

УДК 551.466.8

ГЕНЕРАЦИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН СУБМЕЗОМАСШТАБНЫМ ВИХРЕМ У МЫСА СВЯТОЙ НОС В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ

© 2023 г. А. Н. Серебряный^{a,b,*}, Е. Е. Химченко^{a,b}, В. В. Замшин^b

Представлено академиком РАН В.Г. Бондуrom 11.07.2022 г.

Поступило 11.07.2022 г.

После доработки 16.09.2022 г.

Принято к публикации 23.09.2022 г.

Приводятся данные о генерации солитоноподобных внутренних волн мезомасштабным вихрем в широко известном своей динамической активностью районе Баренцева моря – акватории мыса Святой Нос. Результаты основаны на анализе спутниковых оптических (Sentinel-2 MSI) и радиолокационных (Sentinel-1 SAR) изображений, полученных последовательно 8 и 9 августа 2021 г. Детальный анализ динамики вихря и внутренних волн оказался возможным благодаря, в том числе, цветению фитопланктона, которое создало необходимые оптические контрасты, позволяющие следить за динамикой течений в приповерхностном слое моря. Значимые параметры зарегистрированных внутренних волн измерены спутниковыми методами и проанализированы с использованием модели ТРХО9.0 и численного решения уравнения внутренних волн. Показано, что генерация внутренних волн была вызвана образованным у мыса субмезомасштабным вихрем. Волны имеют относительно низкие скорости распространения (0.10–0.16 м/с), что обусловлено слабой стратификацией водной среды.

Ключевые слова: внутренние волны, Баренцево море, солитоны, кокколитофориды, спутниковые изображения, многоспектральная съемка, радиолокационная съемка

DOI: 10.31857/S2686739722601430, **EDN:** GALQWD

ВВЕДЕНИЕ

В середине лета–начале осени (июле–сентябре) в последнее десятилетие в Баренцевом море происходит резкое возрастание показателя рассеяния света назад взвешенными частицами, что объясняется активным цветением кокколитофорид [1–3]. Этот фитопланктон увеличивает мутность морской воды, окрашивая ее в серые тона. Благодаря этому эффекту на спутниковых оптических многоспектральных изображениях становятся отчетливо видны различные проявления приповерхностной динамики моря – шлейфы течений, вихреобразные структуры, фронты и внутренние волны [4, 5]. Наше внимание было привлечено к оптическим изображениям одного из самых динамически активных районов Баренцева моря – акватории м. Святой Нос. Этот район известен с давних времен так называемым святоносским сулоем, представляющим опасность мо-

реплователям из-за своей интенсивности и частоты повторения. В этом месте полуостров Святой Нос далеко вдается вглубь акватории, разделяя более теплые воды Баренцева моря с холодными водами Белого моря. На границе этих водных масс, подгоняемых приливно-отливными течениями, происходит образование сулоя – поверхностного волнения в виде хаотичной толчи с высотами в несколько метров. В данной работе мы концентрируем свое внимание на еще одном представляющем интерес динамически активном явлении – генерации интенсивных внутренних волн на шельфе, которая как будет показано, тоже имеет место в этом районе.

ВИХРЕОБРАЗНЫЕ СТРУКТУРЫ У МЫСА

В ходе исследования анализировался временной ряд спутниковых изображений района интереса, полученных с космических аппаратов Sentinel-2 и Landsat-8 на протяжении всего периода цветения кокколитофорид в 2021 г. (июль–сентябрь). Анализ осуществлялся с целью обнаружения и исследования особенностей поверхностных проявлений внутренних волн. В результате анализа изображений, полученных 8 и 9 августа со спутника Sentinel-2, были выявлены высоко-

^aИнститут океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва, Россия

^bНаучно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва, Россия

*E-mail: serebryany@hotmail.com

контрастные проявления внутренних волн, расположенные вблизи вихря. В другие даты анализируемого временного интервала не наблюдалось интенсивных поверхностных проявлений внутренних волн.

