

УДК 551.467:[528.837:629.783]«45»(268.55)

МНОГОЛЕТНИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА СТАМУХАМИ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Е.В. Платонова, И.А. Бычкова

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, jen@aari.ru

Представлены результаты многолетних наблюдений за стамухами Восточно-Сибирского моря с использованием спутниковой информации различных спектральных диапазонов высокого и среднего пространственного разрешения. Выполнено картирование мест наибольшей повторяемости стамух крупных размеров, определены периоды их формирования, обозначены места образования групп, показана зависимость числа стамух от ледовых условий в Арктическом регионе. Рассмотрен метод обнаружения опасных ледяных образований по спутниковым снимкам, сделаны выводы о применимости спутниковых данных для мониторинга стамух.

Ключевые слова: стамуха, спутник, дистанционное зондирование, радар, оптический диапазон, Восточно-Сибирское море, батиметрия, морской лед.

LONG-TERM OBSERVATION OF GROUNDED HUMMOCKS IN THE EASTERN SIBERIAN SEA ON SATELLITE DATA

E.V. Platonova, I.A. Bychkova

Federal State Budgetary Institution “Arctic and Antarctic Research Institute”

The results of long-term observations of grounded hummocks in the East Siberian Sea using satellite data of various spectral ranges of high and medium spatial resolution are presented. The mapping of the places of the most frequent occurrences of large grounded hummocks was carried out, the periods of their formation were determined, the dependence of the number of grounded hummocks on ice conditions in the Arctic region was shown. A method for detecting grounded hummocks from satellite images has been considered, and conclusions have been made about the applicability of satellite data for monitoring of grounded hummocks.

Keywords: grounded hummock, satellite, remote sensing, radar, optical spectral range, East Siberian Sea, bathymetry, sea ice.

Введение

В последние годы отмечается рост хозяйственной активности в морях Арктики, что требует оперативного информационного обслуживания, постоянного доступа к актуальной и точной информации о ледовом режиме морей и наличии на их территории опасных ледяных образований (ОЛО).

Стамухи представляют определенную опасность как для судов, так и для гидротехнических конструкций. Поэтому освоение месторождений углеводородного сырья в мелководных зонах арктических морей, прокладка подводных трубопроводов и кабелей связи требуют достоверных сведений о характеристиках и локализации стамух в регионе.

Начиная с середины прошлого века основным источником информации о распределении стамух в арктических морях служили материалы ледовой авиационной

разведки, выполнявшейся в течение нескольких десятков лет: фиксировалось местоположение стамух, иногда определялись их геометрические параметры [1]. Эта информация составила основу для создания электронной базы данных о стамухах в шельфовой зоне Арктики. Однако из-за того, что периодичность визуальных наблюдений и их точность невелики, невозможно получить полную картину распределения стамух по акватории.

Наиболее эффективно с задачей мониторинга ОЛО справляются спутниковые наблюдения. Для обнаружения стамух в Арктике в период полярного дня используют радиолокационную информацию совместно со снимками оптического диапазона — видимого и инфракрасного. Детальность оптических снимков, их способность выявить текстуру ледяных образований позволяют повысить информативность спутниковой съемки, достоверность обнаружения и идентификации стамух.

Таким образом, на основе многолетних данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) возможно создание информационной базы по стамухам. Полученные сведения могут служить в качестве источника справочной информации о локализации и межгодовых колебаниях числа стамух в исследуемом регионе и применяться для решения инженерных задач.

Целью работы является оценка возможности обнаружения стамух крупных размеров по спутниковым данным различных спектральных диапазонов, а также получение статистических сведений о локализации и межгодовых колебаниях числа стамух в Восточно-Сибирском море.

Батиметрические данные

Глубина моря является одним из основных вспомогательных параметров, принимаемых во внимание при дешифрировании стамух на спутниковых снимках. На рис. 1 приведена батиметрическая карта южной части Восточно-Сибирского моря, построенная по данным ЕСИМО. Эта часть моря наиболее мелководна. Рельеф по всей акватории относительно ровный. Практически половина западной части Восточно-Сибирского моря ограничена изобатой 20 м и лишь ближе к северу глубина увеличивается до 40 м.

