

УДК 551.511.31

Идентификация облачных проявлений атмосферных гравитационных волн над водной поверхностью по спутниковым снимкам MODIS

В.Г. Астафуров^{1,2}, А.В. Скороходов^{1*}

¹ *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

² *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40*

Поступила в редакцию 18.04.2016 г.

Предложен алгоритм идентификации облачных проявлений атмосферных гравитационных волн над водной поверхностью по спутниковым снимкам MODIS с пространственным разрешением 1000 м. Определены регионы планеты с наибольшей повторяемостью подобных явлений. Установлена повторяемость облачных проявлений атмосферных гравитационных волн в течение года над побережьями Аравийского полуострова и Австралии, Мозамбикским проливом и Курильскими островами. Приведено описание алгоритма идентификации исследуемых явлений, основанного на применении метода Viola–Jones. Определены разновидности облаков, формирующие облачные проявления атмосферных гравитационных волн. Обсуждаются результаты их обнаружения на полноразмерных спутниковых снимках MODIS различных регионов планеты.

Ключевые слова: атмосферные гравитационные волны, облачность, признаки Хаара, распознавание образов, спутниковые данные, стратификация; atmospheric gravity waves, cloudiness, Haar-like features, pattern recognition, satellite data, stratification.

Введение

Атмосферные гравитационные волны (АГВ) представляют собой вид волновых движений, возникающих и распространяющихся в устойчиво стратифицированной атмосфере. Как отмечается в [1, 2], информация об АГВ может оказаться полезной при изучении множества явлений окружающей среды, таких как теплообмен в атмосфере, динамика верхнего слоя Мирового океана, распространение акустических сигналов, биологическая продуктивность экосистем, сейсмическая активность и ряд других. В настоящее время существует несколько подходов к обнаружению таких волн. Традиционными методами их регистрации считаются результаты акустического и радиолокационного зондирования атмосферы [3, 4]. Одновременно развиваются и подходы, основанные на использовании лидаров и систем дистанционного зондирования Земли из космоса [5, 6].

Атмосферные гравитационные волны на снимках из космоса проявляются в виде группы упорядоченных квазипараллельных полос протяженностью до нескольких сотен километров, образованных облаками различных типов. Аналогичные идентификаторы АГВ можно встретить и в безоблачных зонах солнечных бликов на спутниковых снимках видимого диапазона спектра [7]. При этом расстояние

между полосами может изменяться от 2 до 70 км, а общее их количество достигать 50–60 [8]. В настоящее время обнаружение проявлений АГВ по данным дистанционного зондирования Земли из космоса проводится, как правило, на основе визуально-ручного дешифрования спутниковых снимков [1]. Причинами этого являются трудоемкость их идентификации из-за различий структуры АГВ и пространственной ориентации, неодинаковое время жизни, малый объем информации о регионах и периодичности возникновения данного явления. Эффективность идентификации АГВ зависит также и от балла облачности в регионе их появления. При этом теоретических основ, описывающих механизмы генерации и распространения АГВ, недостаточно для локализации источника их возникновения, оценки влияния параметров атмосферы (например, скорости ветра) на их структуру и ряда других сведений, необходимых для целостного описания данного явления [9, 10].

На данный момент известно несколько основных причин возникновения АГВ. Они могут генерироваться с подветренной стороны препятствий при устойчивой стратификации набегающего потока. При этом предельная скорость распространения атмосферных волн варьируется от 1 до 3 м/с [11]. Фронтальная неустойчивость и возмущение инверсионного слоя также способствуют появлению таких волн [12]. В [2] отмечается, что одной из причин генерации АГВ может быть и повышенная сейсмическая активность в регионе.

* Владимир Глебович Астафуров; Алексей Викторович Скороходов (vazime@yandex.ru).