Как видно на изображении от 8 августа (рис. 1), к северу от м. Святой Нос образован вихревой кластер, в состав которого входили два грибовидных вихря, заворачивающие своими западными границами по часовой стрелке, и в целом обозначающие перенос воды течениями в прибрежную зону из более глубоких районов моря. Обращает на себя внимание более мелкий по масштабам (субмезомасштабный) антициклонический вихрь, расположенный на расстоянии около 3 км к северу от оконечности мыса, образованный течением северо-западного направления с западной стороны мыса. Подворот течения по часовой стрелке севернее мыса указывает на антициклонический характер вихря. Этот вихрь сохранялся и на следующие сутки, что хорошо видно на спутниковом изображении, полученном 9 августа (рис. 1). Сердцевина вихря характеризуется относительно малыми значениями спектральной отражательной способности, что свидетельствует о присутствии свободной от микроводорослей воды в центре вихря. Сравнение одновременных изображений вихря (рис. 1) явно показывает, что размер центральной части вихря и его оптический контраст уменьшаются. Последнее подтверждает действие антициклонического механизма по увеличению концентрации поверхностных более теплых вод в центральной части вихря.

ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ СУБМЕЗОМАСШТАБНЫМ ВИХРЕМ

Обнаруженные интенсивные поверхностные проявления внутренних волн были детально исследованы, для чего были дополнительно привлечены результаты спутниковой радиолокационной съемки. В ходе обработки спутниковых изображений, полученных как в оптическом (Sentinel-2 MSI, 8 и 9 августа), так и в радиолокационном (Sentinel-1 SAR, 9 августа) диапазонах спектра электромагнитных волн, выполнялось определение местоположения и геометрических параметров поверхностных проявлений гребней внутренних волн [4, 8]. Результаты обработки спутниковых изображений приведены на рис. 2. Ниже будет показано, что все обстоятельства указывают на то, что рассматриваемые внутренние волны генерируются вихрем, находившемся у м. Святой Нос.

Анализ рис. 2 показывает, что основная часть цугов внутренних волн распространяется на запад, юго-запад от м. Святой Нос. Фронты внутренних волн имеют выпуклую дугообразную форму, что подчеркивает юго-западную направлен-

ность их движения и связь с находящимся у оконечности мыса субмезомасштабным вихрем.

Цуги внутренних волн условно обозначены цветами: желтый, синий, оранжевый, зеленый (рис. 2). Насчитывается 6 цугов на многоспектральном изображении от 8 августа (рис. 2 б, г) и 3 цуга на многоспектральном изображении от 9 августа (рис. 2 а). Спутниковое радиолокационное изображение от 9 августа (рис. 2 в) позволяет выделить цуг внутренних волн, движущийся в другом направлении – на восток (рис. 2 д). Фронты волн этого цуга (в отличие от других цугов) находятся на значительном расстоянии друг от друга, что говорит о большей длине волн. Это отличие объясняется тем, что волны этого цуга сгенерированы в фазе прилива (дата и время съемки – 9 августа, 3:57 UTC) и вместе с приливным и вдольбереговым течением движутся на восток. Как следствие, длина волн на попутном течении увеличивается. Обращает на себя внимание цуг, расположенный к югу от вихря, ориентация фронтов в котором указывает на южное распространение волн (рис. 2 г). Этот цуг находится уже в более мелководном районе акватории (в Святоносском заливе) и, по всей вероятности, испытывает рефракцию, на что указывает береговая направленность цуга.