Восточная часть моря более глубоководная, чем западная. Мелководье со значениями глубины 20 м находится вблизи меридиана 160° в. д. на удалении 165 км от материка и распространяется на юго-восток, приближаясь к суше и к северному берегу острова Айон. В прибрежной зоне, вдоль побережья Чукотки, значения глубины также не превышают 20 м. На остальной акватории образование стамух происходит на глубине 25—40 м. Исключение составляют две банки, расположенные на расстоянии 65 и 80 км к западу от острова Врангеля, и банка к северу от Медвежьих островов [7].

Исторические данные об обнаружении стамух в Восточно-Сибирском море

В Восточно-Сибирском море отмечено максимальное число стамух (71 % общего числа стамух в Арктике) по сравнению с другими северными морями [1]. В основном стамухи здесь образуются из дрейфующих торосов, когда при



Рис. 1. Батиметрическая карта южной части Восточно-Сибирского моря, построенная по данным ЕСИМО.

прижимном ветре торосы выходят на мелководье и внедряются в донный грунт. При этом длина борозд может достигать сотен метров, а глубина внедрения — нескольких метров [8]. Статистических данных о размерах стамух по этому региону очень мало.

Образование стамух происходит через определенные промежутки времени, связанные с продолжительностью естественно-синоптических периодов. На их становление влияют динамические процессы, определяющие скорость дрейфа льда, рельеф дна и колебания уровня, как периодические, так и непериодические [7].

На мелководьях Восточно-Сибирского моря, в зонах, где глубина не превышает 20 м, стамухи образуются наиболее часто. Их наибольшее число отмечается на восточных подходах к проливу Дмитрия Лаптева, к северу от мыса Большой Баранов и у острова Айон. У Чукотского побережья стамухи образуются в узкой прибрежной зоне. Выделяется участок побережья от мыса Шелагский до мыса Якан, где число стамух наиболее велико.

По данным авиаразведки максимальное число стамух приходится на период таяния (август — сентябрь), однако, скорее всего, это связано с тем, что наблюдения в этот период проводились чаще. Статистической информации о размерах

стамух по данному региону очень мало. Для крупных стамух, размером около 10 км, высота паруса составляет от 20 до 40 м [7].

Упоминание об исследованиях стамух в Восточно-Сибирском море содержится в работах А.В. Колчака начала XX века. Особенно много стамух Колчак наблюдал восточнее Ляховских островов, «к югу и востоку от Новой Сибири, при входах в Благовещенский пролив». Высота стамух не превышала 60 футов (18 м), причем 40-футовые (12 м) наблюдались достаточно часто. Врангель у берегов Колымского края встречал, по сообщению Колчака, 70-футовые (21 м) стамухи [5].

После взлома припая большая часть стамух в августе — сентябре разрушается в результате таяния [4]. Однако в годы с неблагоприятными ледовыми условиями в летний период некоторая часть стамух не успевает растаять до начала ледообразования и остается на следующий год. Стамухи, продолжительность существования которых превышала один год, отмечались в юго-западной части моря вдоль припайной линии между островом Айон и Новосибирскими островами, а также на отмели западнее острова Врангеля и вдоль Чукотского побережья [7].

К примеру, во второй половине 1980-х годов отмечались случаи обнаружения нескольких крупных стамух в западной и центральной частях Восточно-Сибирского моря. Эти стамухи имели настолько характерные параметры и стабильно наблюдались в одних и тех же координатах, что использовались в качестве мест привязки маршрутов ледовой авиаразведки [2]. За последние несколько лет крупных многолетних стамух на спутниковых снимках в Восточно-Сибирском море не наблюдалось. Вероятнее всего, это связано с резким сокращением общего количества морского льда в Арктике.

Попытки обнаружения стамух на акватории Восточно-Сибирского и Карского морей при помощи данных ДЗЗ предпринимались еще в 2011 г. Управление эксплуатации флота ФГУП «Атомфлот» совместно с инженерно-технологическим центром СКАНЭКС выполнили совместный проект по оперативному спутниковому детектированию крупных стамух в мелководных районах Карского и Восточно-Сибирского морей, через которые в период навигации проходят маршруты следования судов [3].

Весной 2011 г. были получены и проанализированы изображения, связанные с Восточно-Сибирским и Карским морями. По радиолокационным данным спутника RADARSAT-1 и снимкам оптического диапазона спутников MODIS/Terra и Aqua, ENVISAT-1, EROS-B/A было обнаружено пять стамух вместе с поясом льда вокруг них.

