

УДК 551.465

О ВЛИЯНИИ КВАЗИГЕОСТРОФИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ И ИНЕРЦИОННЫХ ВОЛН НА ВЫМЫВАНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ОСАДКОВ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКЕ

© 2016 г. М. Н. Голенко, Н. Н. Голенко, Е. М. Емельянов, М. А. Некрасов

*Атлантическое отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Калининград**e-mail: m.golenko@yahoo.com*

Поступила в редакцию 20.10.2014 г.

После доработки 03.02.2015 г.

Проведено гидродинамическое моделирование для района Юго-Восточной Балтики с целью сопоставить скорости течений с имеющимися для этого района данными донных отложений. Моделирование проводилось на основе Принстонской модели океана (РОМ). Особое внимание уделено исследованию влияния западного и северо-восточного ветров, которые в исследуемом районе вызывают интенсивные геострофические струйные течения, и в придонном слое могут вызвать течения столь высоких скоростей, что происходит взмучивание донных осадков и перенос взвешенных мелкодисперсных их фракций. При резком изменении ветра эффект взмучивания может существенно усиливаться за счет возникновения инерционных волн, проникающих в придонный слой вод. Пространственные распределения скорости течений на поверхности моря и в придонном слое сравнивались с картами донных осадков. Оказалось, что характерные участки с наиболее высокими скоростями течений, вызванных ветрами западного и северо-восточного направлений, во многих случаях совпадают с областями, в которых донные отложения представлены крупнозернистыми их типами – гравием и песками.

DOI: 10.7868/S0030157416020076

1. ВВЕДЕНИЕ

Донные осадки в море подразделяются на различные гранулометрические типы – от тончайших пелитовых илов (с преобладанием частиц размером от <0.001 до 0.01 мм в диаметре) до крупнозернистых песков и гравийных отложений (размер зерен – от 1 мм до нескольких см). Известно, что донные осадки в море подвергаются эрозии, при этом часто происходит вымывание из осадков тонких фракций и их перемещение из одной области в другую. Прежде всего, эрозии подвержены тонкодисперсные осадки, вес и размеры частиц которых относительно малы, и именно поэтому они могут отрываться от дна и двигаться под воздействием сравнительно малых течений в придонном слое моря. Зависимость размера частиц в осадках и скорости течений, которые вызывают а) отрыв частицы от дна (эрозия) и б) сохранение частицы во взвешенном состоянии, по-видимому, впервые была выявлена Хьюльстремом [9] по измерениям в лотке. Для осадков в реках и морях такая зависимость может несколько меняться [4]. В реальном море структуру доминирующих типов осадков естественно связать со структурой придонных течений и величиной их скорости. Такое сопоставление пространственных особенностей гранулометрических типов

донных фракций и скоростей течений для юго-восточной части Балтийского моря проводится в настоящей работе. Исследуемый район прилегает к побережью Калининградской области (Россия), Польши и Литвы. Ранее именно для этого района Е.М. Емельяновым с соавторами были получены достаточно детальные данные о структуре донных осадков [6]. Наряду с этим, для рассматриваемого района на основе численного моделирования ранее рассчитывались поля течений (геострофических и дрейфовых) и были получены отдельные результаты, главным образом, касающиеся верхнего слоя моря, согласующиеся с данными натурных наблюдений [1–3].

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПИСАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МОДЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПРИДОННЫХ ТЕЧЕНИЙ В РАССМАТРИВАЕМОМ РАЙОНЕ

В ходе исследования выполнен анализ данных о скорости течений в Юго-Восточной Балтике, полученных при моделировании на основе РОМ [5, 10]. Модель является трехмерной, нелинейной, в ней используется гидростатическое при-

