

УДК 551.467

**М.М. Чумаков, К.В. Лужкова**

## **Определение характеристик ледяного покрова на акваториях западной части Карского моря и Обско-Тазовского региона по радиолокационным и спектрорадиометрическим данным дистанционного зондирования Земли**

Применение спутниковых снимков для определения ледовых условий в замерзающих морях началось с конца 1970-х гг. В то время методики интерпретации спутниковых снимков базировались на опыте использования визуальных авиационных методов картирования. В настоящее время методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются основными методами мониторинга и оценки пространственно-временной изменчивости ледяного покрова. Основными методами ДЗЗ, используемыми для этих задач, являются радиолокационная съемка (радар бокового обзора с синтезированной апертурой, PCA или SAR) и спектрорадиометрическая съемка (например, данные сенсоров MODIS с ИСЗ TERRA и AQUA).

### **Методика генерации спутниковых снимков по информации, полученной непосредственно из данных спектрорадиометра MODIS**

Опыт проведения аналитического исследования геолокализированных спутниковых снимков, представляющих собой синтезированное RGB-изображение электромагнитного излучения в диапазонах трех длин волн – 479, 1652 и 2155 нм, показал их практическую значимость для изучения пространственно-временных вариаций ледового режима на акваториях Байдарацкой и Обской губ, а также района Харасавэйского месторождения.

Однако в процессе изучения данных этих снимков были выявлены случаи, когда на одном из снимков детектировались неоднородности (например, трещиноподобные объекты) ледяного покрова изучаемой акватории, а на снимках за последующие даты ледяной покров выглядел однородным. При этом через определенный промежуток времени (в некоторых случаях – через месяц) снова детектировались неоднородности, имеющие ту же локализацию.

Следовательно, возникает необходимость в проверке достоверности вывода о том, что трещина (ниже мы будем для краткости использовать этот термин, соотнося его с трещиноподобными зонами деформированного льда, которые могут иметь ширину в несколько сотен метров) исчезла вследствие подвижек ледяных полей и что подобные подвижки имеют достаточно высокую повторяемость в данном пункте.

Также необходимо выяснить причину недостаточно четкой детектируемости полей гряд торосов и стамух. С теоретической точки зрения, известно [1], что если при генерации снимка использованы данные об излучении в видимом диапазоне (длина волны – 479 нм), то снег и лед хорошо отражают свет в этом диапазоне, а также происходит дополнительное рассеивание на обломках льда, образующих парус тороса, и следовательно, в районе существования торосистых ледяных полей должно наблюдаться усиление сигнала на длине волны 479 нм при пространственном разрешении детекторов, равном 250 м.

В связи с вышеперечисленными замечаниями приобретает актуальность задача разработки методики генерации спутниковых снимков по информации, полученной непосредственно из данных спектрорадиометра MODIS.

**Ключевые слова:**

спутниковые снимки, космоснимки, ледовые условия, трещины, радиолокация, спектрорадиометр.

**Keywords:**

satellite snapshots, cosmic snapshots, ice conditions, cracks, radiolocation, spectroradiometer.

Для ее выполнения было проведено углубленное изучение технической документации, имеющейся на сайте NASA, в результате чего было выяснено, что спектрорадиометр MODIS имеет 490 детекторов, которые измеряют электромагнитное излучение в 36 спектральных диапазонах, охватывающих видимую и инфракрасную области спектра. Но не во всех спектральных диапазонах детекторы имеют одинаковое пространственное разрешение; в частности, лишь в диапазоне 1 (средняя длина волны – 645 нм) и в диапазоне 2 (средняя длина волны – 858 нм) пространственное разрешение составляет 250 м/пиксель. Поэтому размещенные на сайте NASA синтезированные снимки, использующие диапазоны 3–6–7, могут иметь истинное пространственное разрешение только 500 м, а предлагаемые снимки разрешением 250 м получены путем интерполяции [2].

Следовательно, для генерации снимка с истинным пространственным разрешением, равным 250 м, необходимо использовать данные измерений, выполненные в диапазонах 1–2.

Диапазон 1 принадлежит видимой части спектра, а диапазон 2 находится в близкой инфракрасной области, и в светлое время суток его данные отражают в большей степени видимое излучение. Таким образом, лед и снег обладают большой отражательной способностью для длин волн этих диапазонов. Облачность имеет высокую отражательную способность в диапазонах 6–7 инфракрасной области спектра, в которой излучение льда весьма мало.

