

Методы и алгоритмы восстановления характеристик атмосферных внутренних волн на основе спутниковых данных и результатов аэрологического зондирования

А. В. Скороходов, К. В. Курьянович

Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск, 634055, Россия
E-mails: vazime@yandex.ru, ksuyain@mail.ru

Предложены методы и алгоритмы восстановления характеристик атмосферных внутренних волн и их сигнатур на основе комплексного применения данных дистанционного зондирования Земли из космоса и результатов аэрологических измерений. При этом рассматриваются геометрические признаки облачных проявлений волновых процессов и непосредственно их физические параметры. Восстановление первых из них основано на использовании только спутниковых снимков, полученных в видимом диапазоне спектра. Приведены регионы с наибольшей повторяемостью атмосферных гравитационных и орографических волн. Представлено описание методов и алгоритмов расчёта характеристик волновых процессов, а также извлечения необходимой информации из тематической продукции спутниковой съёмки и данных аэрологического зондирования. Обсуждаются результаты восстановления параметров атмосферных внутренних волн на примере эпизода их наблюдения над побережьем Аравийского полуострова от 23.04.2009. Оценки радиусов кривизны квазипараллельных полос, скорости и направлений распространения волновых процессов позволяют уменьшить области поиска источников их возникновения. Предложены рекомендации по возможному использованию описанных методов и алгоритмов, а также их результатов для решения различных тематических задач. Изложены перспективные направления развития данной работы с учётом полученных результатов.

Ключевые слова: атмосферные внутренние волны, аэрологические измерения, геометрические характеристики, облачность, обработка изображений, спутниковые данные, физические параметры

Одобрена к печати: 12.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-24-31

Введение

Атмосферные волны представляют собой вид волновых движений в устойчиво стратифицированной атмосфере, возникающих как над сушей, так и над водной поверхностью. При этом волновые процессы могут генерироваться на различных высотах, начиная от пограничного слоя и заканчивая термосферой (Кашкин, 2013; Madden, 2007; Plougonven, Zhang, 2014). Традиционными методами их регистрации являются акустическое, лидарное и радиолокационное зондирование, которые обеспечивают хоть и локальное, но достаточно регулярное наблюдение рассматриваемых явлений над сушей (Камардин и др., 2014). Над поверхностью Мирового океана детектирование атмосферных волн носит эпизодический характер и является сопутствующим результатом других экспериментов. Развитие средств дистанционного зондирования Земли из космоса в последние десятилетия дало возможность исследовать волновые процессы различной природы. Так, на спутниковых снимках, полученных в видимом диапазоне спектра, регистрируются группы упорядоченных квазипараллельных полос протяжённостью до нескольких сотен километров, образованных облаками нижнего и среднего ярусов с высотой верхней границы до 5 км, ориентированных по направлению их распространения. Такие сигнатуры характеризуют внутренние волны, которые в современной литературе подразделяются на орографические и гравитационные (<http://www.brockmann-consult.de/CloudStructures/index.htm>).

Актуальность исследования атмосферных внутренних волн обусловлена появлением в последнее время работ, в которых их связывают с различными климатическими процессами. Предполагается, что одной из причин закручивания воздушных потоков с последующим

образованием ураганов является присутствие в штормовой области рассматриваемых волновых процессов. При этом воздействие атмосферных внутренних волн на уже существующий циклон увеличивает скорость его вращения (Coleman, Knupp, 2008). Высказываются гипотезы о том, что сильные трансокеанские цунами способствуют созданию благоприятных условий для генерации волновых движений над прибрежными регионами (Hines, 1972). Для авиации интерес представляют процессы конденсации влаги на гребнях атмосферных внутренних волн с последующим образованием облаков (Авиационные..., 2007). Кроме этого, существуют работы, свидетельствующие о модуляции показателя преломления рассматриваемыми волновыми процессами, что приводит к искажению оптических и радиосигналов (Vasilyev et al., 2016).