Применение спутниковых данных для обнаружения стамух

Основным источником информации для мониторинга крупных стамух в Восточно-Сибирском море служили архивные снимки видимого диапазона спутников: Landsat-8/ETM+ (разрешение 15 м), Terra/ MODIS (разрешение 250 м), а также радиолокационные данные спутника Sentinel 1 (разрешение 40×20 м) за период с 2014 по 2018 г. Информация с этих спутников находится в свободном доступе в сети Интернет. Подбор снимков проводился с учетом отсутствия облачности

в границах исследуемого района. В сумме было обработано 1575 оптических и радиолокационных изображений.

Для идентификации стамух по спутниковым данным различных спектральных диапазонов применялась технология обнаружения ОЛО, разработанная специалистами ААНИИ. Алгоритм обнаружения ОЛО подробно описан в методическом пособии, опубликованном в 2017 г. [6].

Стамухи хорошо идентифицируются по изображениям высокого пространственного разрешения видимого и ИК диапазонов, а также по данным радиолокационной съемки. Однако в морях российской Арктики совместное использование такой информации возможно не всегда. Снимки в видимом и ИК диапазонах в период с ноября по февраль для исследований не привлекались, так как используемые для наблюдений спутники не предоставляют информацию по Арктическому региону в условиях полярной ночи.

Информативность данных видимого диапазона в значительной степени зависит от наличия облачности на снимках и освещенности земной поверхности, поэтому при мониторинге опасных ледяных образований в Арктике ведущая роль отводится радиолокационным спутниковым данным, обладающим свойствами всепогодности и независимости от освещенности. Однако при мониторинге стамух, находящихся среди неподвижных льдов, только с помощью радиолокационных спутников возрастает вероятность ложного обнаружения ОЛО. Такой эффект может быть связан с высокой яркостью зон деформированного льда и молодых льдов на РЛ-снимках.

Вероятность обнаружения стамухи с помощью радиолокационных спутниковых данных зависит от соотношения ее размера и формы, от пространственного разрешения аппаратуры, угла визирования, наличия льда [6]. При размере стамух, близком к разрешению датчика, их идентификация в неподвижном льду практически невозможна.

При идентификации стамух в припае необходимо учитывать период их формирования, рельеф дна, время становления припая, наличие/отсутствие льда на акватории. Большинство объектов по спутниковым снимкам можно распознать лишь по косвенным демаскирующим признакам [6]:

- стамухи, находящиеся во льдах в летний период, окружены пространством открытой воды;

- на подветренной стороне от припая стамухи образуется полынья; при смене направления ветра местоположение полыньи изменяется;

- движущийся лед при обтекании стамух дробится и разламывается; в итоге за стамухой остается след из сдавленных кусков льда или канал открытой воды;

- глубина образования стамух, как правило, не превышает 50 м;

- на снимках стамухи имеют неупорядоченную текстуру и неровные края;

- стамуха с припаем сохраняет свое местоположение, в то время как лед вокруг нее дрейфует в соответствии с направлением и скоростью ветра;

- вблизи стамух изменяется направление и скорость дрейфа льда; дрейф льда мимо стамух иллюстрирует влияние приливных течений на направление смещения льда.

При создании определенных условий возможен отрыв стамухи от дна и ее перемещение. В этих случаях определение «всплывших» стамух затрудняется [6].

В качестве примера на рис. 2 приведена серия последовательных спутниковых изображений крупной стамухи, наблюдавшейся на спутниковых снимках Landsat-8 и Sentinel 1 в период с декабря 2017 г. по июль 2018 г. севернее Новосибирских островов. При мониторинге стамухи учитывались историческая информация и данные о глубине моря в месте ее обнаружения, снятые с батиметрической карты, фрагмент которой приведен на рис. 2 *е*. Формирование стамухи произошло в период становления припая (начало декабря 2017 г.) в мелководной зоне (глубина от 15 до 21 м); ее максимальные горизонтальные размеры составили $27\,200 \times 4870$ м; разрушение произошло в июле 2018 г. На протяжении всего периода наблюдений положение стамухи оставалось стационарным. Летом, после разрушения припая и постепенного освобождения моря от льда, некоторое время стамуху можно было наблюдать на фоне открытой воды. В предшествующие несколько лет в этом месте также фиксировались стамухи различной протяженности.