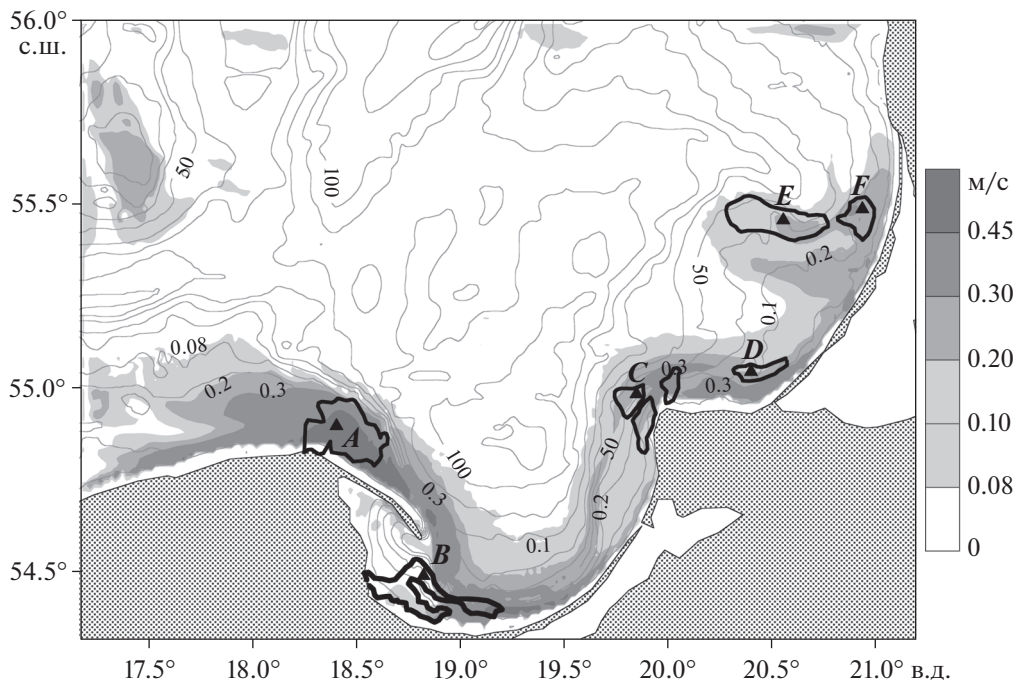


Рис. 1. Пространственное распределение абсолютных значений скорости течений на поверхности моря спустя 2 сут модельных расчетов при воздействии западного ветра, постепенно нарастающего от 0 до 12 м/с в течение 20 ч. Жирными черными линиями обозначены границы областей грубых осадков — песка и гравия. Эти области, а также точки, в которых анализировалась вертикальная структура модельной горизонтальной скорости течения, обозначены буквами *A, B, C, D, E, F*. Серыми линиями обозначены изобаты с интервалом 10 м.

ближение. Для расчета коэффициентов вертикального обмена импульсом, теплом и солью в РОМ встроена подмодель турбулентности с замыканием второго порядка типа Меллора—Ямады [11]. Придонный погранслои описывается стандартной логарифмической зависимостью [14]. Силовое воздействие осуществлялось за счет напряжения ветра разных направлений. Модель охватывала Юго-Восточную Балтику (рис. 1), горизонтальное разрешение составляло ~ 0.8 км вдоль направлений X и Y . Для этой версии модели был специально подготовлен массив рельефа дна, описывающий неоднородности с масштабом ~ 1 км. По вертикали было задано 36 σ -слоев. На частично открытых боковых границах области моделирования было задано условие излучения [10]. Начальная стратификация по температуре и солёности была взята однородной по горизонтали. Рассматривались различные типы вертикальной стратификации: летней тип, для которого характерен достаточно обширный термоклин в диапазоне 5–35 м, промежуточный (осенний) тип с термоклином в диапазоне ~ 25 –35 м и зимний, для которого характерен однородный (верхний) слой до глубины ~ 65 м. Во всех случаях вертикальная структура поля солёности была почти однородной до ~ 60 –70 м, а глубже начинался халоклин.

Используемая в настоящей работе версия модели ранее уже применялась для исследования различных составляющих течений в Балтике: геострофических, агеострофических, а также волновых составляющих течений, связанных с квазиинерционными внутренними волнами. В отдельной точке Д-6 (“Кравцовское” нефтяное месторождение), где проводились регулярные измерения скорости течения при помощи ADCP, были получены близкие к реальности модельные данные скорости течений практически во всей водной толще [1].

