

# Рассмотрение возможности определения ледового покрытия на основе спутниковых данных оптического и ближнего инфракрасного диапазона для Карского моря

А.Ю. Дегай, В.Н. Черных, В.Н. Пырков

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия Профсоюзная ул. 84/32*

**Ключевые слова:** классификация ледового покрытия, дистанционное зондирование, обработка спутниковых снимков (дешифрирование, распознавание), композитные изображения

Информация о границе ледового покрова имеет огромное хозяйственное, промышленное и политическое значение. Например, как показано в работе (Солодилов, Пырков, 2011), актуальность и полнота информации о ледяном покрове важна как для обеспечения безопасности судов, так и для более эффективного проведения вылова водных биологических ресурсов.

В настоящее время регулярно представляются в автоматическом режиме данные по ледовой обстановке на основе микроволновых спутниковых данных. Необходимо отметить, что пространственное разрешение таких данных не более пяти километров. Нет сомнений в необходимости улучшения пространственного разрешения информации о ледовом покрытии.

Ранее (Андреев и др, 2015) на основе спутниковых данных видимого и ближнего инфракрасного диапазона для части Берингова моря, Камчатки, Охотского моря, Сахалина, Татарского пролива, Приморья было показано, что на основе анализа двумерных гистограмм с помощью машинного обучения может быть автоматизирована процедура определения ледового покрытия. Машинное обучение в указанной работе проводилось по алгоритму Random Forest (Breiman L, 2001). В работе были использованы стандартные продукты MOD09 Terra-MODIS, две гранулы MODIS - H26V03 и H27V03, предоставляющие ежедневные наблюдения выбранной области в синусоидальной проекции.

В последующей работе (Дегай и др, 2021) с использованием сезонного анализа выполнено существенное улучшение алгоритма определения ледового покрытия. Наряду с исправлением ряда ошибок доработанный алгоритм позволяет значительно расширить площадь снимка, которую можно автоматически классифицировать. И отнести проверяемый фрагмент к поверхности покрытой льдом или свободной ото льда.

Используемые входные данные представлены ежедневными измерениями прибора Terra-MODIS в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра, стандартными продуктами MOD09 в формате EOS HDF.

Спектральные каналы представлены в Таблице 1. Один исходный файл содержит несколько многоканальных измерений (сцен), что соответствует количеству наблюдений этого района за этот день. Одна сцена территориально покрывает только фрагмент гранулы.

Таблица 1. Каналы спектрорадиометра MODIS, поставляемые в продукте MOD09.

<i>Номер канала</i>	<i>Длина волны, нм</i>	<i>Комментарий</i>
1	620-670	Red
2	841-876	NIR
3	459-479	Blue
4	545-565	Green
5	1230-1250	NIR
6	1628-1652	SWIR
7	2105-2155	SWIR

Целью исследований было создание метода разделения классов: льда, облаков и воды. Для выделения классов льда и облаков был применен индекс NDSI (Normalized Difference Snow Index) (Hall, 2001). Для выделения открытой водной поверхности был использован индекс NDI\_M42 (Normalized Difference Index MODIS bands 4,2), аналогичный индексу MODIS NDWI (Gao, 1996). Индексы вычислялись по формулам:

$$NDSI = \frac{band_1 - band_6}{band_1 + band_6}$$

$$NDI_{M42} = \frac{band_4 - band_2}{band_4 + band_2}$$

Данные индексы были выбраны из следующих соображений: индекс NDSI давно и часто используется в различных исследованиях для выявления снега и льда на земной поверхности, аналогично используется для выделения открытой воды индекс NDWI, индекс же NDI\_M42, по нашим предположениям, должен был работать аналогично NDWI, и далее была подтверждена его работоспособность.

Основным средством визуализации данных в статье (Дегай и др, 2021) является двумерная гистограмма. Двумерная гистограмма — это диаграмма, на которой координаты точки (области) соответствуют значениям (диапазонам значений) измеряемых параметров, а цвет точки (области) отображает количество пикселей с такими значениями параметров относительно общего числа измерений. С помощью визуального или алгоритмического анализа таких гистограмм делаются выводы о наличии и относительном количестве измерений с данными параметрами среди данной выборки измерений.

В обсуждаемом методе автоматической классификации использованы два вида двумерных гистограмм. В гистограммах одного вида координаты по вертикали соответствуют величине индекса NDI\_M42, а координаты по горизонтали — величине КСЯ (коэффициента спектральной яркости) канала 4, в гистограммах второго вида используются величины индекса NDSI и КСЯ канала 6, соответственно.