Размер исследуемых объектов варьировал от 450 до 27 200 м. При этом наиболее крупные ледяные образования со значительными горизонтальными размерами располагались на грунте на большей глубине, нежели ОЛО с меньшей горизонтальной протяженностью. Таким образом, с увеличением глубины моря следует ожидать увеличения размеров стамух. Другим фактором, определяющим размеры стамух, является сплоченность льда. В период интенсивного таяния более сплоченные льды являются обычно и менее раздробленными. Поэтому при одинаковой глубине моря в зонах с более высокой сплоченностью льда размеры стамух также оказались больше.

В ходе исследования наблюдались стамухи, образовавшиеся в два разных периода: одни образовались осенью, в момент становления и развития припая, в процессе постепенного намерзания и торошения льда, другие — в летнее время из дрейфующих льдин. Время существования стамух первого вида могло достигать нескольких месяцев, в то время как время существования стамух второго вида не превышало нескольких дней.

Образование стамух из дрейфующего льда в большинстве случаев происходило во второй половине лета — начале осени, чаще на восточных подходах к проливу Дмитрия Лаптева. В западной части Восточно-Сибирского моря выше параллели 74° с.ш. крупные стамухи из дрейфующих льдов практически не образовывались. При этом зоны формирования «зимних» стамух распространялись до широты 77° .

Осадка стамух определялась глубиной моря в местах их фиксирования. Максимальное значение осадки составило 40 м, минимальное — 1,5 м, среднее — 13 м. Большинство застамушенных образований располагалось на глубине не более 10 м.

Наибольшее число образований в летнее время сформировалось из остатков набившегося берегового припая, реже — из крупных дрейфующих торосистых льдин на отмелях. В основном на акватории встречались одиночные стамухи, реже — бессистемные группы от трех и более штук. Группа из двенадцати стамух была зафиксирована в 2017 г. в центральной части моря. Также в прибрежной

