

Проявление внутренних волн на спутниковых изображениях северо-восточной части Черного моря в июле 2017 г.

О. Ю. Лаврова

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

В июле 2017 г. на спутниковых изображениях северо-восточной части Чёрного моря, а именно в районе Керченский пролив – Туапсе, наблюдалось аномально большое количество проявлений внутренних волн по сравнению с зафиксированными нами ранее в период с 2005 по 2016 г. Этот феномен был вызван, скорее всего, формированием в конце июня резкого и неглубокого пикноклина в результате быстрого потепления после продолжительной относительно холодной погоды в начале лета. Слой скачка плотности такого типа благоприятствует проявлению внутренних волн на морской поверхности. Исследования базировались на спутниковых данных SAR-C Sentinel-1, MSI Sentinel-2A и OLI Landsat-8. Были определены пространственные характеристики выявленных цугов внутренних волн. По изображениям видимого диапазона MSI Sentinel-2A и OLI Landsat-8, полученным 13 июля 2017 г. с разницей в 17 мин, были оценены скорости распространения передних фронтов наблюдаемых цугов. Оценка не только пространственных, но и динамических характеристик внутренних волн по их проявлениям на спутниковых изображениях стала возможной в настоящее время благодаря доступности для научных исследований данных дистанционного зондирования из космоса высокого пространственного разрешения, получаемых над одним и тем же районом с небольшим интервалом между съёмками.

Ключевые слова: внутренние волны, радиолокационные изображения, изображения видимого диапазона, SAR-C Sentinel-1, MSI Sentinel-2A, OLI Landsat-8, Чёрное море

Одобрена к печати: 20.02.2018

DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-309-315

Внутренние волны (ВВ) являются неотъемлемой частью динамики всех стратифицированных по плотности водоёмов. Их амплитуда может достигать сотен метров, но колебания водной поверхности обычно очень малы. Модулируя ветровую рябь своими орбитальными течениями, внутренние волны проявляются на морской поверхности в виде slickов — полос выглаженной ряби (в зонах дивергенции) и в виде сулоев — полос повышенной интенсивности ряби (в зонах конвергенции). Основная форма поверхностных проявлений внутренних волн (ППВВ) на спутниковых изображениях — это чередование почти конгруэнтных полос выглаженной и шероховатой морской поверхности. В океане и приливных морях основным механизмом генерации внутренних волн является взаимодействие приливных течений с неоднородностями дна или краем шельфа. Чёрное море может быть отнесено к бесприливным морям, так как колебание уровня воды в нём под действием приливов составляет не более 10 см. Соответственно, механизм генерации ВВ приливными течениями здесь исключён (Лаврова и др., 2008, 2011). Однако, как показали спутниковые наблюдения и натурные измерения, в Чёрном море регулярно возбуждаются внутренние волны. Основными районами их проявлений являются акватория вблизи крымского побережья и западный шельф Чёрного моря (Лаврова и др., 2015; Lavrova, Mityagina, 2017).

Как показали наши более чем десятилетние исследования (Лаврова и др., 2009; Lavrova, Mityagina, 2017), ППВВ в северо-восточной части Чёрного моря — явление достаточно редкое. За период наблюдений 2005–2016 гг. на спутниковых изображениях акватории Чёрного моря от Керченского пролива до Туапсе было выявлено всего 17 случаев таких проявлений, причём шесть из них приходилось на 2006 г. (рис. 1, см. с. 310). Увеличение числа ППВВ в 2006 г. было объяснено резким и неглубоким пикноклином, который сформировался, по данным измерений *in situ*, в начале июня 2006 г. (Лаврова и др., 2009).