Такие оси при представлении гистограмм были выбраны, исходя из предположения, что такое представление позволит наглядно определять области кластеризации, по сравнению с другими вариантами. Отметим, что сделанное предположение действительно позволило наглядно определять области кластеризации.

Первичная дискретизация гистограмм составляла 2000 интервалов на диапазон [-1...1] индекса и 2400 точек на диапазон [0...1.6] КСЯ канала. Цвет точек на обоих видах гистограмм меняется от синего до красного через желтый, по мере относительного увеличения количества точек исходных данных с соответствующими параметрами.

В данной работе для совершенствования алгоритмов разделения классов было проведено разделение годового цикла на сезоны для ранее исследуемой области (ранее указанные районы Охотского, Японского и Берингова морей) было взято как: зима=декабрь-март, весна=апрель-июнь, лето=июль-октябрь, осень=ноябрь-декабрь.

Гистограммы строились по всем точкам всех сцен указанных сезонных периодов, попадающим в маску водной поверхности.

Для анализа были построены гистограммы NDI\_M42 – канал 4 и NDSI – канал 6 за 2011-2015 годы, по сезонам, с наложением маски водной поверхности. Для построения гистограмм использовались данные подмножеств MOD09GA и MYD09GA, ежедневные снимки каналов №№ 1, 2, 4, 6 разрешения 500м., приведенные к КСЯ по методике, рекомендованной MODIS и обрезанные по величине угла падения до значения 45°.

Для иллюстрации приведены следующие гистограммы: рисунок 2 – гистограмма NDSI – канал 6, рисунок 3 - гистограмма NDI\_M42 – канал 4 – для зимы. На гистограммах области параметров, относимых к конкретному состоянию земной поверхности, разделены черными линиями и обозначены сносками.

Показатели не покрытой льдом водной поверхности были взяты по гистограмме NDI\_M42 – канал 4 из общих физических соображений, по аналогии с общей методикой интерпретации продукта MODIS NDWI (Gao, 1996). Результаты сезонного анализа и последующего распознавания состояний не показали существенных противоречий такому предположению.

В результате сравнительного анализа гистограмм за различные сезоны были выявлены области значений параметров, проявляющиеся только зимой и весной, которые и были объявлены льдом/снегом – таковы области 3a и 3b на диаграммах NDSI, а также области значений параметров, соответствующие водной поверхности без льда (области 1 и 2 на диаграмме NDSI) и двум условным (поскольку зона облачности на диаграмме NDSI получилась сложной формы, посчитали целесообразным разбить ее на две подзоны, для упрощения восприятия) типам облачности (области 4 и 5 на диаграммах NDSI). Так, например, на рисунке 2 (NDSI, зима) видно преобладание состояний с параметрами из областей 3a и 3b и малое количество состояний с параметрами из области 1. Для (NDSI, весна), по сравнению с зимней гистограммой, наблюдалось уменьшение присутствия состояний с параметрами из областей 3a и 3b, незначительное наличие состояний с параметрами из области 2 и увеличившееся количество состояний с параметрами из области 1. Для (NDSI, лето) наблюдается отсутствие состояний с параметрами из областей 2, 3a, 3b и возрастание числа состояний с параметрами из области 1. Преобладает облачность с параметрами из области 4. Для (NDSI, осень) наблюдалось, что