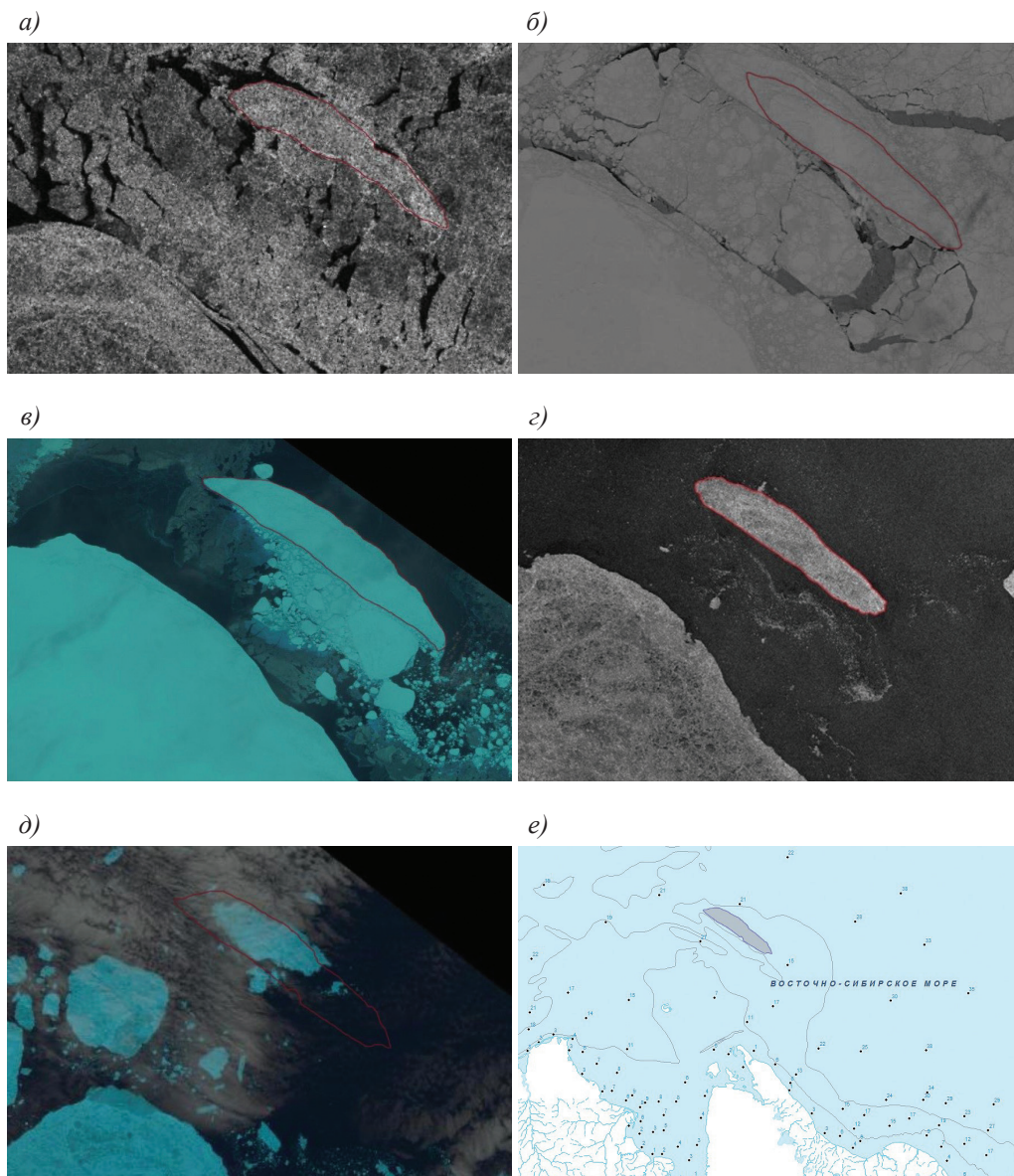


Рис. 2. Пример мониторинга крупной стамухи вблизи Новосибирских островов.

a — Sentinel 1, 17.12.2017; *б* — Landsat-8, 19.03.2018;
в — Landsat-8, 7.04.2018; *г* — Sentinel 1, 16.06.2018; *д* — Landsat-2, 30.06.2018;
е — положение стамухи на батиметрической карте.

зоне у побережья Чукотки и на отмели вблизи северного берега острова Айон фиксировались протяженные зоны из набившегося льда, длина которых достигала десятков километров. Формирование подобных многорядных ледяных барьеров, сидящих на грунте, наблюдалось и ранее во время авиаразведки.

На рис. 3 показаны положение крупных стамух и места наибольшей повторяемости групп в Восточно-Сибирском море в период с марта по сентябрь за последние пять лет.

На рис. 4 приведена межгодовая изменчивость суммарного числа стамух. За пятилетний период было обнаружено более 600 стамух крупного размера (исключая ледяные барьеры); наибольшее их число (146) наблюдалось в 2015 г., наименьшее (69) — в 2018 г. Годы с повышенным числом стамух в основном совпадают с периодами большой концентрации льда в летние месяцы в Арктике.

Распределение ледяного покрова по акватории также имеет значение. Так, в 2018 г. количество стамух было меньше, чем в предыдущие годы; при этом общая площадь льда не была минимальной.

В качестве примера на рис. 5 представлена ледовая обстановка за август 2015 и 2016 гг. Из рисунка видно, что в 2015 г. ледовитость северных морей была значительно выше, что способствовало увеличению числа стамух.