В настоящее время существует незначительное число работ по автоматизации процедуры обнаружения АГВ, в том числе и над водной поверхностью. Так, в [6, 13] применяются вейвлет-преобразования, преобразование Радона и методы выделения границ в качестве основы алгоритмов идентификации АГВ. Использование вейвлет-анализа в данных работах позволяет перейти от точечных характеристик к пространственно-частотным с последующим подчеркиванием контраста и выделением контура полюс проявлений атмосферных волн. В [1] вместо преобразования Радона применяется преобразование Хафа, которое обычно используется при идентификации прямых линий на изображениях и позволяет улучшить результаты идентификации АГВ за счет уменьшения числа ложных обнаружений в зонах солнечных бликов спутниковых снимков. Таким образом, упомянутые методы не идентифицируют АГВ как объект, а делают квазипараллельные полосы более контрастными по сравнению с остальными участками изображения, в том числе и с использованием алгоритмов шумоподавления. При этом отсутствие количественных показателей результатов обнаружения АГВ не позволяет оценить эффективность применяемых методов анализа данных.

Целью данной работы является создание методики автоматической идентификации облачных проявлений АГВ различной структуры над водной поверхностью по спутниковым данным MODIS с пространственным разрешением 1000 м, установление регионов их наибольшей повторяемости и периодичности их возникновения. В статье приведены результаты оценки эффективности обнаружения исследуемых явлений с различной структурой и классификация типов облаков, из которых сформированы квазипараллельные полосы атмосферных волн.

Исходные данные

В настоящей статье используются спутниковые снимки MODIS видимого диапазона спектра (0,62–0,67 мкм) с пространственным разрешением 1000 м, что позволяет надежно детектировать и проводить исследования контуров облачных образований согласно спецификации NASA [14]. В перспективе для детального исследования АГВ могут применяться тематические продукты MODIS с разрешением 1000 м и ниже. Поиск регионов с наибольшей повторяемостью облачных проявлений АГВ осуществлялся путем визуального анализа более чем 20 тыс. спутниковых снимков различных прибрежных участков Мирового океана, полученных с 2007 по 2015 г. Результаты исследований показаны на рис. 1, где представлена расчетная схема пролета спутника Terra от 31.01.2016 г. [15] с обозначенными на ней регионами наибольшей повторяемости АГВ. Большинство участков относятся к акваториям с островами или полуостровами небольших размеров, за исключением северо-западного побережья Австралии и побережья Чили. Также установлено, что острова Сокотра и Мадагаскар не влияют на появление в этих регионах атмосферных волн. Поэтому генерацию АГВ над безостровными акваториями правильнее было бы объяснить либо атмосферными процессами, протекающими в этих регионах, либо сейсмической активностью. Общее число найденных спутниковых снимков составляет 528, на каждом из них обнаружено от 1 до 10 проявлений АГВ.

На рис. 2 показаны фрагменты спутниковых снимков с изображенными на них проявлениями АГВ над юго-восточным побережьем Аравийского полуострова, северо-западным побережьем Австралии,