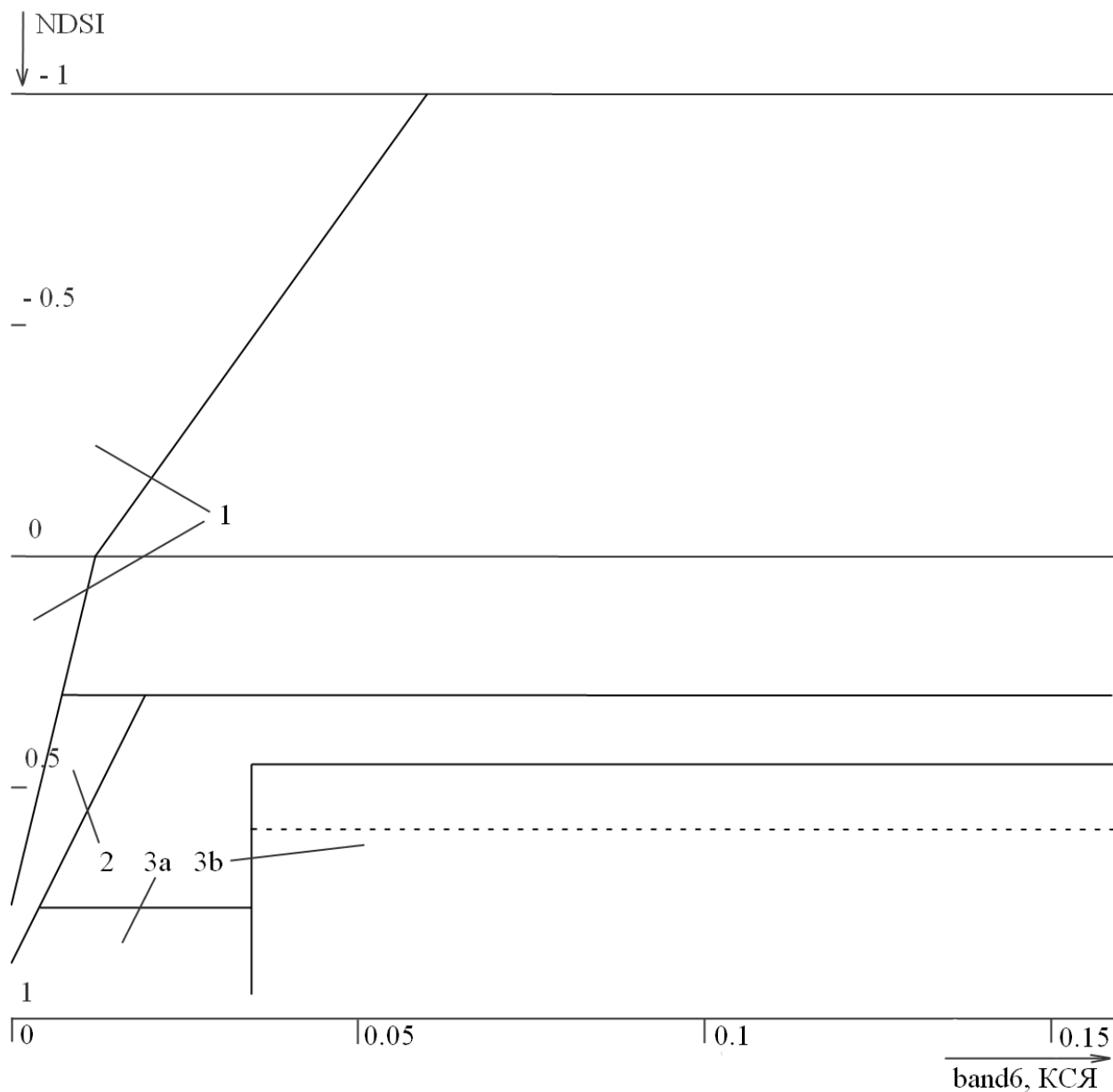
области значений параметров 3a, 3b пусты, появились состояния с параметрами из области 2. Преобладает облачность с параметрами из области 5. На рисунке 3 (NDI\_M42, зима) видно наличие состояний с параметрами из области 3b, в то время как для (NDI\_M42, лето) наблюдалось отсутствие состояний с параметрами из области 3b.

Вышеописанный сравнительный анализ проводился визуально итерациями. По выраженным связным областям высокой концентрации отсчетов на двумерной гистограмме делалось предположительное отнесение области к классу льда, открытой воды или облаков. В соответствии со сделанным предположением выполненная классификация отображалась на карте, оценивалась связность полученных областей и разумность выполненной классификации. По результатам визуального контроля вносились коррективы в выделенные области на двумерной гистограмме.

Таким методом была получена начальная версия классификации состояний водной поверхности и атмосферы. Затем, по результатам сравнения классифицированных снимков с визуализацией тех же сцен [band2, band6, band1 MODIS]->RGB, был сделан вывод о том, что под слоем тонкой облачности (распознаваемой начальной версией алгоритма как облачность) вполне надежно можно во многих случаях различить водную или снежную/ледовую поверхность. Соответственно, в алгоритм были внесены изменения.