Несмотря на регулярное наблюдение атмосферных внутренних волн над различными регионами планеты, их комплексная параметризация выполнена лишь для нескольких эпизодов наблюдения рассматриваемых явлений, особенно над водной поверхностью. В первую очередь это связано со сложностью детектирования таких волновых процессов из-за непостоянства структуры их сигнатур, ориентации в пространстве, времени жизни, балла облачности и др. Второй причиной является редкая приборная сеть. Третий фактор — отсутствие единого подхода к параметризации атмосферных внутренних волн и их проявлений, а также соответствующего программного обеспечения. При этом некоторые благоприятные условия окружающей среды, способствующие генерации рассматриваемых волновых процессов, известны. К ним относятся наличие устойчивой стратификации, температурная инверсия и присутствие струйных течений нижнего уровня (Госсард, Хук, 1978). Однако этих сведений недостаточно для полного понимания причин и детектирования источников генерации атмосферных внутренних волн, а также их связи с другими климатическими процессами.

Целью данной работы является разработка методов и алгоритмов восстановления характеристик атмосферных внутренних волн и их сигнатур на основе спутниковых данных и результатов аэрологического зондирования.

Исходные данные

Рассматриваемые в работе волновые процессы регулярно наблюдаются над различными регионами планеты. На *рис. 1* (см. с. 26) отмечены территории с наибольшей повторяемостью наблюдения атмосферных орографических и гравитационных волн (<http://www.brockmann-consult.de/CloudStructures/index.htm>). Отметим, что одним из таких регионов является акватория Курильских островов, которая представляет несомненный интерес при изучении взаимодействия процессов, происходящих в системе «атмосфера — суша — водная поверхность», способствующих созданию благоприятных условий для генерации и распространения атмосферных внутренних волн. Помимо Тихоокеанского побережья Российской Федерации в качестве районов исследования выбраны побережья Аравийского полуострова и Австралии, а также Мозамбикский пролив на основе данных о повторяемости рассматриваемых явлений и разницы во времени между спутниковой съёмкой и проведением аэрологических измерений.

В работе использовались спутниковые снимки MODIS, полученные в видимом диапазоне спектра, с пространственным разрешением 250 м (0,62–0,67 мкм). Выбор данной системы дистанционного зондирования обусловлен большим объёмом имеющейся архивной информации (начиная с 2000 г.), наличием значительного числа стандартных тематических продуктов, удобством использования интернет-сервиса поиска, предварительного просмотра и загрузки необходимой информации, а также наилучшим соотношением между максимальным значением разрешающей способности и шириной полосы съёмки среди действующих систем космического базирования. Кроме этого, в работе применялись тематические продукты MODIS, содержащие сведения о геопривязке MOD03 и MYD03 (<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod03.php>), характеристиках облачности MOD06_12 и MYD06_12 (<https://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/products/cloud>), а также информацию о температуре водной поверхности SST (<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod28.php>).

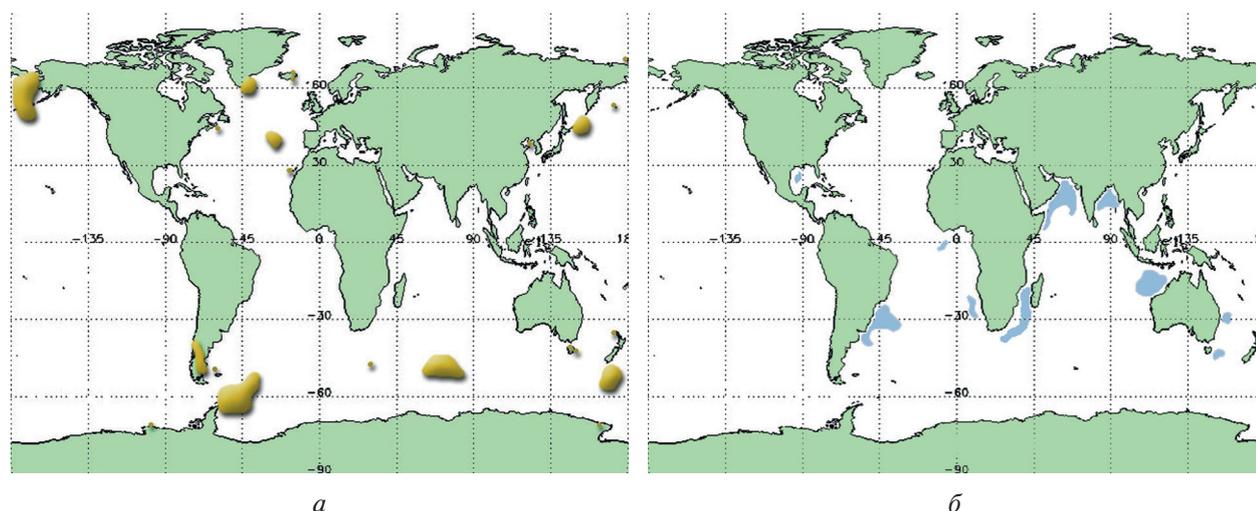


Рис. 1. Регионы с наибольшей повторяемостью наблюдения атмосферных орографических (а) и гравитационных (б) волн