Если при генерации снимка, использующего RGB-представление (красный-зеленый-голубой), на место второго (green) и третьего (blue) каналов подставить данные с детекторов диапазонов 2 и 1 соответственно, а на место первого канала (red) – данные диапазонов 6 или 7, то регионы, покрытые снегом или льдом, будут окрашены в оттенки голубого цвета. Чем больше льда, тем больше абсорбция в коротковолновой части инфракрасного диапазона (1652 и 2155 нм) и, следовательно, тем большая яркость голубого цвета присутствует в окраске региона [3].

Морская вода будет выглядеть на снимке очень темной, почти черной, поскольку хорошо поглощает во всех используемых диапазонах длин волн, а возможное наличие в морской воде седиментов придаст ей темно-синий цвет.

Таким образом, комбинация этих длин волн позволяет надежно выделять регионы,

покрытые снегом или льдом, поскольку они имеют большую отражающую способность в видимой части света и сильно поглощают в коротковолновой части инфракрасной области спектра (1652 и 2155 нм), и за счет высокого пространственного разрешения детекторов видимого диапазона хорошо отражает неоднородности ледяного покрова.

Несомненным достоинством разработанной методики является появившаяся возможность использовать данные измерений, получаемые с искусственного спутника Земли (ИСЗ) AQUA. Использование данных дистанционного зондирования, получаемых с двух ИСЗ, позволит осуществлять мониторинг быстропротекающих процессов изменения ледяного покрова и, в частности, более точно определять скорость и направление дрейфа ледяных полей.

### **Методика совместного анализа радиолокационных и спектрорадиометрических данных ДЗЗ**

Из физических основ радиолокации следует [4], что текстура радиолокационного снимка определяется шероховатостью и диэлектрической постоянной сканируемой поверхности. При слабой пространственной изменчивости солёности основным фактором, влияющим на характер отражения радиолокационных импульсов от поверхности моря является ее шероховатость. Пространственные неоднородности шероховатости морской поверхности являющиеся в основном следствием как ветрового волнения, так и наличия ледяного покрова, отображаются на снимках в виде светлых и темных областей разной степени интенсивности, причем меньшей величине шероховатости соответствует более темный оттенок текстуры снимка.

При дешифрировании радиолокационного изображения необходимо также учитывать, что области выглаживания на морской поверхности (слики) могут быть образованы самыми разнообразными процессами в верхнем слое моря и приземном слое атмосферы. К сликообразующим явлениям относят: штилевые зоны, дождевые ячейки, апвеллинг, внутренние волны в океане и атмосфере, сдвиги скорости течения, цветение фитопланктона, плавающую растительность, натуральные поверхностно-активные вещества, а также пленки нефти и нефтепродуктов [5, 6]. Таким образом, основными параметрами, используемыми при дешифрировании радиолокационного

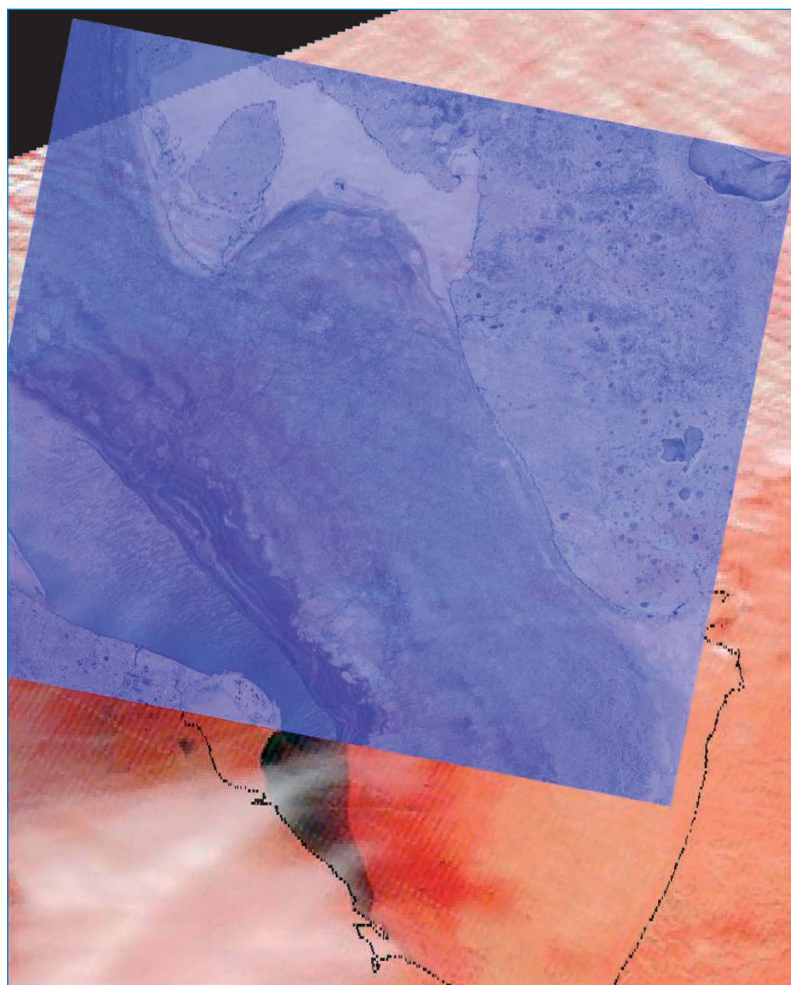
изображения, являются форма, размер, контуры, текстура, четкость границы и яркостные характеристики отдельных областей снимка.