Таблица 2. Описание зон (сочетаний параметров точек), указанных на гистограммах, с учетом улучшения алгоритма классификации:

<i>№ зоны</i>	<i>Результат алгоритма классификации</i>
1	Чистая вода (точка исходной сцены распознавалась, как вода, при ее попадании либо в зону 1 гистограммы NDI_M42, либо в зону 1 гистограммы NDSI).
2	Начальные стадии образования льда (сало, шуга и т.п.). NDSI.
2a	Вода под облаками. NDI_M42.
3a	Тонкий лед. NDSI.
3b	Толстый лед. NDSI. На диаграмме NDSI зона была существенно расширена, при этом, с учетом перекрытия параметров состояний толстого льда и облаков на диаграмме NDSI (область перекрытия выделена на гистограммах NDSI зеленым), было добавлено условие попадания состояния в соответствующую зону диаграммы NDI_M42.
4	Облачность «типа 1».
5	Облачность «типа 2».



*Рисунок 1. Увеличенная по оси band6, для наглядности изображения зон 1, 2, 3a, 3b, сетка областей параметров распознаваемых состояний на гистограмме NDSI – band6. Пунктиром обозначена верхняя граница зоны 3b в начальной версии распознавания. Расположение классов 4 и 5, вследствие смещения зоны видимости, на этой схеме не отмечены, их расположение можно видеть на рисунке 2*

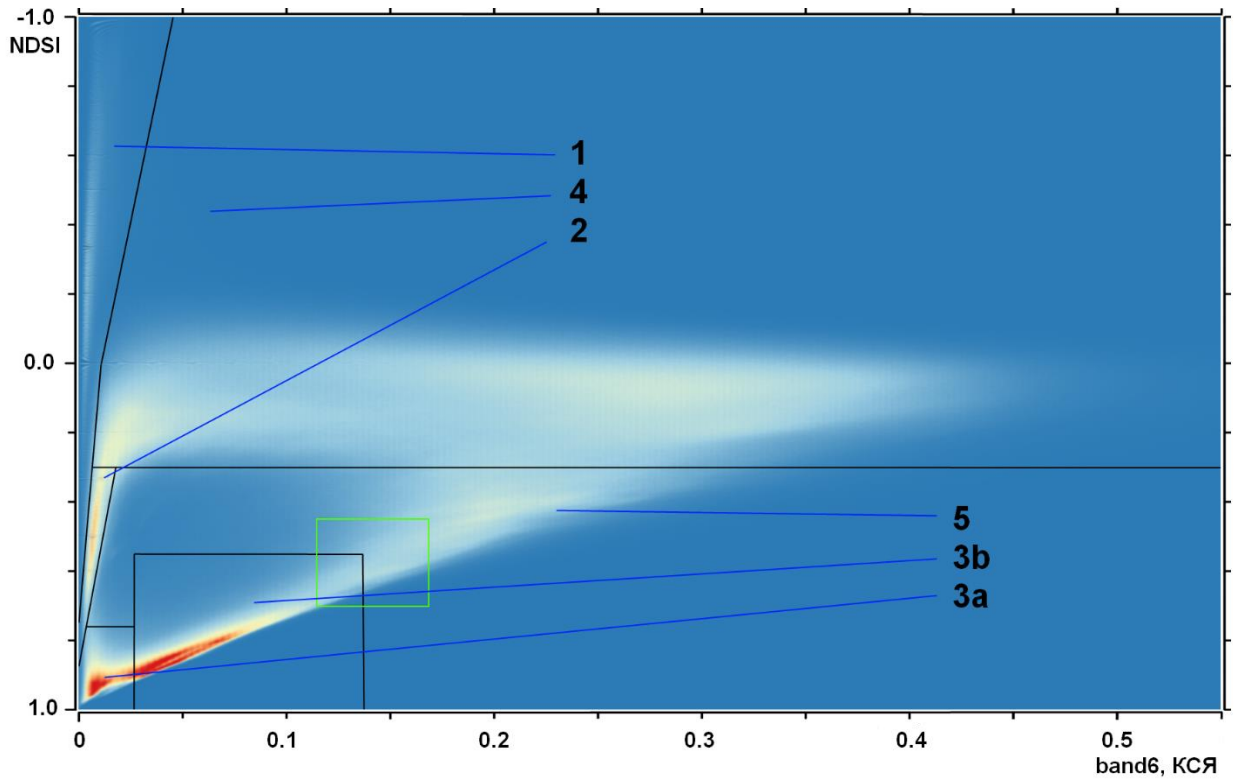


Рисунок 2. Гистограмма NDSI – band6 за зиму 2015 года с сеткой параметров и указателями распознаваемых состояний водного и облачного покрова