Моделирование проводилось при ветровом воздействии, нарастающем в течение 20 ч от 0 до 12 м/с, что соответствует силе трения на поверхность моря ~ 0.2 Н/м². Рассматривались течения, вызванные западным, северо-восточным, северо-западным и юго-восточным ветрами. Западные и северо-восточные ветры для рассматриваемого рельефа и береговой линии (рис. 1), дают наиболее интенсивные квазигеострофические течения с несколько разными пространственными неоднородностями, которые связаны с высокими значениями скорости [1]. Северо-западные и юго-восточные ветры могут возбуждать неоднородности в полях скорости, связанные с достаточно сложными особенностями рельефа дна, харак-

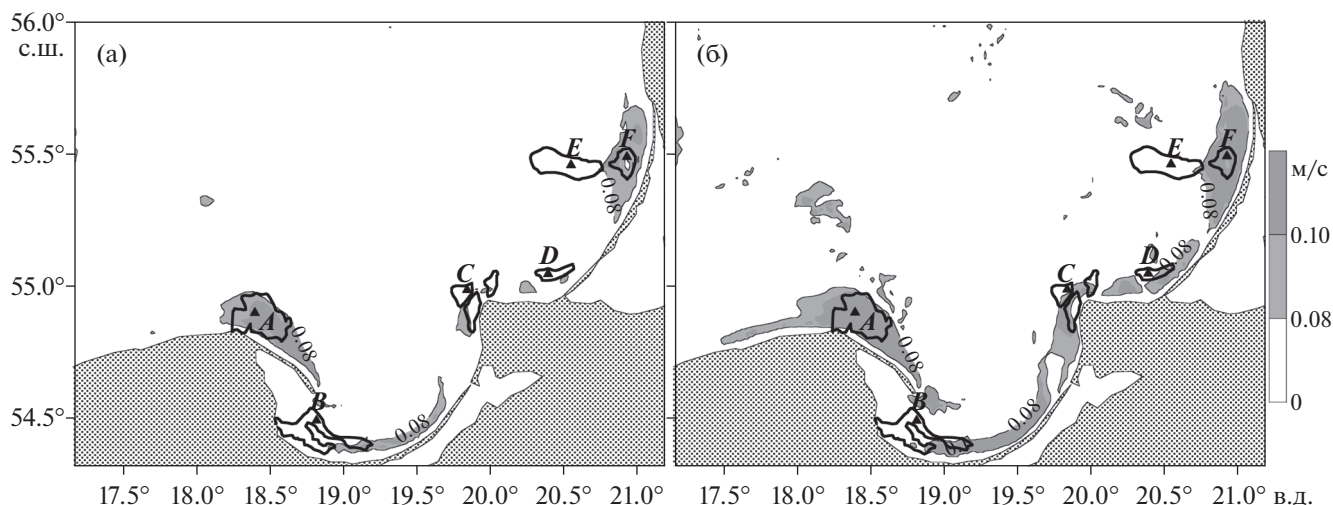


Рис. 2. Пространственные распределения скорости течений в придонной области с величинами, превышающими 0.08 м/с. Расчеты относятся к 2 сут моделирования при воздействии западного (а) и северо-восточного (б) ветра со скоростью 12 м/с. На распределения наложены области (A, B, C, D, E, F) грубых осадков — песка и гравия.

терными для рассматриваемого района, но не вызывать струйных течений.

В ходе анализа результатов моделирования было выяснено, что наиболее интенсивные течения с ярко выраженными пространственными неоднородностями отмечаются на поверхности моря при западном и северо-восточном ветрах. На рис. 1 представлено пространственное распределение абсолютных значений скорости течений на поверхности моря спустя 2 сут модельных расчетов при воздействии западного ветра. На распределение скорости течения наложены жирные черные линии, обозначающие границы грубозернистых донных отложений [6]. Видно, что области со скоростями течений выше 30 см/с и области грубых осадков — песчано-гравийных отложений — достаточно близко соответствуют друг другу.