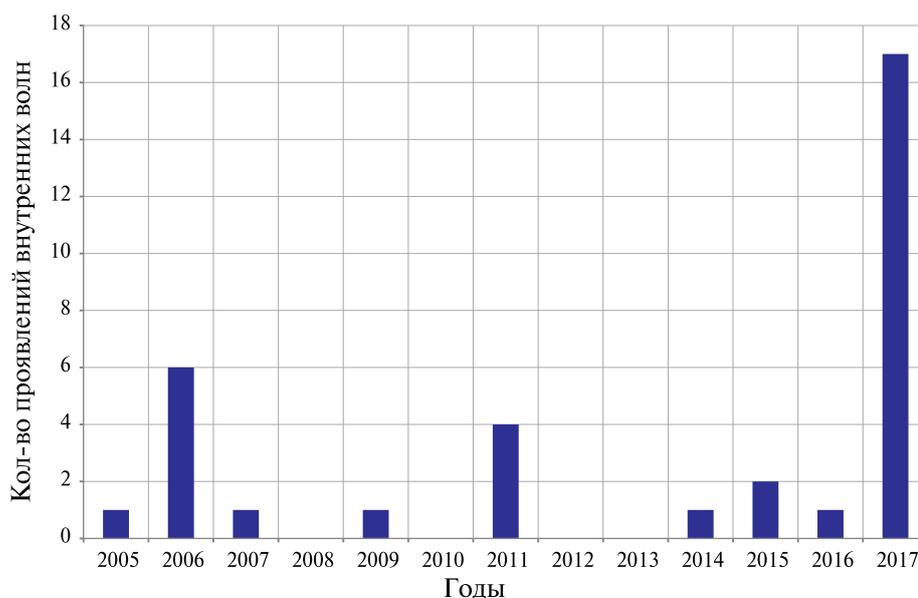


Рис. 1. Количество проявлений внутренних волн на спутниковых изображениях 2005–2017 гг. в северо-восточной части Чёрного моря

Анализ спутниковых изображений, полученных в летний период 2017 г., позволил выявить наличие аномально большого количества проявлений цугов внутренних волн в июле 2017 г. (см. рис. 1). Практически на каждом спутниковом изображении данной акватории, как радиолокационном, так и полученном в видимом диапазоне, идентифицированы либо одиночные цуги, либо целая система цугов внутренних волн. Оценить количество цугов из-за их многочисленности не представляется возможным, поэтому в 2017 г. учёт производился по количеству изображений, содержащих ППВВ. С 30 июня по 24 июля 2017 г. таких изображений оказалось 17 штук. Данная аномалия в количестве ППВВ может быть объяснена, так же как и в 2006 г., формированием резкого и мелкого слоя скачка в конце июня в результате резкого потепления после относительно продолжительной холодной погоды в июне.

На рис. 2 (см. с. 311) представлена карта-схема поверхностных проявлений внутренних волн на спутниковых изображениях в северо-восточной части Чёрного моря за 2005–2017 гг. Красными чёрточками отмечены ППВВ, выявленные в июле 2017 г. (даты не нанесены в целях лучшего восприятия рисунка). Всего было выявлено 17 случаев, 11 из них — юго-восточнее Керченского предпроливья над глубинами 100–200 м. В этом районе цуги распространялись преимущественно к берегу (рис. 3, см. с. 311) и были «привязаны» к неоднородностям дна. В других районах одиночные цуги распространялись преимущественно в восточном направлении параллельно берегу. Были оценены пространственные характеристики ВВ: максимальная длина волны в цуге составляла в среднем 250–300 м, протяжённость переднего фронта — от 6 до 20 км, число волн в цуге — от 5 до 15.

Наибольший интерес представляют изображения, полученные 13 июля 2017 г. С разницей в 17 мин была проведена съёмка одного и того же района приборами OLI/TIRS, установленными на ИСЗ Landsat-8, и прибором MSI, размещённым на ИСЗ Sentinel-2A, в 08:19:41 и 08:36:34 UTC соответственно. Фрагменты этих изображений представлены на рис. 4 (см. с. 312). В информационной системе See The Sea (Лупян и др., 2012, 2015) проведён совместный анализ данных за 13 июля. На рис. 5 (см. с. 313) представлен фрагмент изображения MSI Sentinel-2A с выделенными передними фронтами двух пересекающихся цугов ВВ. Красный соответствует более раннему моменту, синий — положение того же фронта через 17 мин. Были оценены скорости распространения различных цугов солитоноподобных волн, они составили от 0,35 до 0,42 м/с. Как показывали предыдущие исследования (Lavrova, Mityagina, 2017; Lavrova et al., 2014), фазовая скорость распространения ведущей волны в цуге оценивалась для данного района в среднем в 0,25 м/с.