Результаты аэрологических измерений были взяты с сервера Колледжа инженерного дела и прикладных наук Вайомингского университета, содержащего информацию по наблюдениям более чем за 40 лет (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). При этом необходимыми данными являлись сведения о профилях температуры, скорости и направления ветра, потенциальной температуры и относительной влажности.

Методы и алгоритмы восстановления характеристик атмосферных внутренних волн и их сигнатур

На начальном этапе проведён анализ возможностей аппаратуры MODIS и аэрологического зондирования, а также существующих работ в данной области (Lutzak, 2013; Rottman, Simpson, 1989), в результате которого определены характеристики атмосферных внутренних волн, которые будут использоваться для их комплексного описания. Все параметры волновых процессов можно разделить на две группы: геометрические и физические. К первой из них отнесены характеристики облачных проявлений атмосферных внутренних волн: площадь, занимаемая квазипараллельными полосами, их число, протяжённость, толщина, радиус и направление распространения. Вторая группа включает в себя не только параметры сигнатуры рассматриваемого явления, но и оценки характеристик непосредственно волнового процесса: тип облачности, высота, давление и температура на её верхней границе, амплитуда, длина, период и частота волн. Кроме этого, извлекаются сопутствующие параметры окружающей среды: температура суши и водной поверхности, профили температуры, скорости и направления ветра, относительной влажности и потенциальной температуры. Остановимся на методах и алгоритмах восстановления указанных характеристик более подробно.

Расчёт геометрических параметров осуществляется только на основе спутниковых снимков MODIS, полученных в видимом диапазоне спектра, без привлечения дополнительной информации. Для определения площади сигнатур атмосферных внутренних волн производится их оконтуривание, как показано на рис. 2а (см. с. 27). Поскольку границы их облачных проявлений достаточно размыты, то отрисовка контура проводится вручную, но с обязательной проверкой его на замкнутость. Далее подсчитывается количество пикселей внутри выделенной области и вычисляется площадь сигнатуры волнового процесса с учётом пространственного разрешения снимка. Для определения числа, протяжённости и толщины квазипараллельных полос необходимо вручную провести прямую через всю сигнатуру на участке, где наблюдается наименьшее число разрывов, например, как показано на рис. 2б. Дальнейшие действия выполняются автоматически, двигаясь по этой направляющей.

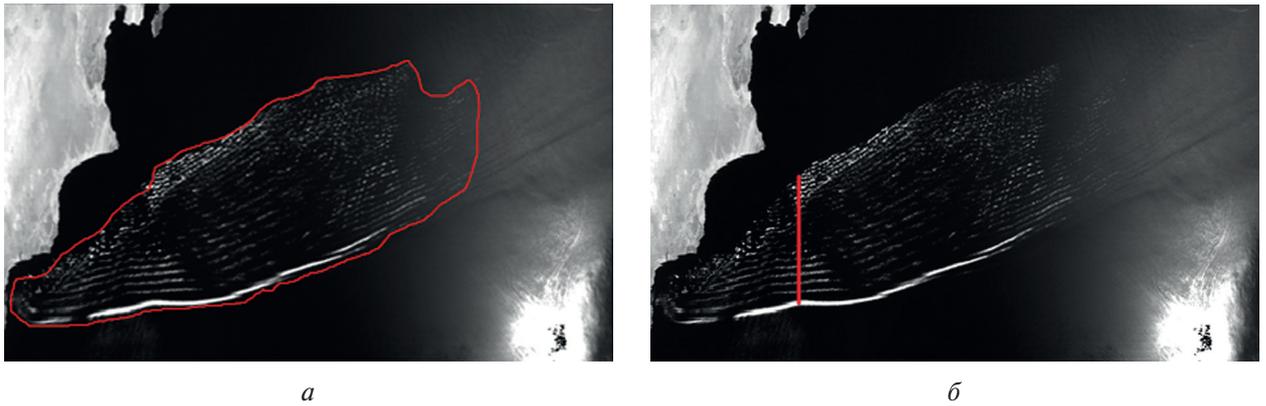


Рис. 2. Результаты оконтуривания сигнатуры атмосферных внутренних волн (а) и проведения направляющей (б)