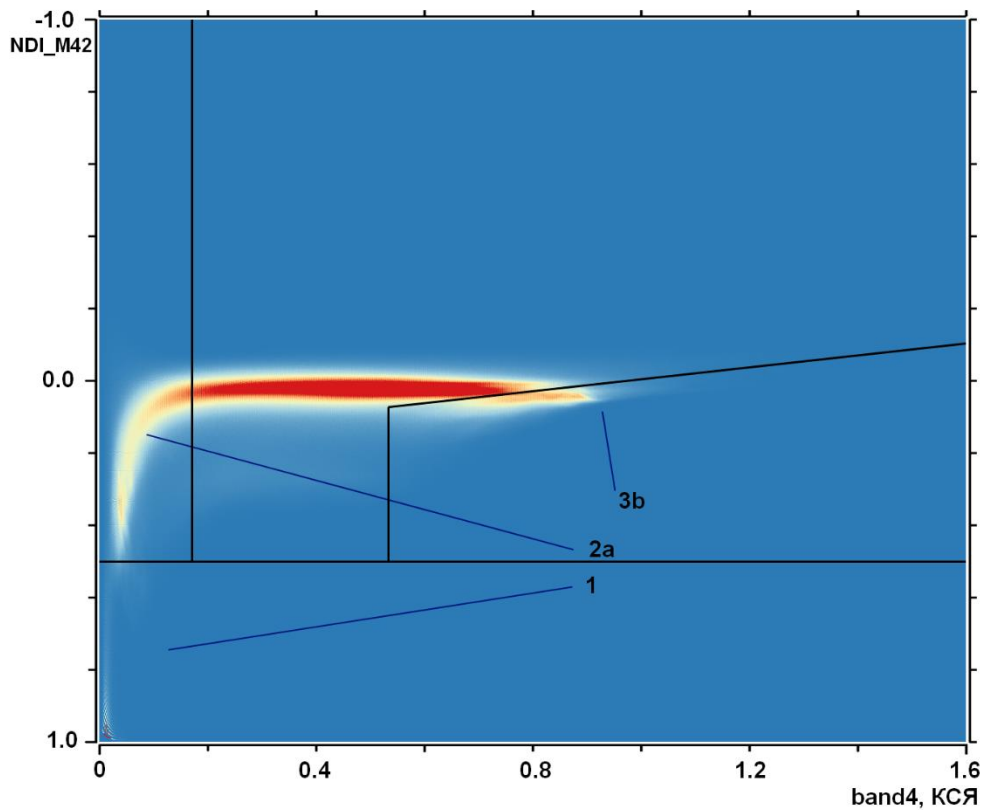
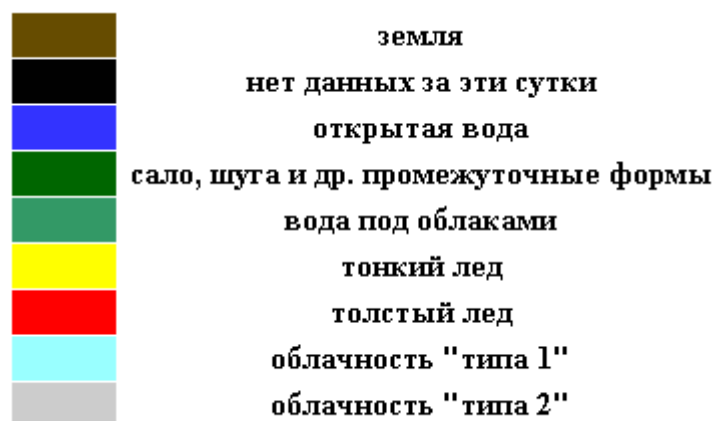


Рисунок 3. Гистограмма NDI\_M42 – band4 за зиму 2015 года с сеткой параметров и указателями распознаваемых состояний водного и облачного покрова