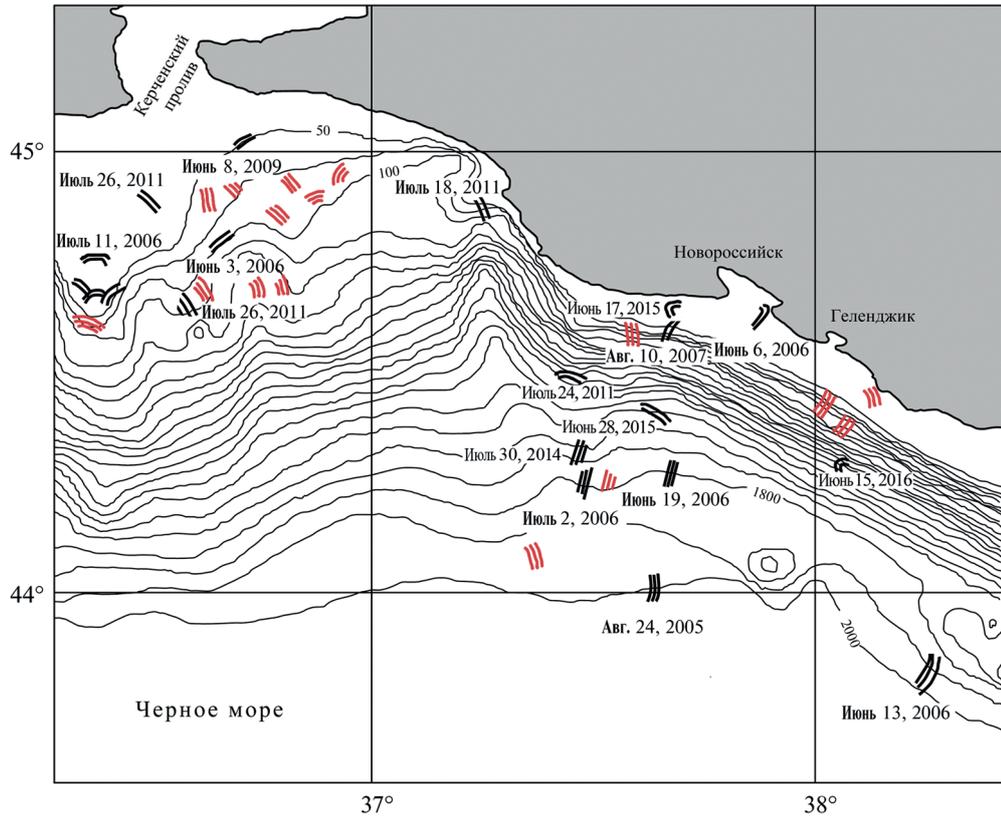


Рис. 2. Карта-схема проявлений внутренних волн на спутниковых изображениях в 2005–2017 гг. Красным отмечены проявления, выявленные в июле 2017 г.