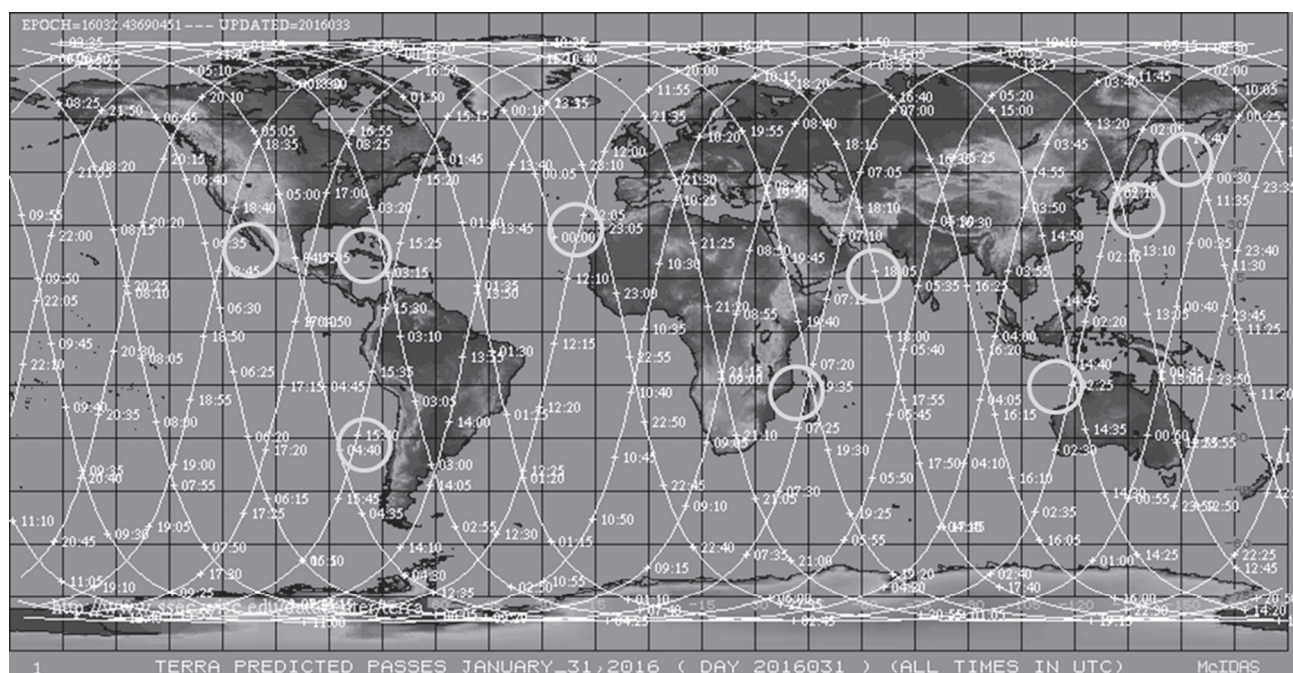


Рис. 1. Участки с наибольшей повторяемостью проявлений АГВ с 2007 по 2015 г.

Мозамбикским проливом и Курильскими островами. Как видно из рис. 2, проявления АГВ имеют различную структуру, что можно объяснить отличающимися причинами их генерации. Так, на вид проявлений АГВ, показанных на рис. 2, *з*, очевидно влияет рельеф подстилающей поверхности, а именно наличие группы островов, встречающих набегающий поток стратифицированных воздушных масс. Отсутствие же островов и расстояние до берега более 400 км исключают непосредственное влияние рельефа на изогнутую форму и генерацию проявлений АГВ, изображенных на рис. 2, *б*.

С помощью анализа обнаруженных фрагментов проявлений АГВ было установлено, что повторяемость этих явлений в течение года различна. При этом периоды пиковых показателей и их количество отличаются для разных регионов планеты. На рис. 3 приведены гистограммы повторяемости АГВ по месяцам на основе данных с 2007 по 2015 г. Из рис. 3, *а* и *б* видно, что наблюдается один период наибольшей повторяемости проявлений АГВ: в конце зимы – в начале весны (с учетом положения относительно экватора), как над побережьем Аравийского полуострова, так и над Мозамбикским проливом. Над Курильскими островами и побережьем Австралии же повторяемость исследуемых явлений увеличивается дважды за год – весной и осенью. Такие периоды увеличения количества проявлений АГВ можно объяснить в первую очередь фронтальной неустойчивостью при смене сезонов года [16].

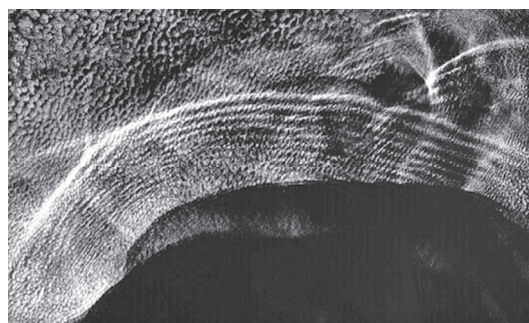
Для более детального анализа причин меняющейся периодичности генерации атмосферных волн в течение года необходимо привлекать дополнительную тематическую информацию о состоянии атмосферы и сейсмической активности.