Следует отметить, что для северо-западного и юго-восточного ветров близкое соответствие между пространственными структурами скорости течений и структурами грубых осадков не отмечается. Очевидно, это связано с тем, что при данных ветрах наиболее интенсивные — квазигеострофические течения — в рассматриваемой области весьма слабы (и практически не возникают).

Непосредственное воздействие течений на донные осадки оценивалось по данным придонных скоростей на горизонте около 0.6 м от дна. Толщина пограничного слоя в модели составляла примерно 1 м. На рис. 2 представлены распределения скорости придонных течений с величинами, превышающими 0.08 м/с, а также выделения областей грубозернистых донных отложений, обозначенных буквами A–F. В выделенных областях среднее значение скорости составляло 0.09 м/с.

Представленные результаты моделирования соответствуют западному (а) и северо-восточному (б) ветрам. Выбор значения скорости течения 0.08 м/с обусловлен тем, что оно приблизительно соответствует границе области эрозии частиц с размером 0.1–0.7 мм на диаграмме Хьюльстрема.

Явное соответствие структур течений и осадков отмечается в областях A и F (рис. 2) как для западного, так и для северо-восточного ветров. Неплохое соответствие можно отметить для групп относительно небольших областей C и D. И только в отдельных точках области B, расположенных на ее восточной границе, можно отметить совпадение.

В области E значимые придонные течения не обнаруживаются. Это представляется несколько странным, поскольку в поверхностном слое в этой области отмечаются достаточно интенсивные скорости. Можно предположить, что структура осадков в области E имеет более перемежающийся характер, чем, например, в областях A или F.

С другой стороны, необходимо отметить, что проводимое моделирование не вполне адекватно воспроизводит волновые процессы, в частности, отражение квазиинерционных волн от дна. Был проведен специальный эксперимент, при котором западный ветер, в отличие от вышеописанной схемы, через 40 часов, когда геострофическая струя уже установилась, достаточно резко, в течение 2 ч снизился до нулевого значения.

На рис. 3 показана вертикальная изменчивость горизонтальной составляющей скорости U (запад–восток) для точки, находящейся в области E. Видно, что после остановки ветра (спустя 42 ч после начала модельных расчетов) происходит пе-