К сожалению, при дешифрировании некоторых снимков, отражающих ледовую обстановку в период разрушения ледового покрова, особенно если оно определяется в основном термическим фактором, воспользоваться вышеперечисленными признаками не удастся. В сезон таяния ледяного покрова, до начала его динамического разрушения, может происходить уменьшение шероховатости ледовой поверхности как за счет таяния и уменьшения высоты торосов, так и из-за появления талой воды на льду. Вследствие этого радиолокационное изображение приобретает однородную текстуру, анализ которой не позволяет сделать достоверных выводов о типе и наличии льда на исследуемой акватории.

Продемонстрируем подход к анализу ледовой обстановки с помощью пространствен-

ного совмещения радиолокационных и спектрорадиометрических данных ДЗЗ на конкретном примере (рис. 1). Рассмотрим сгенерированный снимок с ИСЗ TERRA за 13.02.2012 г. (районы с преимущественно красным тоном на рис. 1), использующий комбинацию диапазонов 3–6–7 и отражающий ледовую обстановку в исследуемом районе через 6 ч после получения снимка с ИСЗ Radarsat-2 (районы с преимущественно голубым тоном на рис. 1).

По данным ГМС «Маррессале» к моменту получения снимка с ИСЗ TERRA за 13.02.2012 г. температура приземного воздуха понизилась до  $-13^{\circ}\text{C}$  при скорости юго-западного ветра 14 м/с. Радиолокационное изображение не позволяет однозначно определить наличие или отсутствие льда в заприпайной полынье. В то же время выполненный в соответствии с методикой обработки спектрорадиометрических изображений [1] анализ данных, представленных на этом снимке, показывает отсутствие



**Рис. 1. Пример совместного анализа спектрорадиометрического (районы с преимущественно красным оттенком) и радиолокационного (районы с преимущественно голубым оттенком) снимков, выполненных 13.02.2012 г.**

льда в заприпайной полынье, поскольку только свободная ото льда морская вода может выглядеть на снимке очень темной, почти черной, из-за хорошего поглощения электромагнитных волн всех используемых диапазонов.

Таким образом, выполнив в среде геоинформационной системы (например, ArcInfo) пространственное совмещение амплитудных данных радиолокационного снимка и спектрорадиометрических данных (подготовленных по разработанной методике), можно сделать обоснованные выводы о наличии и характере ледяного покрова в исследуемом регионе.

### Примеры определения ледовых условий на акватории западной части Карского моря на основе анализа спутниковых снимков

Существенными достоинствами спутниковых снимков, сгенерированных по данным спектрорадиометра MODIS с использованием

разработанной методики, является возможность в большинстве случаев точно определять тип сканируемой поверхности (лед–снег, вода, седименты в воде, голая почва, растительность и др.), регулярность их получения (четыре раза в сутки в светлое время года), достаточно высокое пространственное разрешение снимков – 250 м и почти глобальное покрытие ими земной поверхности.

На рис. 2 приведен сгенерированный снимок, использующий комбинацию диапазонов 7–2–1, отражающий ледовую обстановку у мыса Харасавэй 07.04.2012 г. по данным ИСЗ TERRA.

Принимая во внимание линейные размеры детектированных ледяных полей и толщину льда, составляющую не менее 120 см, дрейф подобных полей представляет потенциальную опасность для инженерных сооружений, которые могут быть возведены в районе мыса Харасавэй.