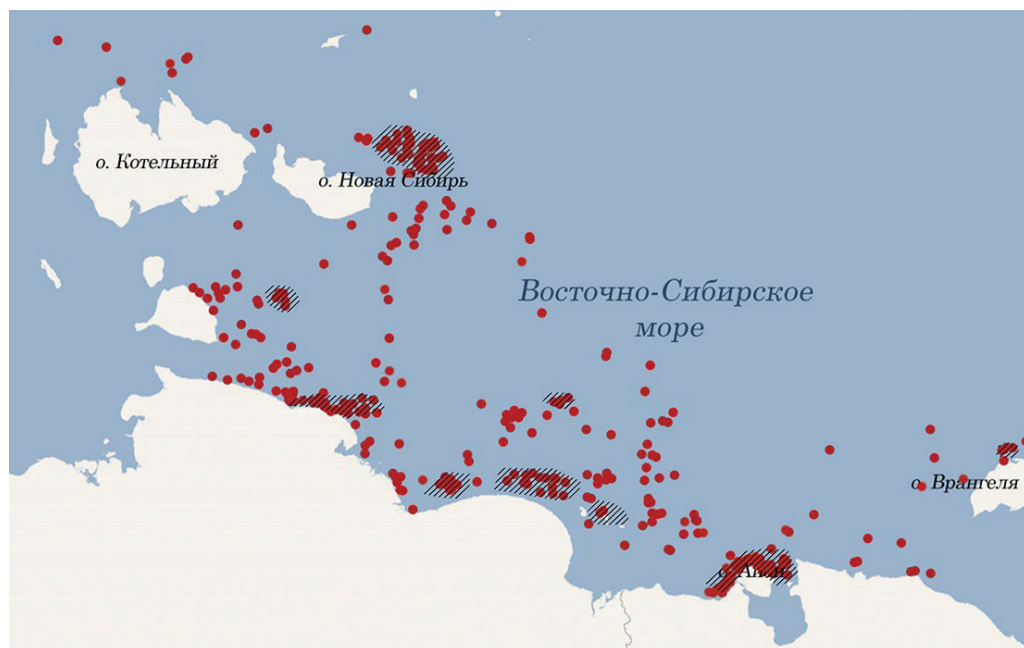


Рис. 3. Положение крупных стамух, обнаруженных по спутниковым изображениям за 2014—2018 гг. Штриховкой показаны зоны образования групп стамух.

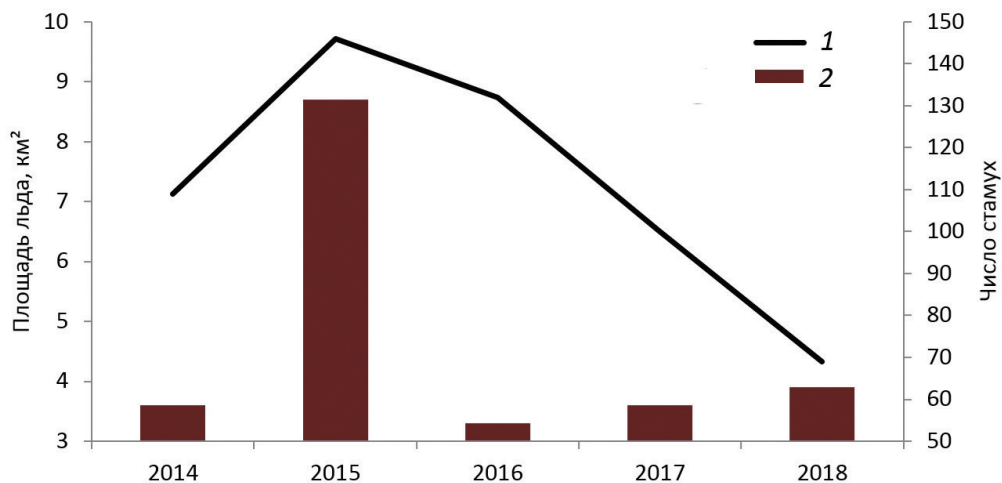


Рис. 4. Межгодовая изменчивость суммарного числа стамух (1) и общей площади льда (2) в Арктике за пятилетний период.