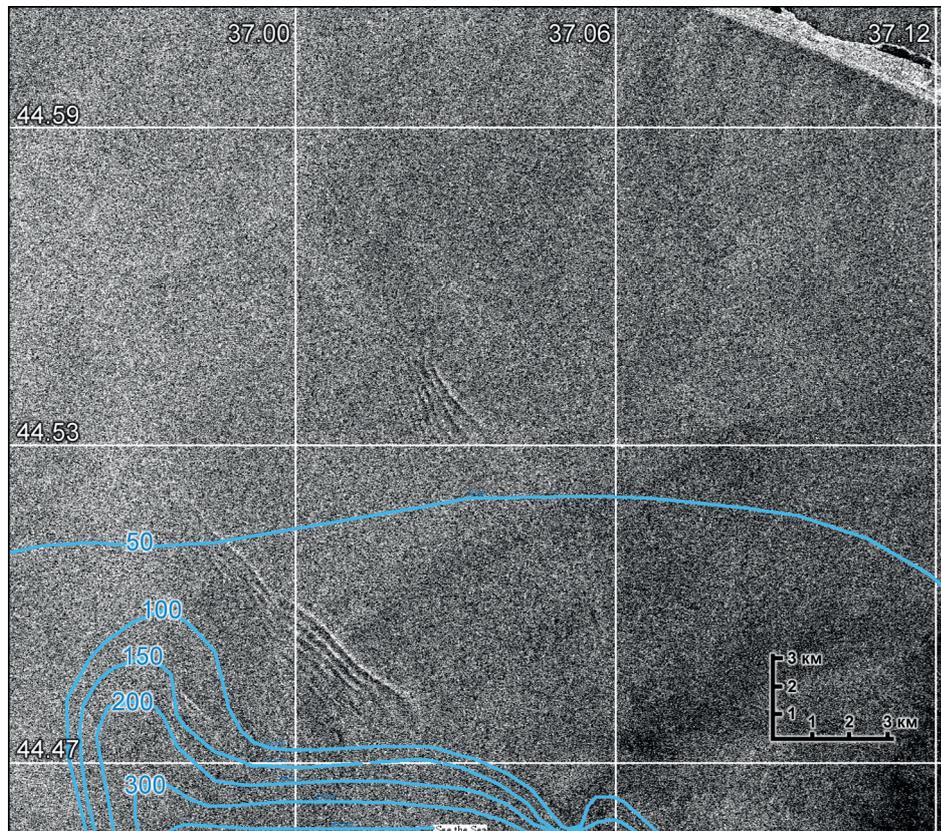
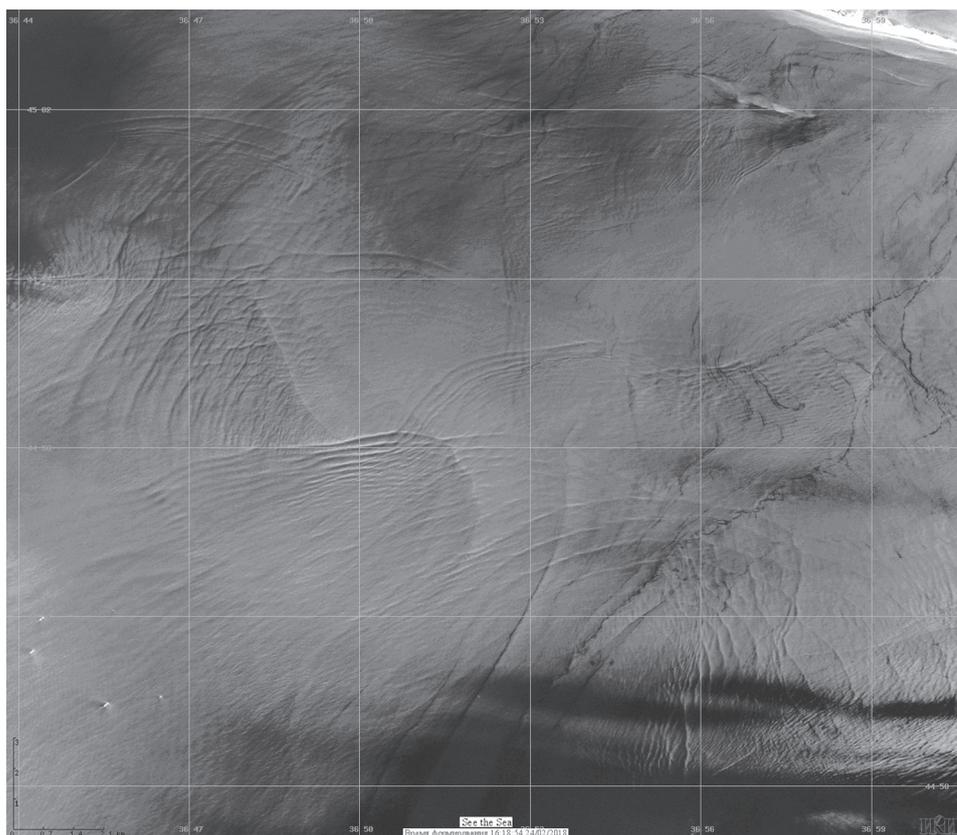
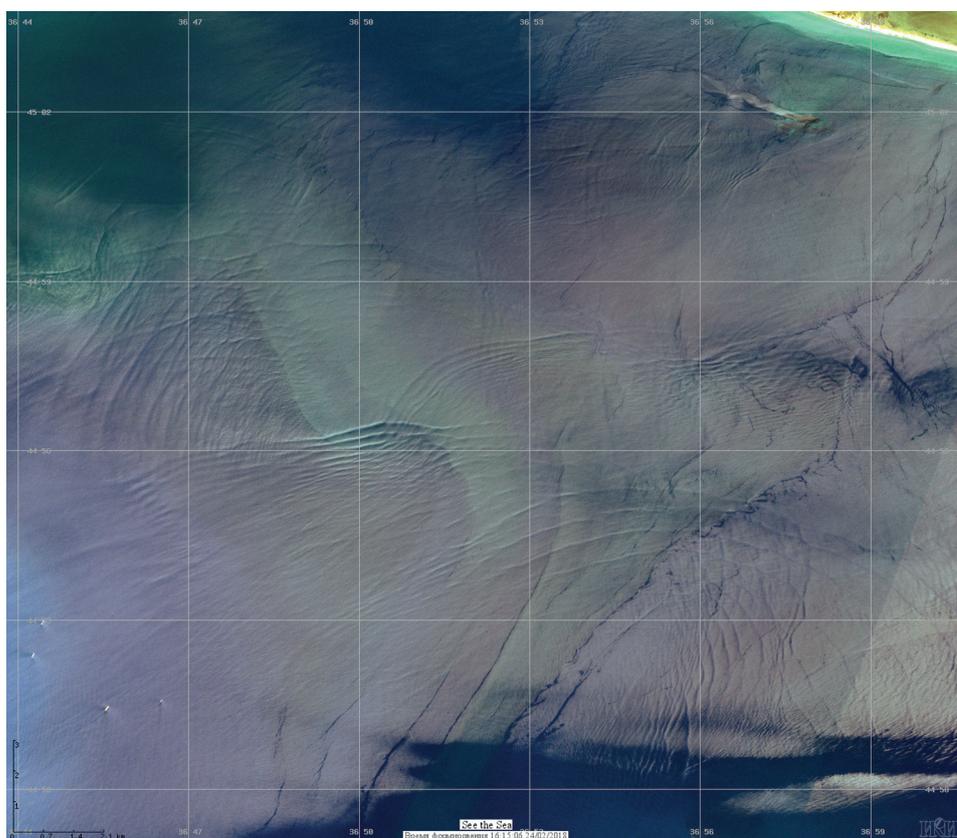