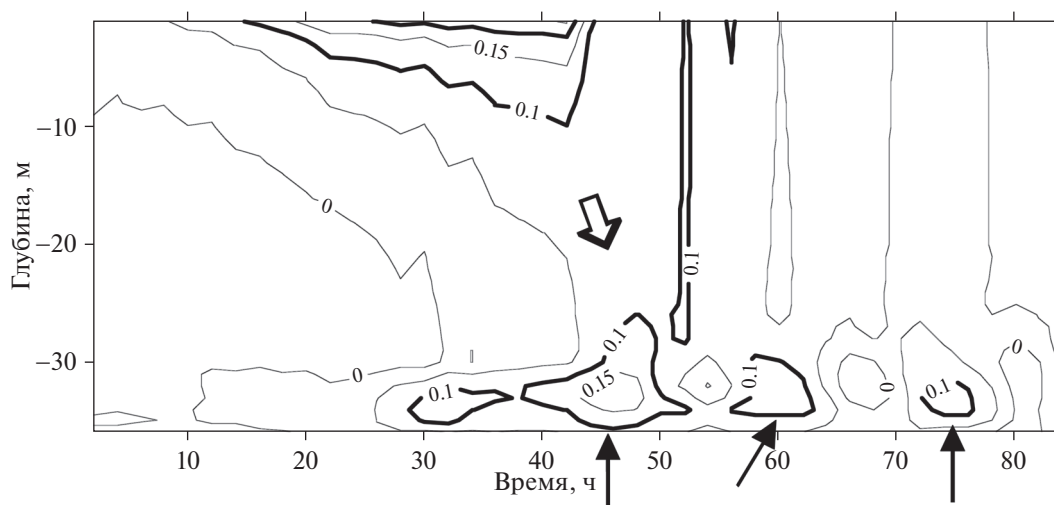


Рис. 3. Вертикальный разрез горизонтальной составляющей скорости U (запад-восток) в точке вблизи области E , построенный по данным моделирования при нарастании западного ветра от 0 до 12 м/с в течение 20 ч и снижении скорости ветра до 0 м/с в период от 40 до 42 ч. В интервале приблизительно от 40 до 50 ч происходило увеличение скорости волновых квазиинерционных течений вблизи дна до 15 см/с. Моменты времени, в которые наблюдалась максимально большая скорость вблизи дна, указаны на временной оси черными стрелками. Белой объемной стрелкой показано направление – сверху вниз – постепенной передачи энергии геострофической струи квазиинерционным волнам.

пераспределение энергии квазигеострофической струи в направлении дна. На рис. 3 направление распространения энергии показано объемной стрелкой. При этом перенос импульса происходит волновым образом – в промежуточном слое (на глубине ~ 20 м) скачки импульса и энергии не отмечаются. Для горизонта ~ 20 м характерен узел волны. Подобный узел отмечается на разрезе одной из составляющих скорости течения в точке Д-6, приведенном в работе [1], а также в работе [15]. Течение, которое концентрируется в придонном слое, имеет волновую природу. Усиления импульса на рис. 3 отмечены тремя стрелками. Видно, что период волны составляет примерно 14 ч, что соответствует квазиинерционным волнам в рассматриваемой области, расположенной на широте $\sim 55.5^\circ$ с.ш. Исследование режимов установления и разрушения геострофических течений относится к классическим задачам; в частности, подобная задача обсуждается в работе Гилла [7]. А. Гилл показал, что в задаче геострофического приспособления при перераспределении энергии на переходном этапе важную роль играют квазиинерционные волны. Это подтверждается и при рассмотрении настоящей задачи.

Поскольку в моделях вблизи нижней границы скорость убывает по логарифмическому закону до нулевого значения, то непосредственно на дне скорости течений оценить не удастся. Однако если учесть, что вертикальная длина квазиинерционной волны в Балтике составляет несколько десятков метров [1, 8, 12, 15], что существенно превосходит толщину придонного погранслоя, то скорость волновых течений в придонном слое

можно оценивать по данным на высоте первых метров от дна. В нашем случае были взяты скорости на уровне 4 м от дна. В области E эта скорость приблизительно равна 15 см/с. Близкие к этому значению скорости были получены практически во всех рассматриваемых областях. В области B оценки придонной скорости были несколько меньше, ~ 10 см/с. (Отметим, что полученные значения близки к пороговым значениям скорости, вызывающим эрозию, на диаграмме Хьюльстрема.) Как и в предыдущем эксперименте (рис. 2), совпадение интенсивных течений и грубозернистых донных отложений наблюдалось лишь у ее восточной периферии.

При анализе вертикальной структуры составляющих горизонтальной скорости в выделенных областях было получено, что в точках внутри областей A , C и F (см. рис. 1) интенсивные струйные течения практически достигают придонного слоя. Вымывание тонкодисперсных донных фракций в этих точках, по-видимому, происходит непосредственно за счет струйных течений. В точках внутри областей B , D и E струйные течения ослабевают в придонном слое, но при резком ослаблении ветра происходит генерация квазиинерционных волн. Связанные с этими волнами скорости в придонном слое имеют высокие амплитуды – до 0.18 м/с, в то время как неволновые придонные течения, обусловленные главным образом геострофическими составляющими, даже при сильных ветрах, составляют ~ 0.09 м/с. Именно такие волновые течения, по-видимому, играют ключевую роль при взмучивании (выносе) тонкодисперсных осадков в областях B , D и E .