ПРИВЯЗКА ЦУГОВ ВОЛН К ФАЗЕ ОТЛИВА БАРОТРОПНОГО ПРИЛИВА

Спутниковые оптические изображения были получены 8 августа 2021 г. в 09: 11: 16 UTC и 9 августа 2021 г. в 09: 31: 12 UTC. В глобальной модели приливов TRXO9.0 [10] был проведен расчет прилива для точки, расположенной на расстоянии ~3 км от м. Святой Нос. Приблизительно на этом расстоянии от полуострова Святой Нос начинается район, в котором регистрировались поверхностные проявления внутренних волн, распространяющихся в юго-западном направлении. 8 августа максимум баротропного прилива наблюдался в 6 ч UTC и составлял 1.62 м, а минимум составил –1.60 м около 13 ч UTC. На следующий день 9 августа максимум был 1.77 м в 7 ч UTC, а минимум – 1.80 м в 13 ч UTC. Исходя из этой информации, цуги внутренних волн, зарегистрированные на спутниковых оптических изображениях, оказались привязаны к фазе отлива. Подобная интенсификация короткопериодных внутренних волн во время отлива отмечалась в наблюдениях в других морях, в частности в Японском море, а также неоднократно в Баренцевом море [10, 11]. Цуг внутренних волн, выявленных по радиолокационному изображению, как уже указывалось выше, относится к фазе прилива.