Для исследований облачной структуры проявлений атмосферных волн были определены разновидности облаков, из которых состоят АГВ, с помощью применения разработанного нами алгоритма классификации 25 типов однослойной облачности и облаков вертикального развития на основе вероятностной нейронной сети [17]. По результатам классификации 528 снимков облачных проявлений АГВ установлено, что квазипараллельные структуры состоят в основном из кучевых, кучево-дождевых, слоисто-кучевых, высокослоистых и высококучевых облаков. При этом более 70% этих образований сформированы кучевой облачностью, упорядоченной в квазипараллельные полосы. Кроме того, встречались ситуации, когда наблюдались близко расположенные друг к другу, но различно ориентированные каскады проявлений АГВ, состоящие из облаков различных ярусов, что свидетельствует об отличии амплитуд атмосферных волн и местоположении источников их возникновения.

Найденные в результате визуального-ручного дешифрирования спутниковые снимки облачных проявлений АГВ использовались для настройки и оценки эффективности классификатора, описание которого представлено в следующем разделе.



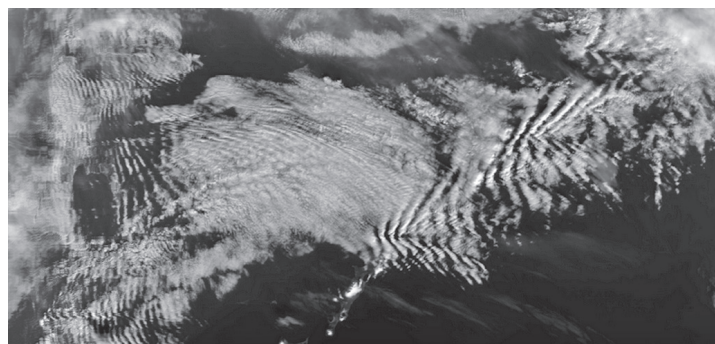
18°27' с.ш., 60°64' в.д.; 23.04.2009 г.; UTC: 06:35
а



21°82' ю.ш., 104°94' в.д.; 14.04.2009 г.; UTC: 03:20
б



19°91' ю.ш., 39°37' в.д.;
16.08.2002 г.; UTC: 07:45
в



45°86' с.ш., 148°37' в.д.; 04.12.2002 г.; UTC: 01:05
з

Рис. 2. Атмосферные волны над юго-восточным побережьем Аравийского полуострова (*а*), северо-западным побережьем Австралии (*б*), Мозамбикским проливом (*в*) и Курильскими островами (*з*)