Рис. 3. Проявление двух цугов внутренних волн на радиолокационном изображении SAR-C Sentinel-1A, полученном 12 июля 2017 г. в 15:19 UTC



a



б

Рис. 4. Проявление многочисленных цугов внутренних волн на квазисинхронных спутниковых изображениях, полученных 13 июля 2017 г.: *a* — OLI Landsat-8 (8-й панхроматический канал), время съёмки 08:19:41 UTC; *б* — MSI Sentinel-2A (RGB — 4-й, 3-й, 2-й каналы), время съёмки 08:36:34 UTC

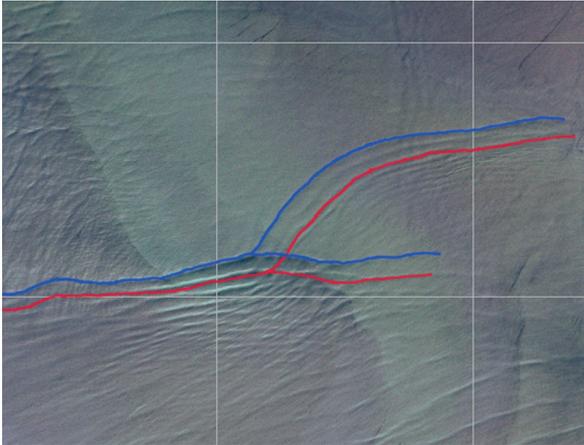


Рис. 5. Сдвиг передних фронтов двух цугов внутренних волн за 17 мин. Фрагмент изображения MSI Sentinel-2A от 13 июля 2017 г., представленного на рис. 4б. Красным отмечено положение фронтов, определённое по изображению OLI Landsat-8 (рис. 4а), синим — положение тех же фронтов через 17 мин, определённое по изображению MSI Sentinel-2A (рис. 4б)

исследований данных дистанционного зондирования из космоса высокого пространственного разрешения, получаемых над одним и тем же районом с небольшим интервалом между съёмками.

Основная задача, которую предстоит решить, — это определение механизмов генерации столь интенсивных и многочисленных внутренних волн, которые были зафиксированы в июле 2017 г.

Анализ спутниковых данных осуществлялся с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-мониторинг», в частности с помощью информационной системы See The Sea, развиваемой и поддерживаемой в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация No. 01.20.0.2.00164). Исследование пространственно-временных характеристик внутренних волн проводилось при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 14-17-00555.