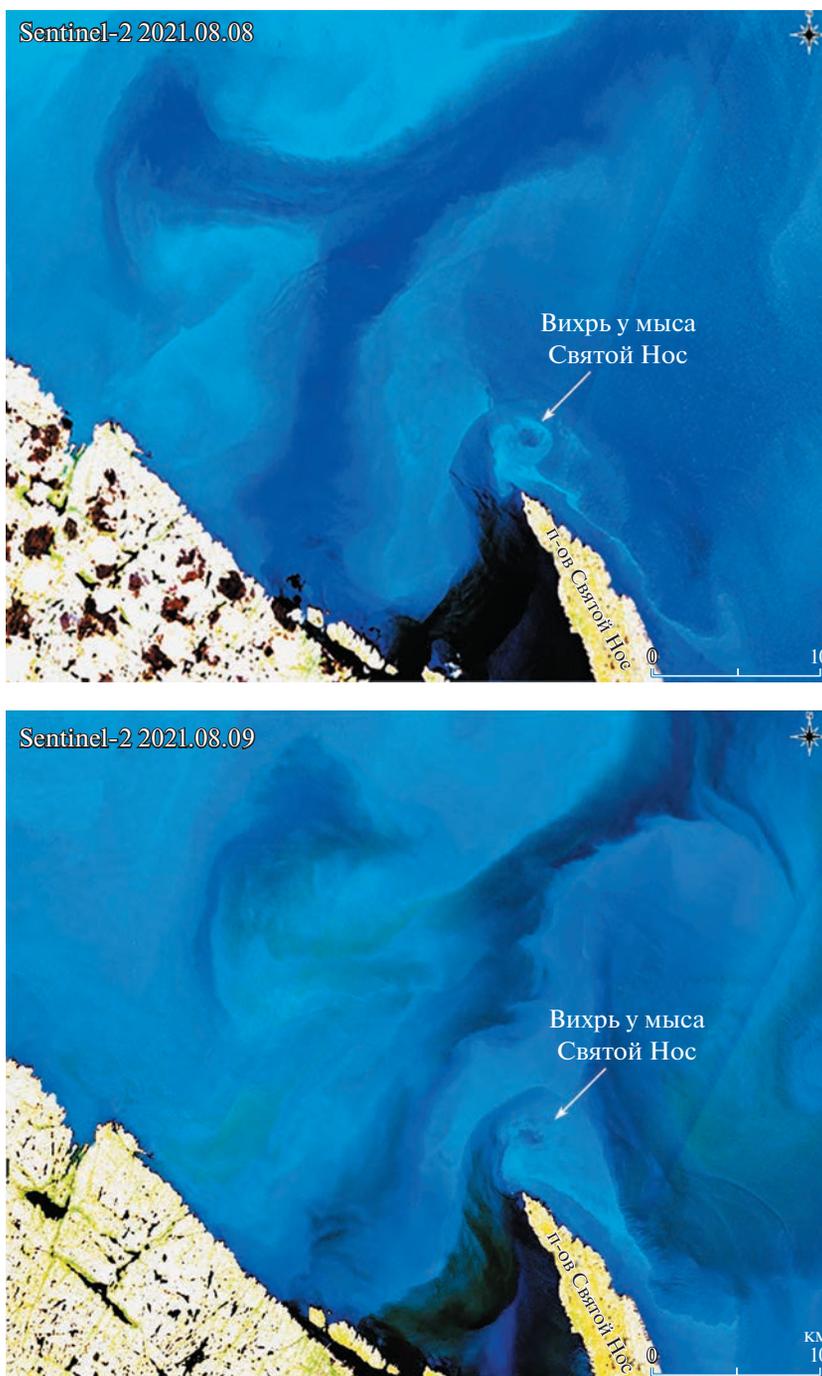


Рис. 1. Спутниковые оптические многоспектральные изображения акваторий вблизи м. Святой Нос, полученные со спутника Sentinel-2 08 августа 2021 г. (сверху) и 09 августа 2021 г. (снизу), иллюстрирующие мезомасштабные вихревые структуры.

РАСЧЕТ ДИСПЕРСИОННЫХ КРИВЫХ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВНУТРЕННИХ ВОЛН

Расчет дисперсионных кривых велся по программе В.В. Гончарова [12], в которой численно решается уравнение внутренних волн (краевая задача Штурма-Лиувилля)

$$\frac{d^2 w}{dz^2} + \frac{N^2 - \omega^2}{\omega^2 - f^2} k_h^2 w = 0$$

с граничными условиями $w(0) = 0$, $w(h) = 0$, где w – амплитуда вертикальной скорости, k_h – горизонтальный волновой вектор, N – частота плавучести, f – инерционная частота, ω – текущая частота, h – глубина моря, w и N зависят от z .

небольшим скоростям их распространения. Если принять в рассмотрение большие величины существующих там приливов, то становится ясно, что внутренние волны часто испытывают блокировку и другие эффекты рефракции на фоновых течениях, что было показано в [9]. В последние годы стало больше информации о внутренних волнах Баренцева моря в основном за счет публикаций, использующих данные спутникового дистанционного зондирования [13, 14]. Благодаря близкому положению термоклина к поверхности моря в летний период внутренние волны хорошо проявляются на спутниковых снимках, что дает возможность собирать большую статистику о длине волн и их фронтов, количестве волн в цугах и направлении их распространения [7, 8]. Надежные данные о периодах внутренних волн и их амплитудах можно получить лишь контактными методами. Продолжительные измерения, проведенные в прибрежной зоне Баренцева моря с помощью непрерывных STD – зондирований [14] выявили средний период волн в цугах – 15 мин, среднее число волн в цуге – 4, а диапазон амплитуд волн – в пределах 1–8 м. Сопоставляя длины наблюдаемых нами внутренних волн цугов у м. Святой Нос, с измеренными ранее длинами волн в прибрежной зоне этого региона, можно сделать вывод, что они близки к среднестатистическим параметрам внутренних волн Баренцева моря 1-й моды. То же самое можно сказать о периодах этих внутренних волн. Особенностью этих волн оказываются малые скорости движения цугов, что объясняется тем, что они распространяются в условиях слабой стратификации и на встречном (отливном) течении. Что касается амплитуд интенсивных внутренних волн у м. Святой Нос, изученных в настоящей работе, то, в отсутствие данных контактных измерений, принимая во внимание большие оптические контрасты (рис. 1), можно предполагать, что они достигают величин порядка 10–12 м (это значения максимальных высот, наблюдавшихся в Баренцевом море).