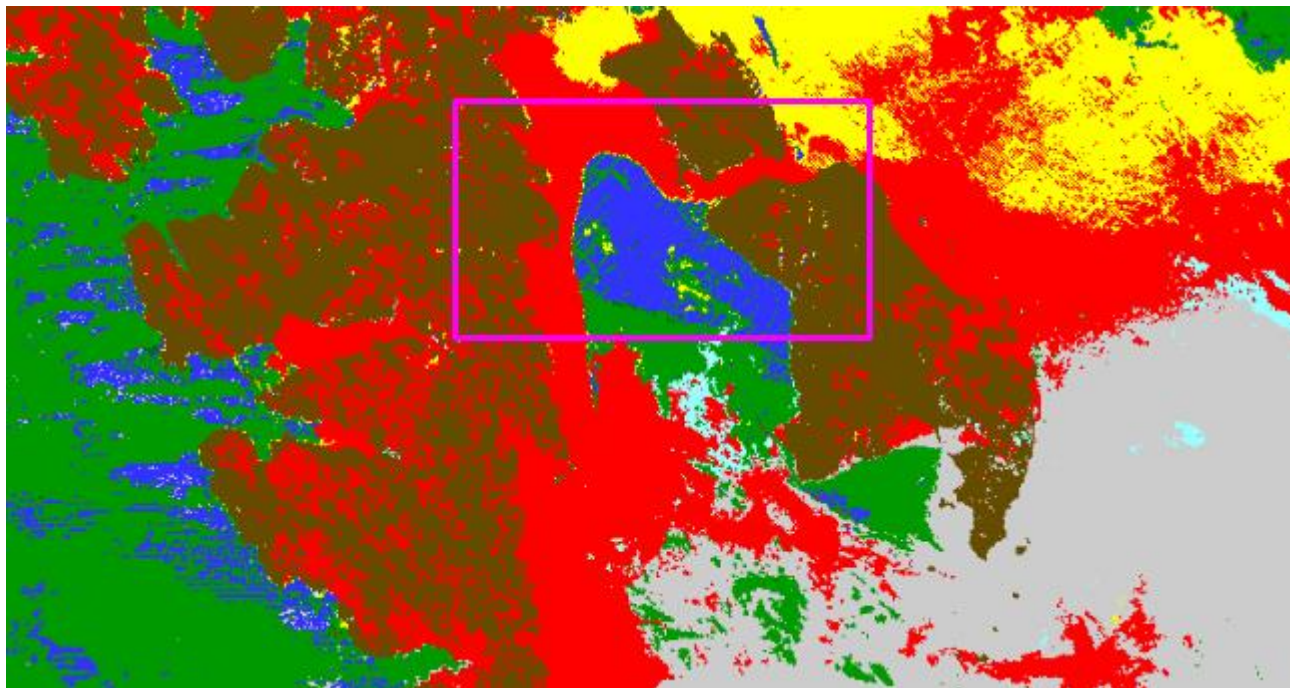


*Рисунок 4. Легенда классифицированных изображений.*

В Таблице 2 приведено сравнительное описание зон (сочетаний параметров точек), указанных на гистограммах. На рисунке 1 приведена сетка областей параметров распознаваемых состояний на гистограмме NDSI - band6, увеличенная для наглядности по оси band6. На рисунке 4, представлена легенда классификации ледового покрытия.

Так как повышается актуальность использования данных отечественных спутников, особенно в Арктике, в данном докладе представлены результаты проверки возможности использования вышеописанного алгоритма для Карского моря.

Была проведена оценка использования ранее определенных на Дальнем Востоке зон двумерных гистограмм по нормализованным индексам для классификации ледового покрытия в Карском море. Обработаны спутниковые снимки спектрорадиометра MODIS за 2013, 2015, 2019 и 2020 годы для гранул MODIS h19v01, в районе архипелага Шпицберген и пролива Карские ворота. Показано, что принципиально методика отработанная на Дальнем Востоке работает и в Арктике. На рисунках 5-8 показано, что граница льда классифицируется корректно.