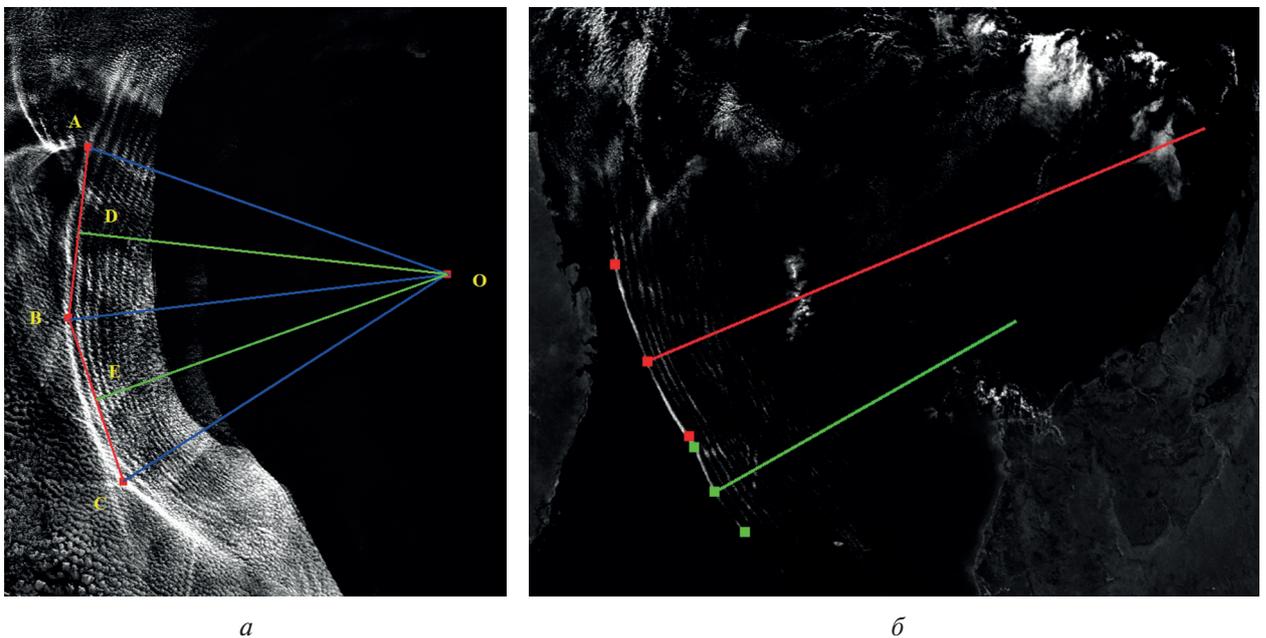


Рис. 3. Определение радиуса квазипараллельных полос на основе построения хорд (а) и радиусы кривизны в различных точках кривой (б)

Количество и толщина квазипараллельных полос определяется по числу групп светлых пикселей, расположенных последовательно на выделенной линии, а протяжённость — их подсчётом по обе стороны от неё. При этом небольшие разрывы облачности игнорируются. Следует отметить, что в большинстве случаев наибольшей протяжённостью обладает самая широкая полоса.

Вычисление радиуса осуществляется двумя способами. Согласно первому из них квазипараллельная полоса считается дугой окружности (Белоенко, Франковский, 2011). Тогда на ней произвольным образом выбираются три точки A , B и C , которые соединяются между собой хордами, как показано на рис. 3а. Далее из середины отрезков AB и BC восстанавливаются перпендикуляры DO и EO к предполагаемому центру дуги O , которая является точкой их пересечения. Таким образом, отрезки AO , BO и CO являются радиусами рассматриваемой квазипараллельной полосы. Согласно второму способу облачные проявления рассматриваются как кривые линии, которые имеют неодинаковую кривизну на их различных участках, а соответственно, и радиусы. Основная суть данной методики заключается в следующем:

1. Произвольным образом отмечается несколько точек на одной из квазипараллельных полос.