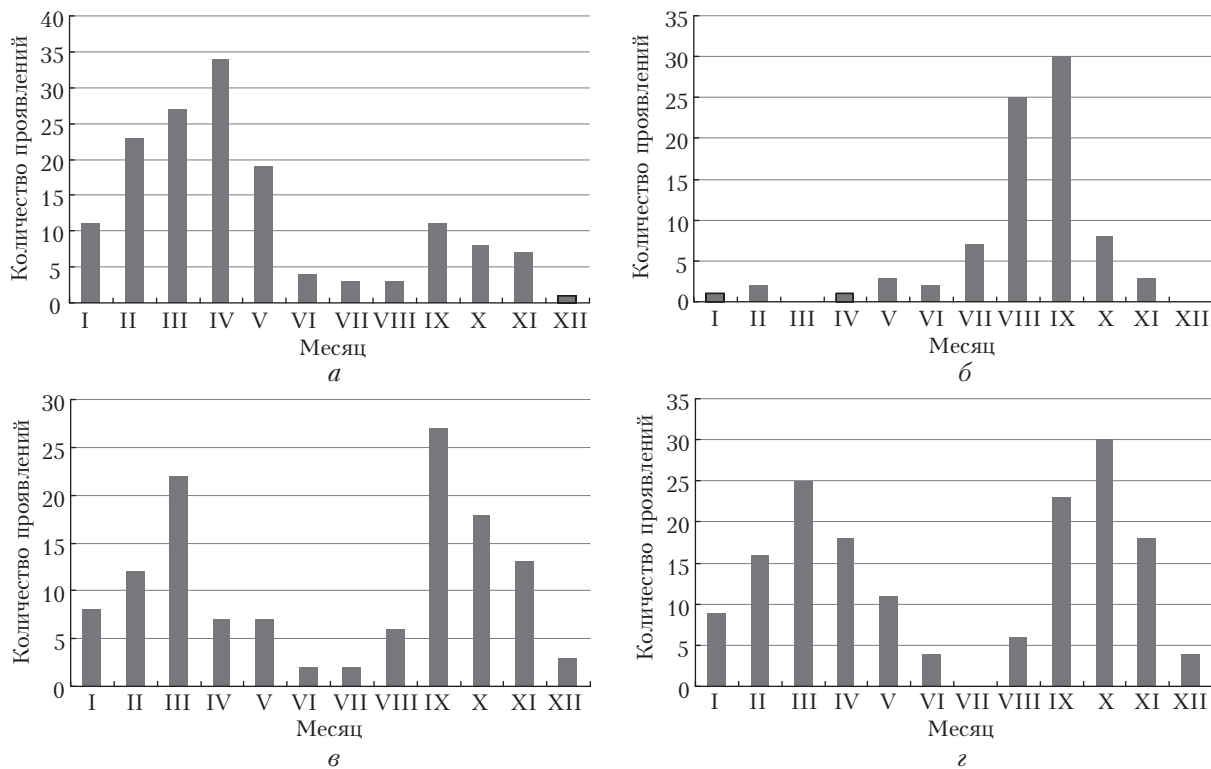


Рис. 3. Повторяемость проявлений АГВ в течение года над побережьем Аравийского полуострова (а), Мозамбикским проливом (б), побережьем Австралии (в) и Курильскими островами (г)

Алгоритм идентификации атмосферных волн

Предложенный алгоритм обнаружения АГВ на спутниковых снимках основан на методе Viola–Jones, являющемся эффективным бинарным классификатором [18]. Этот метод практически нечувствителен к пространственной ориентации и изменениям размеров искомого объекта классификации. Кроме этого, существует возможность контроля ошибок первого и второго рода в процессе настройки алгоритма, что позволяет повысить обобщающую способность классификатора [19].

Метод Viola–Jones оперирует с «примитивами» Хаара в качестве классификационных характеристик, представляющих собой различно ориентированные наборы точек и прямых. Для настройки классификатора необходимо два набора изображений –

обучающий и фоновый. Примеры используемых фрагментов спутниковых снимков показаны на рис. 4. Обучающие образцы представляют собой снимки с изображениями АГВ в виде квазипараллельных полос (рис. 4, а), не превышающих по размеру фоновые фрагменты размером 400 × 400 пикселей, на которых облачные проявления атмосферных волн отсутствуют (рис. 4, б). Объем фоновой выборки составил 403 фрагмента, а обучающей – 912 изображений различного размера. Для формирования выборок использовались спутниковые данные всех регионов, отмеченные на рис. 1.

Для обучения классификатора использовался алгоритм AdaBoost [20]. Поскольку метод Viola–Jones представляет собой каскадный классификатор (дерево решений), то алгоритм AdaBoost применяется для его реконструкции. В процессе настройки алгоритма классификации обучающие образцы