Отметим, что наиболее отчетливо описанное периодическое увеличение скорости в придонном слое в точках внутри областей *B*, *D* и *E* отмечалось при осеннем типе стратификации, которая характеризуется довольно резким термоклином в диапазоне глубин ~25–35 м. В этом случае квазигеострофическое струйное течение является наиболее компактным, и в нем сконцентрирована наибольшая энергия по сравнению с тем, как она распределена в области струйного течения при других типах стратификации.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Проведенный анализ показал, что в периоды интенсивных ветровых воздействий в придонном слое могут проявляться два типа течений – неволновые квазигеострофические и волновые квазиинерционные, которые воздействуют на донные осадки, вызывают их взмучивание и вынос тонких фракций, что в конечном итоге формирует пространственную структуру донных отложений.

В рассматриваемом районе Юго-Восточной Балтики наиболее интенсивные течения возникают при западных и северо-восточных ветрах, когда в поверхностном слое формируются квазигеострофические течения, принимающие в отдельных областях вид струй, со скоростями до 30–40 см/с (при ветровом воздействии со скоростью около 12 м/с). Именно в этих областях, где у дна также отмечаются максимальные скорости, среди многих гранулометрических типов осадков отмечаются грубозернистые отложения. Очевидно, что за счет интенсивных течений происходит взмучивание мелкозернистых фракций и их перенос, как правило, в более глубоководные части моря. Отметим, что эрозия тонкодисперсных осадков отмечается на некотором удалении от берега, и области, где в донных осадках преобладают гравий и крупный песок, имеют масштабы нескольких километров. Эти размеры согласуются с масштабом радиуса деформации Россби [13], который для рассматриваемого района составляет 3–8 км [1]. Именно этот масштаб определяет ширину струи.

Важным оставался вопрос о том, как связаны поверхностные и придонные течения. Почему наблюдается связь течения на поверхности моря со структурами донных отложений? Мы пытались оценить непосредственное воздействие квазигеострофических течений на дно и при этом использовали зависимость Хьюльстрема [9]. Согласно Хьюльстрему, даже при больших ветрах (~12 м/с) осадки с диаметром ~0.1–0.7 мм могут свободно переноситься (т.е. не подвергаться отложению), но для их эрозии (взмучивания со дна) зачастую требуется большая придонная скорость. Существенные увеличения скорости придонных течений, как показывает моделирование, возни-

кают в отдельных областях при резком ослаблении ветра. По-видимому, именно на этом этапе происходит взмучивание осадков. Поддержание осадков во взвешенном состоянии и дальнейшее их перемещение требует заметно меньшей придонной скорости, по сравнению с той, которая необходима для эрозии, что хорошо видно на диаграммах Хьюльстрема [9].

Проведенные оценки показали, что в отдельных областях геострофические течения ослабевают с глубиной и едва доходят до уровня эрозии, для взмучивания (подъема частиц со дна) требуется дополнительный эффект. При этом скорости геострофических течений достаточны для перемещения уже взвешенных частиц в соседние области. Взмучивание, на наш взгляд, происходит за счет инерционных волн, возникающих при разрушении квазигеострофического струйного течения. На основе проведенного численного моделирования нами было выяснено, что при резком снижении скорости ветра до нулевого значения возникают инерционные волны, которые достигают дна и резко увеличивают скорость придонного течения. Именно в тех областях, где квазигеострофические струи имеют наибольшую интенсивность, возникающие впоследствии инерционные волны передают сконцентрированные в верхнем слое импульс и энергию вниз, что приводит к резкому увеличению скорости придонного течения. Такой сценарий наряду с ситуацией, когда струйные течения практически достигают придонного слоя, объясняют наблюдавшуюся корреляцию скоростей течений на поверхности моря (областей с наиболее интенсивными скоростями) с областями распространения грубозернистых отложений на дне моря (рис. 1).