2. На основе выбранных точек строится уравнение кривой $y = f(x)$ путём применения методов интерполяции. В данной работе используются кубические сплайны, полиномы которых дважды дифференцируемы.
3. Радиус кривизны в выбранной точке можно определить по формуле (Шнейдер и др., 1972):

$$r = \frac{(1 + y'^2)^{3/2}}{|y''|}.$$

Очевидно, что второй способ является предпочтительным, поскольку позволяет вычислить радиус кривой в произвольной точке более точно. Однако в зависимости от вида кривой значения радиусов могут существенно варьироваться, а центры окружностей находиться на значительном удалении друг от друга, как показано на *рис. 3б*. С одной стороны, такие флуктуации негативно влияют на оценку направления распространения волнового процесса, а с другой — построение эволюты, возможно, поспособствует выявлению источников их возникновения, например горного массива или островной гряды, что можно считать перспективным направлением развития данной работы.

Определение типов облачности сигнатур атмосферных внутренних волн основано на использовании модификации разработанного в работе (Астафуров и др., 2016) алгоритма, позволяющего распознавать 16 разновидностей облаков с усреднённой вероятностью правильной классификации 0,85. При этом характеристики верхней границы облаков (температура, высота и давление) извлекались из тематических продуктов MODIS, также как и температура суши и водной поверхности.

Оценки характеристик непосредственно самих волновых процессов восстанавливаются путём комплексного применения результатов спутниковой съёмки и аэрологического зондирования. Длина волны определяется на основе расстояния между самыми яркими пикселями соседних квазипараллельных полос с учётом пространственного разрешения снимка. В качестве оценки скорости распространения волны использовались профили скорости ветра на высоте верхней границы наблюдаемой облачности. Зная длину волны и скорость, можно определить её период. Значение амплитуды волны оценивалось на основе нижних границ слоёв температурной инверсии и струйных течений нижнего уровня, в которых наблюдаются сигнатуры рассматриваемых явлений. Для более точного восстановления указанных характеристик волнового процесса целесообразно применение данных геостационарных спутников, что можно рассматривать перспективным направлением развития данной работы.

Результаты восстановления характеристик атмосферных внутренних волн

Предложенные в работе методы и алгоритмы восстановления характеристик атмосферных внутренних волн были апробированы на эпизодах их наблюдения над различными регионами планеты. На *рис. 2* показан фрагмент спутникового снимка побережья Аравийского полуострова от 23.04.2009 (06:35 UTC). В непосредственной близости от района наблюдения сигнатур волновых процессов расположена метеостанция в г. Салала (Оман), регулярно выполняющая аэрологические измерения. Восстановленные характеристики рассматриваемых атмосферных внутренних волн и их проявлений приведены в *таблице*. Присутствие волновых процессов подтверждается наличием благоприятных условия для их генерации и распространения: потенциальная температура возрастает, наблюдаются струйные течения нижнего уровня и температурная инверсия в слое 0,72–1,9 км.

Анализ *таблицы* позволяет сделать ряд выводов. Скорость распространения волн достаточно низкая, а с учётом значения радиуса кривизны можно предположить, что данная сигнатура находится на значительном удалении от источника генерации в состоянии затухания. Кроме этого, можно сделать оценку относительно области возникновения атмосферных волн, которая, с учётом направления их распространения, находится в районе Ормузского

пролива. Анализируя рельеф подстилающей поверхности в данной области, отметим наличие достаточно высоких гор Хаджар (более 3 км) протяжённостью 450 км. Таким образом, можно предположить, что образованию наблюдаемых атмосферных внутренних волн способствует орография местности.