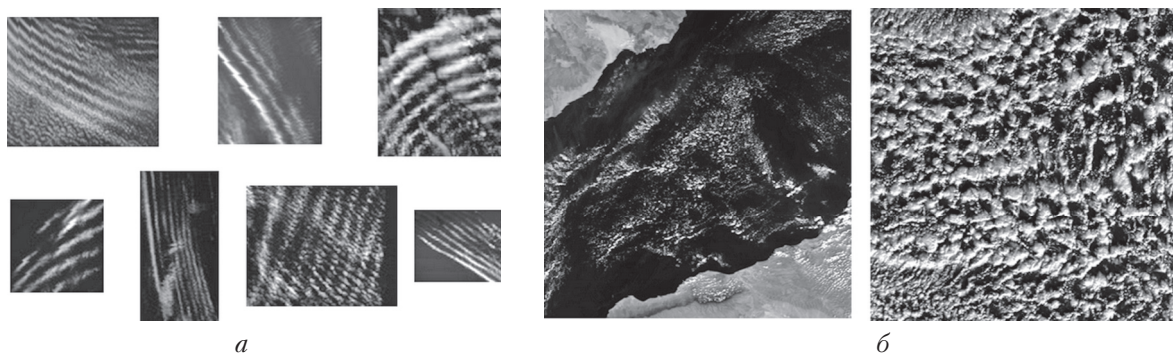


Рис. 4. Обучающие (а) и фоновые (б) образцы для решения задачи идентификации АГВ

«подставляются» в фоновые, моделируя ситуации правильного обнаружения объекта классификации на основе значений признаков Хаара. С использованием таких «подстановок» строится дерево решений и оценивается его обобщающая способность путем вычисления ошибок первого и второго рода. Если требуемый уровень этих ошибок не достигнут, то дерево реконструируется путем выбора наиболее «сильных» решающих правил. Обучение может быть прервано и по истечении предельного числа итераций (глубина дерева решений) модификации каскадного классификатора во избежание его заклинивания. В данной работе число итераций ограничивалось 20.

Процедура классификации основана на сканировании изображения, представленного в интегральном виде, скользящим окном заданного размера, для каждого положения которого вычисляется несколько тысяч значений признаков Хаара. Полученные значения классификационных характеристик подаются на вход каскадного классификатора, принимающего решение о наличии на спутниковом снимке проявлений АГВ. После завершения сканирования изображения скользящее окно увеличивается, и процедура классификации начинается заново. Полностью процесс классификации завершается, если размер скользящего окна становится больше размеров исследуемого изображения. Начальный размер окна равен 40×40 пикселей, что позволяет избежать ложных срабатываний на слоисто-кучевых волнистообразных облаках, схожих по своей структуре с проявлениями АГВ, но имеющих меньшие размеры.

Результаты идентификации и их обсуждение

Разработанный в рамках данной работы алгоритм идентификации АГВ над водной поверхностью

был апробирован на тестовой выборке, состоящей из более чем 300 полноразмерных (2030×1254 пикселя) спутниковых снимков MODIS с пространственным разрешением 1000 м, полученных в период с 2007 по 2015 г. и не используемых при обучении классификатора. Оценкой качества результатов работы алгоритма являлась вероятность правильной идентификации облачных проявлений АГВ на изображениях тестовой выборки. Следует отметить, что на каждом снимке может одновременно быть изображено несколько таких проявлений. Из 385 случаев наличия атмосферных волн число обнаруженных составило 337, т.е. оценка вероятности правильного обнаружения облачных проявлений АГВ равна 0,87.

На рис. 5 показаны результаты идентификации двух облачных проявлений АГВ по спутниковым снимкам MODIS над побережьем Омана и о. Сокотра от 23.04.2009 г. (рис. 5, а) и каскадов проявлений атмосферных волн над Курильскими островами 23.04.2015 г. (рис. 5, б). В первом случае атмосферные волны хорошо контрастируют с подстилающей поверхностью и имеют четко выраженные границы. Во втором случае эти явления происходят на фоне плотной облачности. При этом структура АГВ на рис. 5, б существенно отличается от изображенных на рис. 5, а атмосферных волн. Следует отметить, что в известных работах в данной области производится обнаружение атмосферных волн, сходных только с проявлениями, показанными на рис. 5, а [1, 6, 13]. Из этого следует, что разработанный алгоритм позволяет классифицировать облачные проявления АГВ с различными структурами и размерами, в том числе на фоне плотной облачности. При этом каждый выделенный фрагмент представляет собой локализованный объект с известными координатами, что облегчает дальнейшее использование результатов обнаружения в прикладных целях.