Происхождение цугов внутренних волн в Баренцевом море обычно связывают с взаимодействием баротропного прилива с особенностями рельефа дна – механизмом, широко распространенным на шельфах Мирового океана. Менее распространенный механизм генерации цугов внутренних волн, но также заслуживающий внимания, связан с воздействием вихрей. Впервые было обращено внимание на близкое расположение цугов внутренних волн и субмезомасштабных вихрей при анализе комических снимков Черного моря [15]. Позднее в измерениях на геленджикском шельфе Черного моря [16] был зарегистрирован выход на шельф прибрежного антициклонического вихря с генерацией пакета интенсивных внутренних волн, движущихся на берег. Недавно опубли-

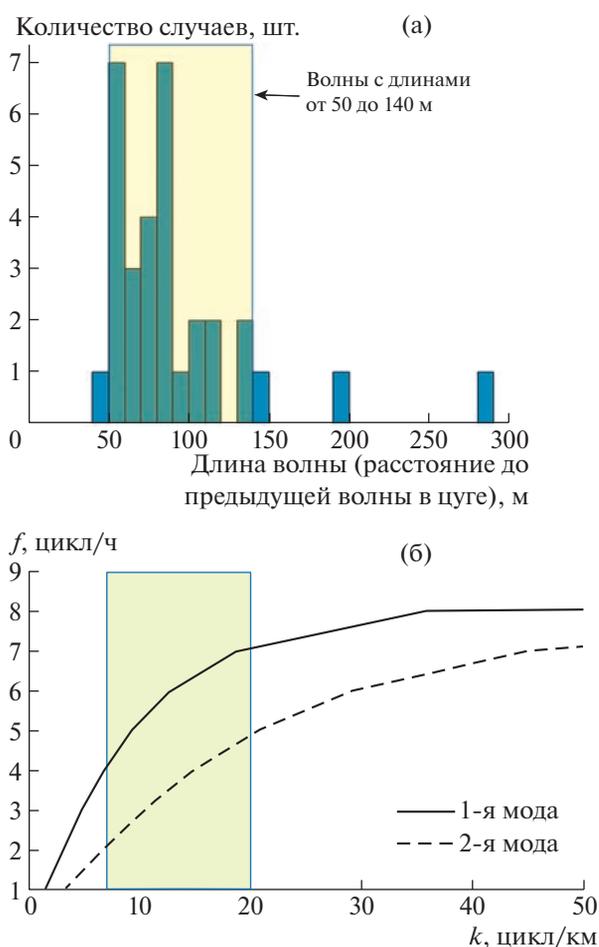


Рис. 3. а – гистограмма длин внутренних волн, измеренных по спутниковым данным; б – дисперсионные кривые для внутренних волн 1-й и 2-й моды; рамками показаны соответствующие диапазоны пространственных периодов, определенных по спутниковым изображениям.

кована работа о наблюдении генерации внутренних волн антициклоническим вихрем в Гренландском море [17]. В научной литературе есть теоретические работы, предсказывающие вихри как источник генерации внутренних волн в море [18, 19], но доказательства этого в натурных наблюдениях чрезвычайно редки и ограничиваются вышеприведенными ссылками. В этом смысле приводимые в настоящей статье данные о пакетах интенсивных внутренних волн, исходящих от мезомасштабного антициклонического вихря у м. Святой Нос, заслуживают пристального внимания.

В последнее время генерация внутренних волн вихрями рассматривается как один из возможных реальных механизмов генерации внутренних волн в море. Сообщения об этом в морях с приливами единичны, при этом для бесприливного Черного моря подобное наблюдалось чаще, но

ненамного. Замкнутое Черное море практически лишено приливов и это позволяет видеть другие, кроме приливного, возможные механизмы генерации внутренних волн. В работе [20] высказывалось предположение, что эти внутренние волны имеют фронтальный механизм генерации, когда волны излучаются нестационарным фронтом (движущимся и/или подверженным инерционным колебаниям), связанным с прохождением вихря. По аналогии мы можем предположить, что в нашем случае внутренние волны сгенерированы нестационарным фронтом, подверженным приливо-отливным движениям, связанным с прохождением вихря.