В природе часто происходит резкое снижение скорости ветра, и поэтому в море должны регулярно возникать интенсивные пульсации скорости в придонном слое, имеющие волновую природу. Их амплитуды могут быть сравнимы с величинами скорости на поверхности моря. Силовое гидродинамическое воздействие волновых (инерционных) и неволновых (квазигеострофических) течений на донные осадки формируют пространственные особенности крупнозернистых отложений – гравия и крупнозернистых песков.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-05-04198).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Голенко М.Н., Голенко Н.Н.* О структуре динамических полей в юго-восточной Балтике при ветровых воздействиях, приводящих к апвеллингу и даунвеллингу // *Океанология*. 2012. Т. 52. № 5. С. 654–667.

2. *Голенко Н.Н., Голенко М.Н., Шука С.А.* Наблюдение и моделирование апвеллинга в юго-восточной Балтике // *Океанология*. 2009. Т. 49. № 1. С. 20–27.
3. *Журбас В.М., Ступа Т., Малки П.И. и др.* Мезомасштабная изменчивость апвеллинга в юго-восточной Балтике: ИК-изображения и численное моделирование // *Океанология*. 2004. Т. 44. № 5. С. 660–669.
4. *Прошляков Б.К., Кузнецов В.Г.* Литология: Учеб. для вузов. М.: Недра, 1991. 444 с.
5. *Blumberg A.F., Mellor G.L.* A Description of a Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model. – Washington, DC: American Geophysical Union, 1987. 17 p.
6. *Emelyanov E.M., Trimonis E.S., Gulbinskas S.* Surficial (0–5 cm) sediments // *Geology of the Gdansk Basin. Baltic Sea* / Ed. Emelyanov E.M. Kaliningrad: Yantarny Skaz, 2002. P. 82–118.
7. *Gill A.E.* Atmosphere-Ocean Dynamics. New York: Academic Press, 1982. 662 p.
8. *Golenko N.N., Melnikov V.A., Osinski R., Paka V.T.* Evaluations of shear instability connected with quasi inertial waves in the Baltic // *J. Environ. and Chem. Phys., Lithuania*. 2002. V. 24. № 4. P. 218–221.
9. *Hjulstrom F.* Transportation of debris by moving water / Ed. Trask P.D. Recent Marine Sediments; A Symposium: Tulsa, Oklahoma, American Association of Petroleum Geologists. 1939. P. 5–31.
10. *Mellor G.L.* User's guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical model. The revision. Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, Princeton University, Princeton, NJ. 2004. 56 p.
11. *Mellor G.L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // *Rev. Geophys.* 1982. V. 20. № 4. P. 851–875.
12. *Morozov E.G., Velarde M.G.* Inertial Oscillations as Deep Ocean Response to Hurricanes // *J. of Oceanography*. 2008. V. 64. P. 495–509.
13. *Rossby C.G.* On the mutual adjustment of pressure and velocity distributions in certain simple current systems, II // *J. Mar. Res.* 1938. V. 5. P. 239–263.
14. *Turner J.S.* Buoyancy effects in fluids. Cambridge, 1973. 367 p.
15. *Van der Lee E.M., Umlauf L.* Internal wave mixing in the Baltic Sea: Near-inertial waves in the absence of tides // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. № C10016, doi: 10.1029/2011JC007072

Influence of the Quasi Geostrophic Currents and Inertial Waves on Elution of Fine Sediments in the Southeast Baltic

M. N. Golenko, N. N. Golenko, E. M. Emelyanov, M. A. Nekrasov

Numerical modeling using the Princeton Ocean Model (POM) was performed for the region of the Southeast Baltic with the objective to compare the spatial distribution of the velocity and bottom sediments data in this region. Special attention was focused on the consideration of the influence of the western and northeastern winds, which lead to the formation of the intense quasi geostrophic currents and may cause very high velocities in the near bottom layer so that the elution of bottom sediments and transport of their fine fractions occurs. Under the abrupt changing of the wind velocity the effect of elution can intensify due to the generation of inertial internal waves penetrating into the bottom layer. Spatial distributions of the velocity in the surface and near bottom layers are compared with the bottom sediments data. It turned out that the areas with the highest velocities that were formed under the western and northeastern winds in most cases coincide with the areas where the bottom sediments are presented by coarse fractions: gravel and sands.