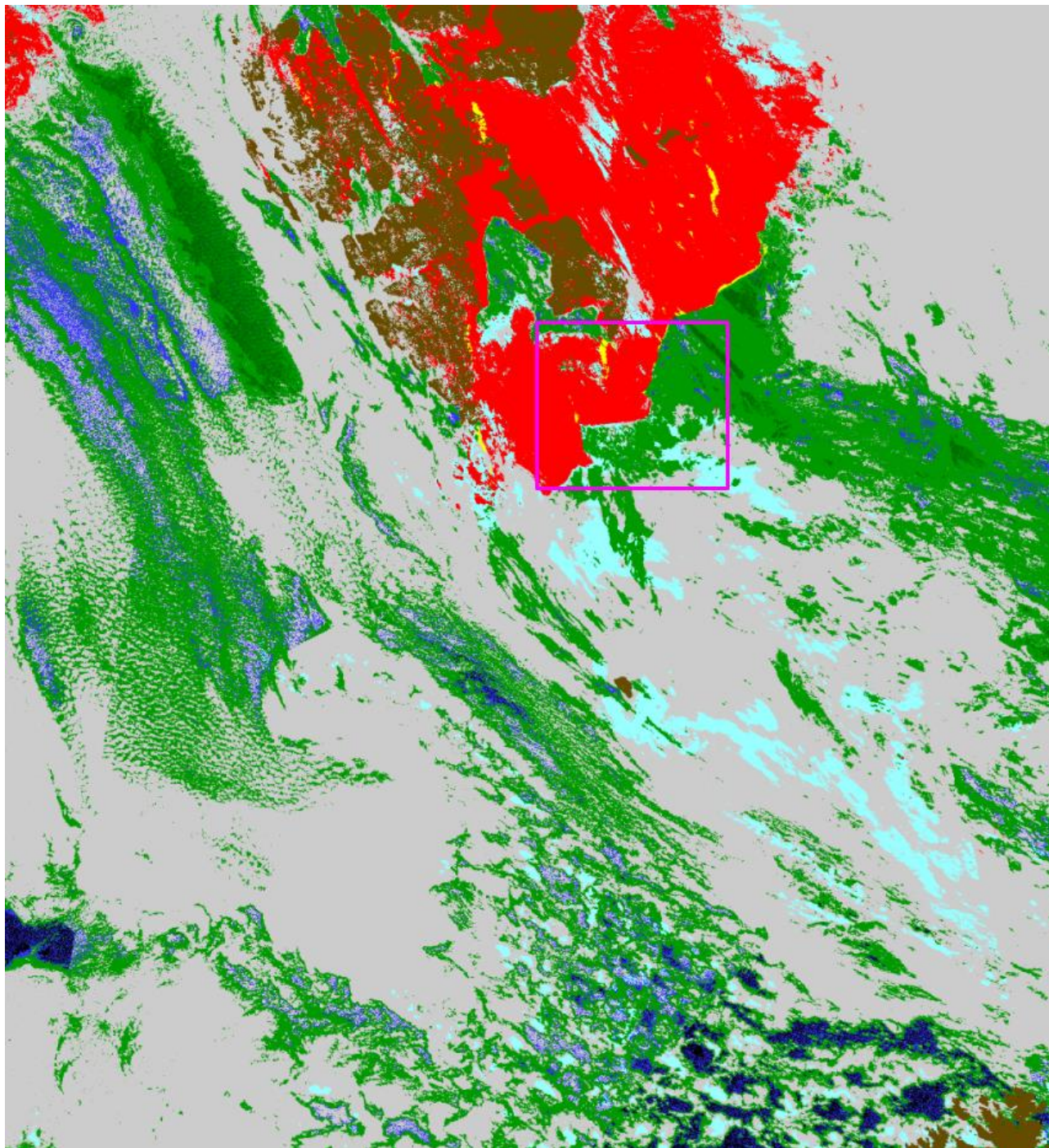


*Рисунок 5. Классификация ледовой обстановки в районе Шпицбергена за 12.06.2015г.*