Таким образом, с помощью данных дистанционного зондирования в Баренцевом море севернее м. Святой Нос был обнаружен антициклонический субмезомасштабный вихрь, излучающий пакеты интенсивных короткопериодных внутренних волн. Анализ данных показал, что в основном цуги волн генерируются в фазе отлива и двигаются на запад, юго-запад на встречном течении. Менее интенсивная генерация происходит в фазе прилива — здесь волны движутся на восток и имеют большие длины. Волны в пакетах относятся к 1-й моде и достаточно интенсивны, имеют поверхностные проявления, регистрируемые спутниковыми оптическими и радиолокационными методами. В целом акватория у м. Святой Нос подтверждает свою репутацию динамически активного региона, где существует не только поверхностный сулой, но и интенсивные внутренние волны.

БЛАГОДАРНОСТИ

Спутниковые данные Sentinel-1/2 были получены из архивов системы Европейских центров морских прогнозов Copernicus Open Access Hub (<https://sci-hub.copernicus.eu>).

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке государственного задания по теме № FMWE-2021-0010, а также по теме FNEE-2022-0006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буренков В.И., Копелевич О.В., Ратькова Т.Н., Шибрстов С.В. Спутниковые наблюдения цветения кокколитофорид в Баренцевом море // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 5. С. 818–826.
2. Паутова Л.А., Силкин В.А., Кравчишина М.Д., Чульцова А.Л., Лисицын А.П. Карбонатный биологический насос в Норвежском и Баренцевом морях: механизмы регуляции // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2020. Т. 490. № 1. С. 55–60. <https://doi.org/10.31857/S2686739720010077>
3. Pugach S.P., Pipko I.I., Shakhova N.E., Shirshin E.A., Perminova I.V., Gustafsson O., Bondur V.G., Ruban A.S., Semiletov I.P. Dissolved organic matter and its optical characteristics in the Laptev and East Siberian seas: spatial distribution and interannual variability (2003–2011) // *Ocean Science*. 2018. V. 14. No 1. P. 87–103. <https://doi.org/10.5194/os-14-87-2018>
4. Bondur V.G. Satellite monitoring and mathematical modelling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // *Waste Water – Evaluation and Management*, 2011. ISBN978-953-307-233-3. P. 155–180. <https://doi.org/10.5772/16134>. <http://www.intechopen.com/articles/show/title/satellite-monitoring-and-mathematical-modelling-of-deep-runoff-turbulent-jets-in-coastal-water-areas>.
5. Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д., Серебряный А.Н. Исследования полей течений и загрязнений прибрежных вод на Геленджикском шельфе Черного моря с использованием космических данных // *Исследование Земли из космоса*. 2012. № 4. С. 3–11.
6. Бондур В.Г., Серебряный А.Н., Замшин В.В., Тарасов Л.Л., Химченко Е.Е. Интенсивные внутренние волны аномальных высот на шельфе Черного моря // *Изв. РАН. ФАО*. 2019. Т. 55. № 1. С. 114–127. <https://doi.org/10.31857/S0002-3515551114-127>
7. Egbert G.D., Erofeeva S.Y. Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2002. V. 19. № 2. P. 183–204. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<0183:EIMOVO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOVO>2.0.CO;2)
8. Белов А.И., Журавлев В.А., Серебряный А.Н. Особенности вариаций звукового поля, вызванных интенсивными внутренними волнами в мелком море со слабым термоклином // *Акустический журнал*. 2006. Т. 52. № 2. С. 165–171.
9. Серебряный А.Н. Внутренние волны в прибрежной зоне Баренцева моря // *Поверхностные и внутренние волны в арктических морях* (под ред. И.В. Лавренова и Е.Г. Морозова). СПб: Гидрометеиздат, 2002. С. 298–309.
10. Гончаров В.В., Лейкин И.А. Волны на течении со сдвигом скорости // *Океанология*. 1983. Т. 23. № 2. С. 210.
11. Carnes M.R. Description and Evaluation of GDEM-V3.0 // *Mississippi: Naval Research Laboratory*. 2009. P. 24. <https://doi.org/10.2172/966897>
12. Зубов Н.Н. Гидрологические работы Морского научного института в юго-западной части Баренцева моря летом 1928 г. на э/с “Персей” // *Тр. ГОИН*. 1932. Т. 2. № 4. С. 3–80.
13. Свергун Е.И., Зимин А.В. Оценка повторяемости интенсивных внутренних волн в Белом и Баренцевом морях по данным экспедиционных исследований // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2017. Т. 10. № 2. С. 13–19. <https://doi.org/10.7868/S2073667317020022>
14. Свергун Е.И., Зимин А.В., Атаджанова О.А., Жегулин Г.В., Романенков Д.А., Коник А.А., Козлов И.Е. Короткопериодные внутренние волны в прибрежной зоне Баренцева моря по данным контактных и