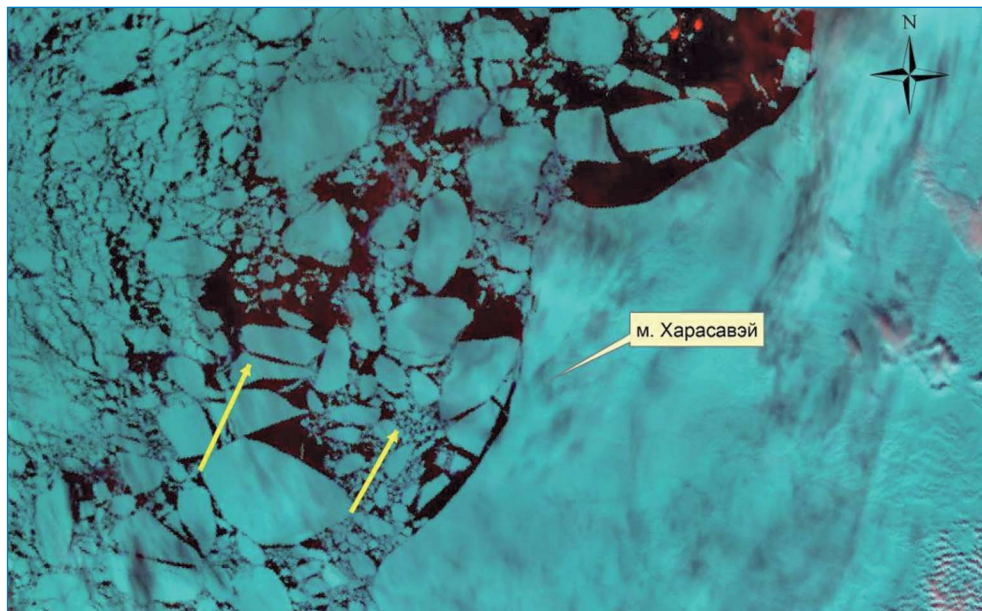


Рис. 2. Спутниковый снимок, полученный с помощью спектрорадиометра MODIS, установленного на ИСЗ TERRA, отражающий ледовую обстановку у мыса Харасавэй 07.04.2012 г. (стрелки желтого цвета обозначают вектор смещения краев гигантского ледяного поля за 48 ч)

### Методика обработки космоснимков высокого разрешения для распознавания типов морского льда и открытой воды во время ледового периода

В работе [7] представлена методика для создания цветного композитного изображения, которая улучшает визуальное распознавание типов сканируемой земной поверхности на основе данных о величинах обратного рассеяния вертикально и горизонтально поляризованных ра-

диосигналов ( $HH$  и  $VV$ ). В отличие от снимка с одинарной поляризацией снимок с двойной поляризацией может дать информацию о  $\sigma_{HH}^0$ ,  $\sigma_{VV}^0$  и  $\gamma_{co}$ -каналах, причем каналы  $\sigma_{HH}^0$  и  $\sigma_{VV}^0$  используются для создания  $\gamma_{co}$ -канала, представляющего собой соотношение ко-поляризации

( $\gamma_{co} = \sigma_{VV}^0 / \sigma_{HH}^0$ ). Возможность определения с помощью таких изображений различных типов морского льда и открытой воды определяется тем, что методы двойной поляризации опираются на различия в обратном рассеянии вертикально и горизонтально поляризованных микроволн, которые зависят от физических, термических и (или) электрических особенностей морского льда, покрытого снегом, и открытой воды.

Для построения изображения генерируется цветной композитный снимок с помощью задания  $\sigma_{HH}^0$ ,  $\sigma_{VV}^0$  и  $\gamma_{co}$  в качестве красного, зеленого и синего (red, green, blue – RGB) цветовых каналов соответственно. Включение  $\gamma_{co}$ -канала подчеркивает различные характеристики льда и воды, поскольку самым значимым фактором, влияющим на соотношение  $\gamma_{co}$ , является поведение микроволн, падающих на гладкие поверхности раздела, которые имеют разные диэлектрические свойства. Горизонтальные волны, как правило, *отражаются* от сред с гладкими поверхностями, а вертикальные волны *передаются* через среды. Эти явления объясняются френелевским отражением и могут наблюдаться для случаев гладкого тонкого льда и гладкого однолетнего льда, которые имеют достаточно большие расхождения в диэлектрической проницаемости.