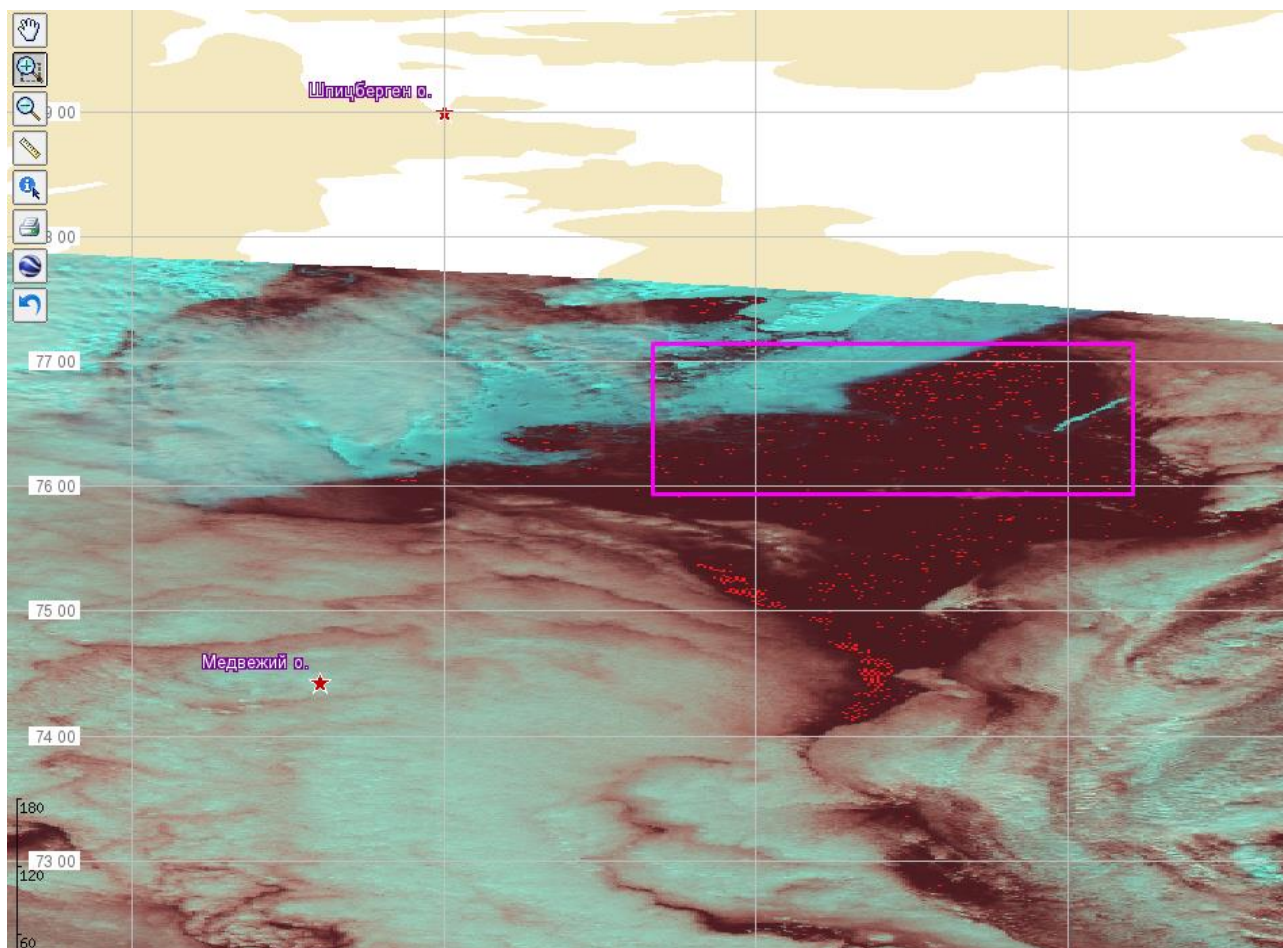
*Рисунок 6. Визуализация MODIS за тот же день.*





*Рисунок 7. Классификация ледовой обстановки в районе Штицбергена за 14.04.2015г.*





*Рисунок 8. Визуализация MODIS за тот же день.*

Таким образом, в докладе показана принципиальная работоспособность методики автоматической классификации ледового покрытия ранее отработанного для Охотского моря в Арктическом регионе. Уточнение и доработка метода, в том числе построения композитных продуктов для использования в Арктике, представляется целесообразным для данных отечественных спутников.

Работа выполнялась в рамках темы Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Мониторинг», (госрегистрация № 122042500031-8).

Работа проводилась с использованием возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг», включая УНУ "Вега - Science".

## Литература

1. Андреев М.В., Егоров В.А., Уваров И.А., Дегай А.Ю., Пырков В.Н., Черных В.Н. Разработка новых методов обработки и представления спутниковых данных в картографическом интерфейсе Отраслевой системы мониторинга Росрыболовства // Тринадцатая всероссийская открытая конференция "Современные проблемы

дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва. ИКИ РАН, 16-20 ноября 2015. Тезисы докладов, 2015. С. 235.

2. А.Ю. Дегай, М.В. Андреев, В.А. Егоров, В.Н Пырков, В.Н. Черных Развитие методов автоматического распознавания ледового покрытия на основе спутниковых данных оптического и ближнего инфракрасного диапазона для системы мониторинга рыболовства // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4.

3. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашницкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263-284.

4. Солодилов А.В., Пырков В.Н. Комплексный спутниковый мониторинг судов рыбопромыслового флота // Аэрокосмический курьер. 2011. № 2 (74). С. 68–70.

5. Breiman L. Random Forest // Machine Learning. 2001. V. 45. №1. P. 5–32

6. Gao B.C. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. // Remote Sensing of Environment. 1996 V 58. №3. P. 257-266.

7. Hall D. K., Riggs G. A., Salomonson V. V. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms – URL: <https://modis-snow-ice.gsfc.nasa.gov/?c=atbd> 2001.