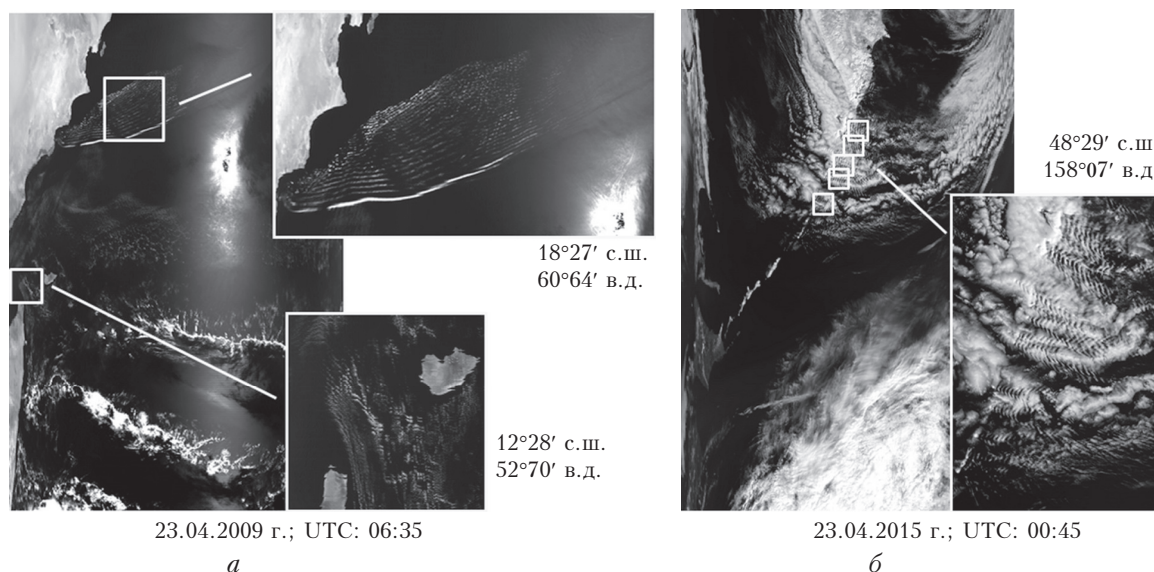


Рис. 5. Результаты идентификации облачных проявлений АГВ над побережьем Аравийского полуострова в районе Омана и о. Сокотра (а) и их каскадов над Курильскими островами (б)

Заключение

Основным результатом данной работы является алгоритм идентификации облачных проявлений АГВ над водной поверхностью по данным MODIS с пространственным разрешением 1000 м. При этом алгоритм позволяет выделять на снимках атмосферные волны с различной структурой, в том числе на фоне плотной облачности, что отсутствует в известных работах в данной области. Оценка вероятности правильной классификации тестовой выборки, состоящей из полноразмерных спутниковых снимков MODIS различных регионов планеты, равняется 0,87, что свидетельствует о хорошей обобщающей способности разработанного алгоритма.

В ходе проведенных исследований АГВ установлены прибрежные регионы с наибольшей повторяемостью данного явления в период с 2007 по 2015 г. (см. рис. 1). Отсутствие островов рядом с северо-западным побережьем Австралии, западным побережьем Чили, юго-восточным побережьем Омана и в Мозамбикском проливе свидетельствует о более сложных причинах генерации АГВ в этих регионах. Наибольшая повторяемость проявлений атмосферных волн над водной поверхностью зафиксирована над побережьем Аравийского полуострова, Мозамбикским проливом, побережьем Австралии и районом Курильских островов.

Установлено, что годовой ход проявлений АГВ неравномерен и отличается для разных регионов планеты (см. рис. 3). При этом можно предположить, что периоды наибольшей повторяемости совпадают с периодами весенне-осенней фронтальной неустойчивости и возмущений инверсионного слоя в устойчиво стратифицированной атмосфере. Для более детального анализа механизмов генерации АГВ и их распространения следует привлечь дополнительную тематическую информацию (спутниковую или наземную) об окружающей среде в регионах их появления.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-37-60019 мол_а_дк.