Рассматриваемая методика [7] позволяет на цветном композитном снимке различать многолетний морской лед – поля белого цвета, однолетний морской лед – серого цвета, гладкий лед – темно-синего или коричневого цвета в зависимости от соотношения  $\gamma_{co}$ , открытая вода – синего или светло-синего цвета.

К сожалению, у авторов статьи не было таких ресурсов, как снимки с *HH*- и *VV*-поляризацией. Это послужило причиной разработки иной методики построения композитного изображения, использующего совместно *HH*- и *HV*-поляризацию. Учитывая различия в процессе изменения направления поляризации волны при отражении от различных сред, можно получать цветной композит с помощью наложения трех каналов: red – *HV*, green – *HH+HV*, blue – *HH/HV*.

Технология получения соответствующего композитного изображения состоит в следующем: в программе ArcMap в математических операциях находим сумму (Plus) и отношение (Divide) *HH*- и *HV*-каналов, сохраняя их в формате tif. Далее выполняем двойную фильтрацию (Filter-Filter). Такая процедура «размывает» большие значения  $\gamma_{co}$ ; тем не менее, все эти значения нужны для идентификации открытой воды, и, таким образом, возможность разграничения поверхностей не будет потеряна. Далее открываем в программе Earth View в указанном порядке снимки HV.tif; Plus.tif; FF.tif и выводим новый снимок (рис. 3).

Интерпретация композитного снимка (см. рис. 3) совместно с метеорологическими данными показывает, что исследуемые область и период охватывают широкий спектр типов льда (в том числе гряды и поля торосов), открытой воды, а также трещин (рис. 4 и 5).

Необходимо отметить, что благодаря разработанной методике обработки снимков высокого разрешения, имеющих данные о величинах обратного рассеяния *HH*- и *HV*-каналов,

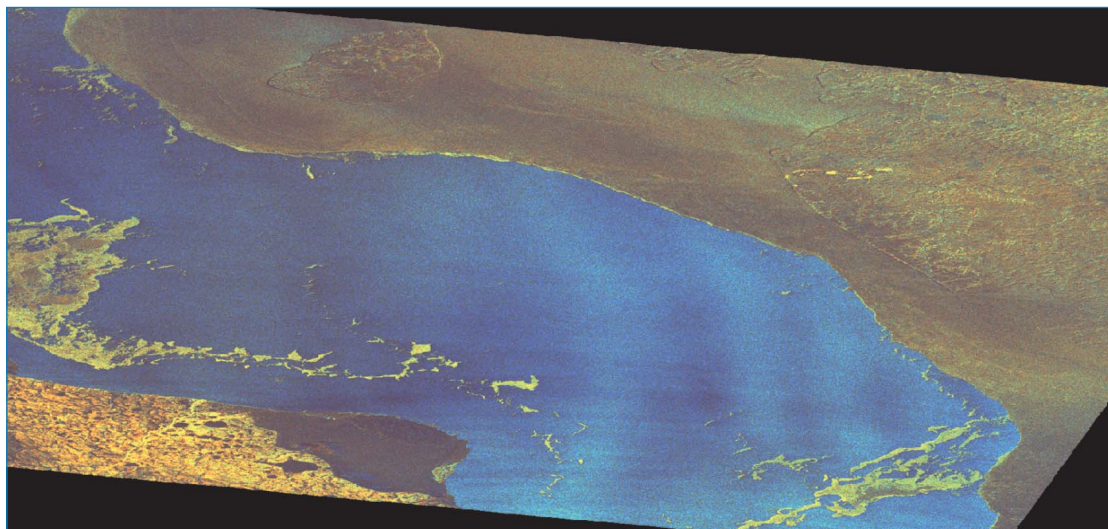


Рис. 3. Байдарацкая губа, композитный снимок за 20.05.2012 г.