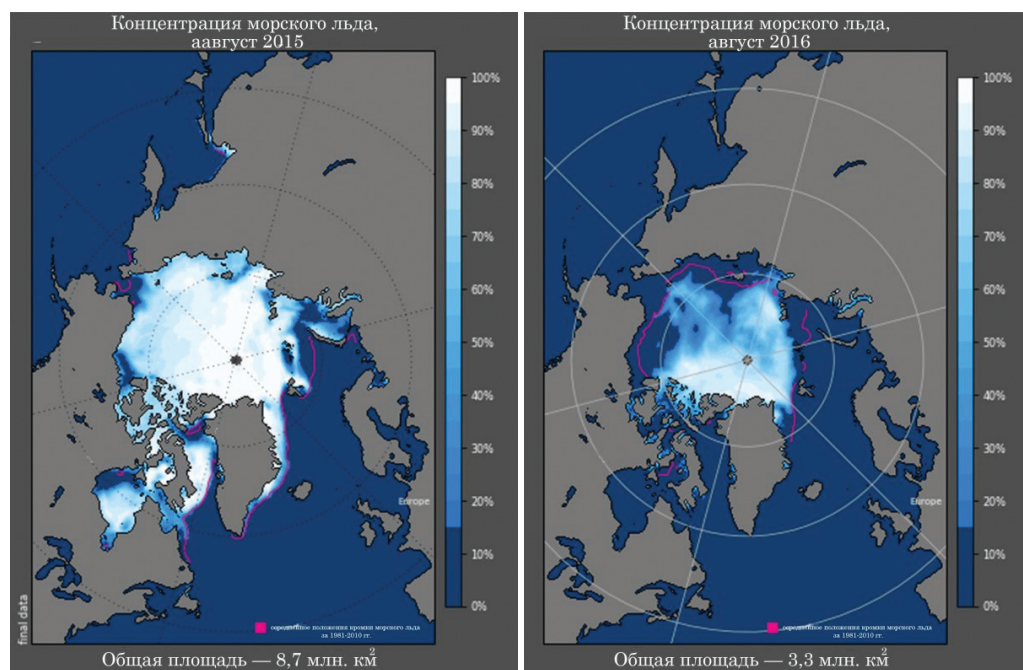


Рис. 5. Ледовая обстановка в Арктическом регионе по данным ИСЗ. Национальный центр по снегу и льду США.

a — август 2015 г., *б* — август 2016 г.

Выводы

Совместное использование радиолокационных снимков и снимков видимого диапазона для территории Восточно-Сибирского моря позволяет вести непрерывный мониторинг стамух с момента их образования, а также оценить их геометрические размеры, скорость перемещения. Полученные статистические сведения могут служить в качестве источника справочной информации о локализации и межгодовых колебаниях числа стамух в исследуемом регионе и применяться для решения инженерных задач и навигации.

Для уверенного обнаружения стамух необходимо начиная с февраля производить съемку районов предполагаемых маршрутов плавания, где возможно образование стамух. Также необходимо иметь представление о количестве льда на акватории, позволяющее сделать заключение о вероятности образования стамух в исследуемый период.

Применение технологии обнаружения ОЛО по спутниковым данным различных спектральных диапазонов, разработанной специалистами ААНИИ, с высокой вероятностью позволяет произвести раннее обнаружение стамух на предполагаемых маршрутах плавания судов и уточнить риски, связанные с возможным столкновением судна со стамухами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант № 18-05-60109\18 от 31.05.2018 г.

Список литературы

1. Горбунов Ю.А., Лосев С.М., Дымент Л.Н. Стамухи арктических морей сибирского шельфа [Электронный ресурс] // Новости ЕСИМО. 2005. Вып. 22. Режим доступа: <http://esimo.ru/dataview>. Дата обращения: 20.11 2018
2. Горбунов Ю.А., Лосев С.М., Дымент Л.Н. Стамухи Восточно-Сибирского и Чукотского морей [Электронный ресурс] // Материалы гляциологических исследований. 2007. Вып. 102. С. 41—47. Режим доступа: <http://www.webgeo.ru>. Дата обращения: 20.11 2018
3. Давыдов А.А., Дейнека С.П., Ким А. Обнаружение стамух на акватории Восточно-Сибирского и Карского морей при помощи данных ДЗЗ [Электронный ресурс] // Земля из космоса. 2011. Вып. 10. С. 40—43. Режим доступа: <http://www.zikj.ru>. Дата обращения: 25.11 2018.
4. Карелин И.Д. Метод прогноза сроков окончательного разрушения припая в Восточно-Сибирском море заблаговременностью до одного месяца // Информ. сборник Гидрометцентра России. 2011. Вып. 38. С. 88—103.
5. Колчак А.В. Лед Карского и Сибирского морей. Научные результаты Русской Полярной Экспедиции. СПб: Типография Академии наук. 1909. 167 с.
6. Обнаружение по спутниковым данным опасных ледяных образований вблизи инженерных объектов хозяйственной деятельности на шельфе арктических морей. Методическое пособие / Под ред. В.Г. Смирнова. СПб: ААНИИ. 2017. 76 с.
7. Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике / Под ред. Е.У. Миронова. СПб: ААНИИ. 2010. С. 76—112.
8. Сурков Г.А. Научно-методические основы расчета нагрузок от ледяных торосов на морские нефтегазопромысловые сооружения / Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М. 2001.