Характеристики атмосферных внутренних волн
в районе побережья Аравийского п-ова от 23.04.2009

Характеристики	Значения
Площадь сигнатуры	123 008 км ²
Число полос	21
Средняя протяжённость полос	436 км
Средняя толщина полос	3,41 км
Радиус кривизны полос	888 км
Преобладающая разновидность облаков	слоисто-кучевые кучевообразные
Средняя высота верхней границы облаков	0,74 км
Средняя температура верхней границы облаков	295,16 К
Среднее давление на верхней границе облаков	939,76 гПа
Длина волны	8,1 км
Скорость распространения волны	6,33 км/ч
Период волны	1,28 ч
Амплитуда волны	0,29 км
Направление распространения волны	140°
Температура водной поверхности	301,17 К

Заключение

Основным результатом исследования являются разработанные методы и алгоритмы восстановления характеристик атмосферных внутренних волн и их сигнатур на основе комплексного использования данных дистанционного зондирования Земли из космоса и результатов аэрологических измерений. Полученная путём их применения информация способствует определению региональных особенностей возникновения рассматриваемых волновых процессов. Так, предложенные методы и алгоритмы могут быть использованы для оценки источника генерации атмосферных внутренних волн и определения условий окружающей среды, способствующих этому. Показанный на *рис. 2* и в *таблице* эпизод даёт основание говорить о возможности значительного удаления региона наблюдения от области возникновения рассматриваемых явлений. Сведения о характеристиках волновых процессов за многолетний период, возможно, позволят выявить связь между процессами, происходящими в системе «атмосфера – суша – водная поверхность», и их образованием, а также оценить риски и последствия их появления, например, для авиации или систем связи. Перспективным направлением развития настоящей работы является использование данных геостационарных спутников, которые позволят оценить некоторые характеристики атмосферных внутренних волн в динамике.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для молодых российских учёных — кандидатов наук № МК-1745.2018.5

Литература

1. Авиационные факторы риска: Программа обучения и подготовки ETR-№ 20 / Всемирная метеорологическая организация. Женева, 2007. 53 с.
2. Астафуров В. Г., Курьянович К. В., Скороходов А. В. Методы автоматической классификации облачности по спутниковым снимкам MODIS // Исследование Земли из космоса. 2016. № 4. С. 35–45.

3. Белоенко Е. В., Франковский Б. А. Сопряжения. Методические указания по теме «Сопряжения» для студентов всех специальностей. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. 36 с.
4. Госсард Э. Э., Хук У. К. Волны в атмосфере. М.: Мир, 1978. 532 с.
5. Камардин А. П., Одицов С. Л., Скороходов А. В. Идентификация внутренних гравитационных волн в атмосферном пограничном слое по данным содара // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 7. С. 812–818.
6. Кашкин В. Б. Внутренние гравитационные волны в тропосфере // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 10. С. 908–916.
7. Шнейдер В. Е., Слуцкий А. И., Шумов А. С. Краткий курс высшей математики: Учебное пособие для вузов. М.: Высшая шк., 1972. 640 с.
8. Coleman T. A., Knipp K. R. The interactions of gravity waves with mesocyclones: preliminary observations and theory // Monthly weather review. 2008. V. 136. P. 4206–4219.
9. Hines C. O. Gravity waves in the atmosphere // Nature. 1972. V. 239. P. 73–78.
10. Lutzak P. A. A proposal for analyzing and forecasting loweratmospheric undular bores in the western Gulf of Mexico region // Weather and Forecasting. 2013. V. 28. P. 55–76.
11. Madden R. A. Large-scale free Rossby waves in the atmosphere — an update // Tellus. 2007. V. 59A. P. 571–590.
12. Plougonven R., Zhang F. Internal gravity waves from atmospheric jets and fronts // Reviews of Geophysics. 2014. V. 52. P. 1–37.
13. Rottman J. W., Simpson J. E. The formation of internal bores in the atmosphere: a laboratory model // Quarterly J. Royal Meteorological Society. 1989. V. 115. P. 941–963.
14. Vasilyev P. A., Karpov I. V., Kshevetskii S. P. Modeling of the effect of internal gravity waves on upper atmospheric conditions during sudden stratospheric warming // Solar-Terrestrial Physics. 2016. V. 2. Iss. 3. P. 99–105.