Литература

1. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Сабинин К. Д. Возможные механизмы генерации внутренних волн в северо-восточной части Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 2. Вып. 5. С. 128–136.
2. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Сабинин К. Д. Проявление внутренних волн на морской поверхности в северо-восточной части Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2009. № 6. С. 49–55.
3. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Сабинин К. Д. Исследование особенностей генерации и распространения внутренних волн в бесприливных морях по данным спутниковой радиолокации // Доклады Академии наук. 2011. Т. 436. № 3. С. 407–411.
4. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Сабинин К. Д., Серебряный А. Н. Изучение гидродинамических процессов в шельфовой зоне на основе спутниковой информации и данных подспутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 98–129.
5. Луян Е. А., Матвеев А. А., Уваров И. А., Бочарова Т. Ю., Лаврова О. Ю., Митягина М. И. Спутниковый сервис See the Sea — инструмент для изучения процессов и явлений на поверхности океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 251–261.
6. Луян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий 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.
7. Lavrova O., Mityagina M. Satellite survey of internal waves in the Black and Caspian Seas // Remote Sensing. 2017. V. 9. Iss. 9. P. 892. DOI:10.3390/rs9090892.

8. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Serebryany A. N., Sabinin K. D., Kalashnikova N. A., Krayushkin E. V., Khymchenko Ie. E. Internal waves in the Black Sea: satellite observations and in-situ measurements // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions: Proc. SPIE. 2014. V. 9240. Id. 924016. DOI:10.1117/12.2067047.

Internal waves observed in satellite images of the northeastern Black Sea in July 2017

O. Yu. Lavrova

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

In July 2017, an unusually large number of internal waves was observed in the northeastern part of the Black Sea along the Kerch Strait — the city of Tuapse coastline. The comparison was made with the same month of 2005–2016. The phenomenon was most probably associated with the formation of a sharp and shallow pycnocline by the end of June as the result of fast warming after a rather long period of cool weather in the beginning of the summer. The density gradient of such type is known to facilitate manifestation of internal waves at the sea surface. Satellite data of Sentinel-1 SAR-C, Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI instruments were examined. Spatial parameters of the observed trains of internal waves were estimated. The propagation velocities of the leading waves in the trains were determined from Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI visible images obtained 13 July, 2017, with time difference of 17 min. Today, it has become possible to retrieve not only spatial, but also dynamic characteristics of internal waves from satellite data due to high resolution of the available data and frequent surveys of the same area.

Keywords: internal waves, radar images, visible satellite data, Sentinel-1 SAR-C, Sentinel-2A MSI, Landsat-8 OLI, Black Sea

Accepted: 20.02.2018

DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-309-315

References

1. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Sabinin K. D., Vozmozhnye mekhanizmy generatsii vnutrennikh voln v severo-vostochnoi chasti Chernogo morya (Possible mechanisms for generating internal waves in the northeastern part of the Black Sea), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 2, Issue 5, pp. 128–136.
2. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Sabinin K. D., Proyavlenie vnutrennikh voln na morskoi poverkhnosti v severo-vostochnoi chasti Chernogo morya (Manifestations of internal waves on the sea surface in North-Eastern part of the Black Sea), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 6, pp. 49–55.
3. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Sabinin K. D., Study of internal wave generation and propagation features in non-tidal seas based on satellite synthetic aperture radar data, *Doklady Earth Sciences*, 2011, Vol. 436 (1), pp. 165–169.
4. Lavrova O. Y., Mityagina M. I., Sabinin K. D., Serebryany A. N., Izuchenie gidrodinamicheskikh protsessov v shel'fovoi zone na osnove sputnikovoi informatsii i dannykh podsputnikovykh izmerenii (Study of hydrodynamic processes in the shelf zone based on satellite data and subsatellite measurements), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 98–129.
5. Loupian E. A., Matveev A. A., Uvarov I. A., Bocharova T. Yu., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Sputnikovyi servis See the Sea — instrument dlya izucheniya protsessov i yavlenii na poverkhnosti okeana (Satellite service See the Sea — a tool for instigation of processes and phenomena at the sea surface), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 251–261.

6. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovyykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284.
7. Lavrova O., Mityagina M., Satellite survey of internal waves in the Black and Caspian Seas, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, Issue 9, p. 892, DOI:10.3390/rs9090892.
8. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Serebryany A. N., Sabinin K. D., Kalashnikova N. A., Krayushkin E. V., Khymchenko Ie. E., Internal waves in the Black Sea: satellite observations and in-situ measurements, *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*, Proc. SPIE, 2014, Vol. 9240, id. 924016, DOI:10.1117/12.2067047.