1. *Александрин А.И., Ким В.* Автоматическое обнаружение внутренних волн на спутниковых изображениях и оценка плотности перемешанного слоя // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 1. С. 44–52.
2. *Кашкин В.Б.* Внутренние гравитационные волны в тропосфере // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 10. С. 908–916; *Kashkin V.B.* Interval gravity waves in the troposphere // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 1. P. 1–9.
3. *Камардин А.П., Одицов С.Л., Скороходов А.В.* Идентификация внутренних гравитационных волн в атмосферном пограничном слое по данным содара // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 7. С. 812–818.

V.G. Astafurov, A.V. Skorokhodov. Identification of atmospheric gravity waves cloud views above water surface by satellite imagery MODIS.

We consider an algorithm for identification of atmospheric gravity waves cloud views above water surface by MODIS imagery with 1000-m spatial resolution. Areas of the planet are outlined where these phenomena are the most frequent. Annual repeatability of atmospheric gravity waves cloud views is determined to the coasts of the Arabian Peninsula, and Australia, Mozambique Channel, and the Kurile Islands. We give a description of these phenomena identification algorithm based on Viola–Jones method. The cloud types, which form atmospheric gravity waves cloud views are defined. The results of their identification in full-sized MODIS imagery of different planet regions are discussed.

4. *Госсард Э.Э., Хук У.К.* Волны в атмосфере. М.: Мир, 1978. 532 с.
5. *Камардин А.П., Коханенко Г.П., Невзорова И.В., Пеннер И.Э.* Совместные исследования структуры пограничного слоя атмосферы на основе лидарных и содарных измерений // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 6. С. 534–537.
6. *Rodenas J., Garello R.* Internal wave detection and location in SAR images using wavelet transform // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1998. V. 36, N 5. P. 1494–1507.
7. *Jackson C.* Internal wave detection using the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. C11012. DOI: 10.1029/2007JC004220.
8. *Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М.* Мезометеорологические процессы. М.: МГУ, 2006. 101 с.
9. *Zilitinkevich S.S., Elperin T., Kleorin N., L'vov V., Rogachevskii I.* Energy and flux-budget turbulence closure model for stably stratified flows. Part II: The role of internal gravity waves // Bound.-Lay. Meteorol. 2009. V. 133, N 2. P. 139–164.
10. *Largeroy Y., Staquet C., Chamel C.* Characterization of oscillatory motion in the stable atmosphere of a deep valley // Bound.-Lay. Meteorol. 2013. V. 148, N 2. P. 439–459.
11. *Серебряный А.Н.* Сliko- и сулоеобразующие явления в море. Внутренние волны // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса. 2012. Т. 9, № 2. С. 275–286.
12. *Иванов А.Ю.* О распознавании поверхностных проявлений океанских внутренних волн и атмосферных гравитационных волн на радиолокационных изображениях морской поверхности // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 1. С. 70–85.
13. *Simonin D., Tatnall A.R., Robinson I.S.* The automated detection and recognition of internal waves // Int. J. Remote Sens. 2009. V. 30, N 17. P. 4581–4598.
14. MODIS-Atmosphere / U.S. Government Computer System, 2000. 2016. URL: <http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov>
15. Space Science and Engineering Center / University of Wisconsin-Madison, 1996–2016. URL: <https://www.ssec.wisc.edu> (access data 15.01.2016).
16. *Герман М.А.* Спутниковая метеорология. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 368 с.
17. *Скороходов А.В., Аксенов С.В., Аксенов А.В., Лайком Д.Н.* Использование различных вычислительных систем для решения задачи автоматической классификации облачности по спутниковым данным MODIS на основе вероятностной нейронной сети // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327, № 1. С. 30–38.
18. *Viola P., Jones M.J.* Robust real-time face detection // Int. J. Comput. Vision. 2004. V. 57, N 2. P. 137–154.
19. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
20. *Schapire R., Freund Y., Barlett P., Lee W.* Boosting the margin: A new explanation for the effectiveness of voting methods // The Annals of Statistics. 1998. V. 26, N 5. P. 1651–1686.