried out on more than 50 regions of SAR images of ice-covered sea areas of the Arctic, obtained from Sentinel-1 in the summer season. The verification results show that the proposed method for multifractal classification of SAR images allows using relatively small training samples and at the same time achieves sufficiently high values of overall and average classification accuracy.

**Keywords:** Arctic seas, ice cover, sea ice concentration, SAR image, multifractal classification

Accepted: 22.11.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-18-28

### References

1. Zakhvatkina N. Yu., Bychkova I. A., Bayesian classification of the ice cover of the Arctic seas, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, Vol. 51, No. 9, pp. 883–888, DOI: 10.1134/S0001433815090212.
2. Zakhvatkina N. Yu., Alexandrov V. Yu., Korosov A. A., Johannessen O. M., Sea ice classification using ENVISAT ASAR images, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Vol. 1, No. 6, pp. 373–379 (in Russian).
3. Kobernichenko V. G., Ivanov V. G., Sosnovsky A. V., *Obrabotka radiolokatsionnykh dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli: laboratornyi praktikum* (Processing of Earth remote sensing radar data: laboratory workshop), Ekaterinburg: Ural University Press, 2013, 64 p. (in Russian).
4. Malinnikov V. A., Savinykh V. P., Uchaev Dm. V., Uchaev D. V., Multifractal assessment of the ice situation based on space imagery, *Ideas and Innovations*, 2018, Vol. 6, No. 3, pp. 69–74 (in Russian).
5. Mironov E. U., Klyachkin S. V., Smolyanitsky V. M., Yulin A. V., Frolov S. V., Current state and perspectives of ice cover studies in the Russian Arctic seas, *Russian Arctic*, 2020, No. 10, pp. 13–29 (in Russian), DOI: 10.24411/2658-4255-2020-12102.
6. Mitnik L. M., Khazanova E. S., Ice cover dynamics in the East Siberian and Laptev Seas at the second half of October 2014 from remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 2, pp. 100–113 (in Russian).
7. Nikolsky D. B., Comparative study of modern SAR systems, *Geomatika*, 2008, No. 1, pp. 11–17 (in Russian).
8. Repina I. A., Ivanov V. V., Remote sensing in ice sea dynamic and modern Arctic, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 89–103 (in Russian).
9. Smirnov V. N., The features of dynamics and deformation mechanics of the Arctic basin ice, *Arctic and Antarctic Research*, 2007, No. 1(75), pp. 73–84 (in Russian).
10. Congalton R. G., Green K., *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*, 2<sup>nd</sup> ed., Boca Raton: CRC Press, 2008, 210 p.
11. Dalla Mura M., Benediktsson J. A., Waske B., Bruzzone L., Extended profiles with morphological attribute filters for the analysis of hyperspectral data, *Intern. J. Remote Sensing*, 2010, Vol. 31, No. 22, pp. 5975–5991, DOI: 10.1080/01431161.2010.512425.
12. Han Y., Liu Y., Hong Z., Zhang Y., Yang S., Wang J., Sea ice image classification based on heterogeneous data fusion and deep learning, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, No. 4, Art. No. 592, DOI: 10.3390/rs13040592.

13. Jaffard S., Multifractal formalism for functions part I: results valid for all functions, *SIAM J. Mathematical Analysis*, 1997, Vol. 28, No. 4, pp. 944–998, DOI: 10.1137/S0036141095282991.
14. Khaleghian S., Ullah H., Kræmer T., Hughes N., Eltoft T., Marinoni A., Sea ice classification of SAR imagery based on convolution neural networks, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, No. 9, Art. No. 1734, DOI: 10.3390/rs13091734.
15. Lee G., Refined filtering of image noise using local statistics, *Computer Graph Image Processing*, 1981, Vol. 15, No. 4, pp. 380–389, DOI: 10.1016/S0146-664X(81)80018-4.
16. Lee J.S., Jurkevich L., Dewaele P., Wambacq P., Oosterlinck A., Speckle filtering of synthetic aperture radar images: a review, *Remote Sensing Reviews*, 1994, Vol. 8, No. 4, pp. 313–340, DOI: 10.1080/02757259409532206.
17. Li W., Chen C., Su H., Du Q., Local binary patterns and extreme learning machine for hyperspectral imagery classification, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2015, Vol. 53, No. 7, pp. 3681–3693, DOI: 10.1109/TGRS.2014.2381602.
18. Mironov Ye. U., Frolov I. Ye., Spichkin V.A., Karklin V.P., Karelin I.D., Gorbunov Y.A., Losev S.M., Sea ice conditions observed from satellite remote-sensing data, In: *Remote Sensing of Sea Ice in the Northern Sea Route: Studies and Applications*, Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2007, pp. 253–322, DOI: 10.1007/978-3-540-48840-8\_5.
19. Mirzapour F., Ghassemian H., Moment-based feature extraction from high spatial resolution hyperspectral images, *Intern. J. Remote Sensing*, 2016, Vol. 37, No. 6, pp. 1349–1361, DOI: 10.1080/2150704X.2016.1151568.
20. Park J.-W., Korosov A.A., Babiker M., Won J.-S., Hansen M.W., Kim H.-C., Classification of sea ice types in Sentinel-1 synthetic aperture radar images, *The Cryosphere*, 2020, Vol. 14, No. 8, pp. 2629–2645, DOI: 10.5194/tc-14-2629-2020.
21. Uchaev Dm.V., Uchaev D.V., Malinnikov V.A. (2020a), Chebyshev multifractal signatures and their use in multifractal interpretation of SAR images of ice-covered sea areas, *Proc. SPIE*, 2020, Vol. 11433, Art. No. 1143307, DOI: 10.1117/12.2559391.
22. Uchaev Dm.V., Uchaev D.V., Malinnikov V.A. (2020b), Spectral-spatial classification of hyperspectral images based on multifractal features, *Proc. SPIE*, 2020, Vol. 11533, Art. No. 115330T, DOI: 10.1117/12.2573715.
23. Uchaev D.V., Uchaev Dm.V., Feature profiles for semisupervised hyperspectral image classification with limited labeled training samples, *Proc. SPIE*, 2021, Vol. 11862, pp. 235–243, DOI: 10.1117/12.2599182.
24. Uchaev Dm.V., Uchaev D.V., Malinnikov V.A. (2021a), Hyperspectral image classification by Chebyshev moment multifractal profiles, In: *Recent Progress in Moments and Moment Invariants*, Papakostas G.A. (ed.), Thrace: Science Gate Publ. P.C., 2021, Vol. 7, pp. 75–99, DOI: 10.15579/gcsr.vol7.ch4.
25. Uchaev Dm.V., Uchaev D.V., Malinnikov V.A., Savinykh V.P. (2021b), Multifractal classification of Sentinel-1 SAR images of ice-covered sea areas, *Proc. SPIE*, 2021, Vol. 11862, Art. No. 118620S, DOI: 10.1117/12.2599886.
26. Vihma T., Effects of Arctic sea ice decline on weather and climate: a review, *Surveys in Geophysics*, 2014, Vol. 35, No. 5, pp. 1175–1214, DOI: 10.1007/s10712-014-9284-0.
27. *WMO sea-ice nomenclature*, WMO-No. 259, 2014, Vol. I, II and III.
28. Zakhvatkina N., Smirnov V., Bychkova I., Satellite SAR data-based sea ice classification: an overview, *Geosciences*, 2019, Vol. 9, No. 4, Art. No. 152, DOI: 10.3390/geosciences9040152.