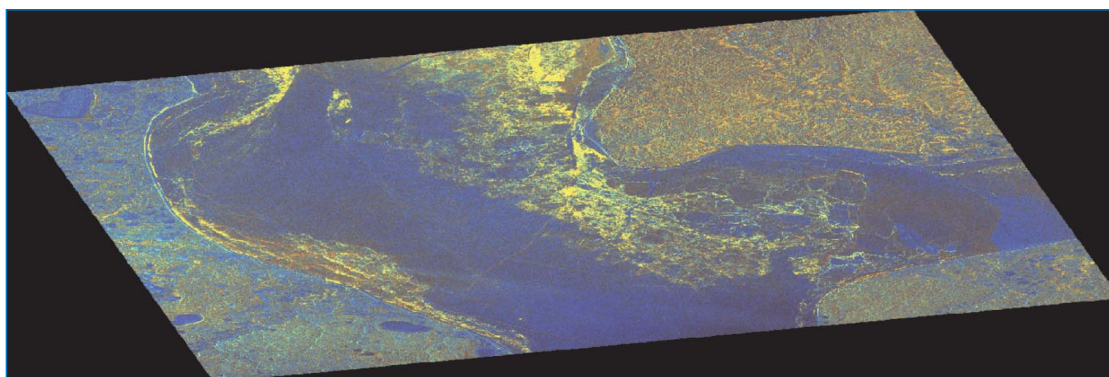


Рис. 4. Обская губа, композитный снимок за 16.05.2012 г. (сцена 1)

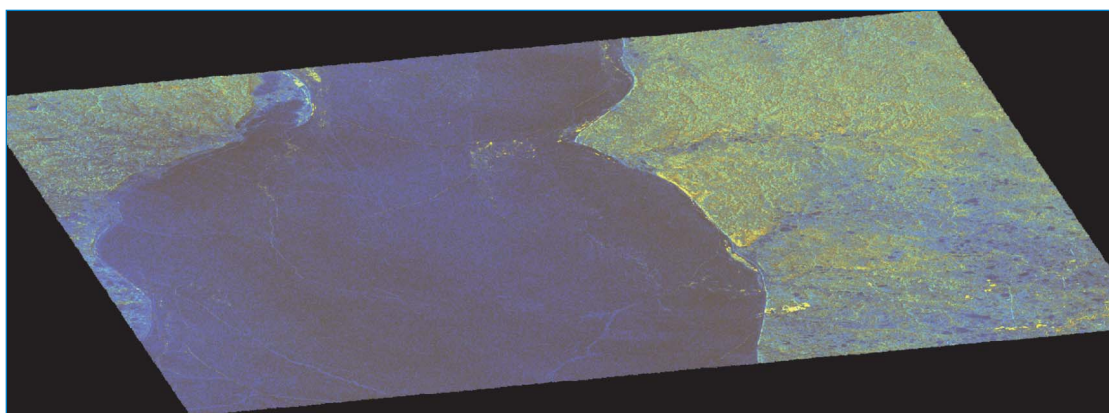


Рис. 5. Обская губа, композитный снимок за 16.05.2012 г. (сцена 2)

удается получить дополнительную информацию о расположении гряд торосов и вновь образовавшихся трещинах в сплошном ледяном

покрове Обской губы, заполненных гладким тонким льдом, а также уточнить ширину припая в Байдарацкой губе.

### Список литературы

- Hall D. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms / D. Hall, G. Riggs, V. Salomonson. – September, 2001. – P. 45.
- Franz B. MODIS Land Bands for Ocean Remote Sensing Applications / B. Franz, P. Werdell, G. Meister et. al // Proc. Ocean Optics XVIII. – Montreal, Canada, 9–13 October 2006.
- Чумаков М.М. Методика обработки спутниковых снимков высокого разрешения для оценки характеристик ледового режима и влияния изменчивости ледяного покрова на динамику вод северного Каспия / М.М. Чумаков, О.И. Зильберштейн, А.Л. Лобов и др. // Освоение шельфа арктических морей: тр. Междунар. конф. (RAO/CIS Offshore 2007). – Санкт-Петербург, 2007.
- Onstott R. Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual. – Ch. 3.: SAR Measurements of Sea Ice / R. Onstott, R. Shuchman.
- Иванов А.Ю. Геоинформационный подход к проблеме картографирования пленочных загрязнений моря / А.Ю. Иванов, В.В. Затыгалова. – 2007. – [www.scanex.ru/ru/publications](http://www.scanex.ru/ru/publications).
- Иванов А.Ю. Стики и пленочные образования на космических радиолокационных изображениях / А.Ю. Иванов // Исследование Земли из космоса. – 2007. – № 3. – С. 73–96.
- Geldsetzer T. Sea ice type and open water discrimination using dual co-polarized C-band SAR / T. Geldsetzer, J. Yackel // Can. J. Remote Sensing. – 2009. – V. 35. – № 1. – P. 73–84.