- спутниковых наблюдений // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020. Т. 13. № 4. С. 78–86.
<https://doi.org/10.7868/S2073667320040073>
15. Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Вихревые структуры и волновые процессы в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря, выявленные в ходе спутникового мониторинга // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2008. Т. 5. № 2. С. 155–164.
 16. Серебряный А.Н. Десять лет исследований внутренних волн и вихрей на геленджикском шельфе с использованием ADCP // *Сборник тезисов Десятой всероссийской открытой конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”*. Москва: ИКИ РАН, 2012. С. 298.
 17. Johannessen O.M., Sandven S., Chunchuzov I.P., Shuchman R.A. Observations of internal waves generated by an anticyclonic eddy: a case study in the ice edge region of the Greenland Sea // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2019. V. 71. № 1. P. 1652881.
<https://doi.org/10.1080/16000870.2019.1652881>
 18. Dohan K., Sutherland B.R. Numerical and laboratory generation of internal waves from turbulence // *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 2005. V. 40. № 1. P. 43–56.
<https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2004.10.004>
 19. Plougonven R., Zeitlin V. Internal gravity wave emission from a pancake vortex: An example of wave–vortex interaction in strongly stratified flows // *Physics of Fluids*. 2002. V. 14. № 3. P. 1259–1268.
<https://doi.org/10.1063/1.1448297>
 20. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Сабинин К.Д. Возможные механизмы генерации внутренних волн в северо-восточной части Черного моря // *Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса*. 2008. Т. 5. № 2. С. 128–136.

GENERATION OF INTERNAL WAVES BY A SUB-MESOSCALE EDDY AT CAPE SVYATOY NOS IN THE BARENTS SEA

A. N. Serebryany^{a,b,#}, E. E. Khimchenko^{a,b}, and V. V. Zamshin^b

^a*Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b*AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: serebryany@hotmail.com*

Presented by Academician of the RAS V.G. Bondur July 11, 2022

Data on generation of soliton-like internal waves by a mesoscale eddy in the region of the Barents Sea near Cape Svyatoy Nos, widely known for its dynamic activity, are presented here. The results are based on the analysis of satellite optical (Sentinel-2 MSI) and radar (Sentinel-1 SAR) images obtained sequentially on August 8 and 9, 2021. A detailed analysis of the dynamics of the eddy and internal waves was made possible due, among other things, to the phytoplankton bloom, which created the necessary optical contrasts that make it possible to monitor the dynamics of currents in the near-surface layer of the sea. Significant parameters of recorded internal waves were measured using satellite methods and analyzed using the TPXO9.0 model and numerical solution of the internal wave equation. It has been shown, that internal waves were caused by a submesoscale eddy formed near the cape. Waves had quite low velocity (0.10–0.16 m/s) what was due to weak stratification of the water environment.

Keywords: internal waves, Barents Sea, solitons, Coccolithophorida, satellite imagery, multispectral imaging, radar imaging