Methods and algorithms for retrieving the characteristics of atmospheric internal waves from satellite data and results of aerologic sensing

A. V. Skorokhodov, K. V. Kuriyanovich

V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk 634055, Russia
E-mails: vazime@yandex.ru, ksuyain@mail.ru

Methods and algorithms for retrieving the characteristics of atmospheric internal waves and their signatures based on complex application of Earth remote sensing data and results of aerologic measurements are proposed. It is noteworthy that we consider the geometric indices of cloud manifestations of wave processes and immediately their physical parameters. The former are retrieved using only satellite-based images, obtained in the visible spectral range. We present the regions with the largest frequency of occurrence of the atmospheric gravity and orographic waves. The methods and algorithms for calculating the characteristics of the wave processes are described, as well as those of extracting the necessary information from thematic products of satellite imagery and results of aerologic sensing. The results of retrieving the parameters of atmospheric internal waves are discussed for an episode of their observations over the Arabian Peninsula coast on April 23, 2009, as an example. Estimates of curvature radii of quasi-parallel bands and propagation speeds and directions of wave processes make it possible to reduce the search areas of the sources of their origin. It is recommended how these methods and algorithms can be utilized, as well as how their results can be used to solve different thematic problems. Promising development directions of this work are discussed, taking into account the results obtained.

Keywords: atmospheric internal waves, aerologic measurements, geometric characteristics, clouds, image processing, satellite data, physical parameters

Accepted: 12.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-24-31

References

1. *Aviatsionnye faktory riska, Programma obucheniya i podgotovki ETR-No. 20* (Aviation risk factors: education and training programme ETR-No. 20), Zheneva, 2007, 53 p.
2. Astafurov V. G., Kuriyanovich K. V., Skorokhodov A. V., *Metody avtomaticheskoi klassifikatsii oblachnosti po sputnikovym snimkam MODIS* (Methods for automatic cloud classification from MODIS data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 4, pp. 35–45.
3. Beloenko E. V., Frankovskii B. A., *Sopryazheniya. Metodicheskie ukazaniya po teme “Sopryazheniya” dlya studentov vseh spetsial’nostei* (Conjugations. Methodical instructions on the topic “Conjugations” for students of all specialities), Tomsk: Izd. TPU, 2011, 36 p.
4. Gossard E. E., Khuk U. K., *Volny v atmosfere* (Waves in atmosphere), Moscow: Mir, 1978, 532 p.
5. Kamardin A. P., Odintsov S. L., Skorokhodov A. V., *Identifikatsiya vnutrennikh gravitatsionnykh voln v atmosfernom pogranichnom sloe po dannym sodara* (Identification of internal gravity waves in the atmospheric boundary layer from sodar data), *Optika atmosfery i okeana*, 2014, Vol. 27, No. 7, pp. 812–818.
6. Kashkin V. B., *Vnutrennie gravitatsionnye volny v troposfere* (Internal gravity waves in the troposphere), *Optika atmosfery i okeana*, 2013, Vol. 26, No. 10, pp. 908–916.
7. Shneider V. E., Slutskii A. I., Shumov A. S., *Kratkii kurs vysshei matematiki. Uchebnoe posobie dlya vtuzov* (A short course in higher mathematics. Textbook for technical schools), Moscow: Vysshaya shkola, 1972, 640 p.
8. Coleman T. A., Knupp K. R., The interactions of gravity waves with mesocyclones: preliminary observations and theory, *Monthly Weather Review*, 2008, Vol. 136, pp. 4206–4219.
9. Hines C. O., Gravity waves in the atmosphere, *Nature*, 1972, Vol. 239, pp. 73–78.
10. Lutzak P. A., A proposal for analyzing and forecasting loweratmospheric undular bores in the western Gulf of Mexico region, *Weather and Forecasting*, 2013, Vol. 28, pp. 55–76.
11. Madden R. A., Large-scale free Rossby waves in the atmosphere — an update, *Tellus*, 2007, Vol. 59A, pp. 571–590.
12. Plougonven R., Zhang F., Internal gravity waves from atmospheric jets and fronts, *Reviews of Geophysics*, 2014, Vol. 52, pp. 1–37.
13. Rottman J. W., Simpson J. E., The formation of internal bores in the atmosphere: a laboratory model, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 1989, Vol. 115, pp. 941–963.
14. Vasilyev P. A., Karpov I. V., Kshevetskii S. P., Modeling of the effect of internal gravity waves on upper atmospheric conditions during sudden stratospheric warming, *Solar-Terrestrial Physics*, 2016, Vol. 2, No. 3, pp. 99–105.