

ВЛИЯНИЯ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК НА ОСОБЕННОСТИ ХАРАКТЕРНЫХ
ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ РЕЖИМОВ ДЛЯ ВИСЛИНСКОГО ЗАЛИВА:
РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Е.Е. Есюкова*, Б.В. Чубаренко*, Л.В. Лейцина*, Я.С. Бебиева**

*Атлантическое отделение Института океанологии имени П.П. Ширшова
(АО ИО РАН), Россия, 236022, г. Калининград, пр. Мира, 1
E-mail: elena_esiukova@mail.ru

** Институт океанологии имени П.П. Ширшова (ИО РАН),
Россия, 117997, г. Москва, Нахимовский проспект, 36
E-mail: yanabebieva@gmail.com

Для исследования особенностей циркуляционных режимов в Вислинском заливе (Балтийское море), соответствующих характерным условиям ветровой нагрузки, выделения зон движения вод циркуляционного и струйного характера была использована профессиональная лицензионная трёхмерная гидродинамическая численная модель MIKE3-FlowModel. Проанализированы структуры поля течений в Вислинском заливе Балтийского моря на девяти горизонтах (поверхностный – 0,25, глубины 0,75, 1,25, 1,75, 2,25, 2,75, 3,25, 3,75, 4,25 м) и на 14 вертикальных сечениях при различных ветровых нагрузках. В результате определено, что в акватории залива существуют характерные зоны, в которых в большинстве случаев ветровой нагрузки реализуется режим циркуляционного или, наоборот, струйного движения вод, что эти зоны связаны с батиметрической структурой и геометрией границы и, самое главное, что есть соответствие между этими зонами, выделенными по гидродинамическим особенностям, и реальным распределением мелкодисперсного материала на дне залива.

Вислинский залив, циркуляционный режим, ветровая нагрузка, моделирование

ВВЕДЕНИЕ

Практически все явления и процессы, происходящие в прибрежных водоемах, протекают под непосредственным влиянием атмосферы. В результате воздействия ветра на водную поверхность в водоеме формируются волновые явления разных масштабов и осуществляются сложные процессы переноса и перемешивания вод. Воды Вислинского залива практически постоянно находятся в движении, причем им охвачена вся толща воды.

Цель работы – определить на примере Вислинского залива, существуют ли в акватории мелководной прибрежной лагуны характерные зоны, где в большинстве случаев ветровой нагрузки реализуется режим циркуляционного движения вод, и совпадают ли они пространственно с распределением донного осадочного материала.

Принципиальная структура циркуляционных движений в Вислинском заливе при различных ветровых нагрузках была рассмотрена в [1] по результатам численного моделирования на ортогональной сетке (с шагом порядка нескольких сот метров) в рамках двумерной (в плане) постановки задачи. Результаты

аналогичных расчетов, выполненных с помощью численной модели MIKE21 на ортогональной сетке в двумерной постановке, но уже с учетом калибровки этой модели на натуральных данных [2], были обобщены с целью выделения зон струйных и циркуляционных течений в [3, 4]. Отличие настоящей работы в том, что в ней реализованы расчеты циркуляционных движений в Вислинском заливе в трехмерной постановке.

Согласно теории поверхностных волн малой высоты траектории волновых движений частиц жидкости в отсутствии адвективного переноса и в условиях ограниченной глубины имеют вид эллипсов. В условиях совместного действия ветровых волн и течений эллиптические орбиты волновых движений приобретают вид циклоид. Циклоиды обращены вершинами к поверхности воды, когда направление течения совпадает с направлением распространения волн, если иначе – вершинами ко дну [5]. При воздействии поверхностных волн и транзитного течения отчетливо могут проявляться циркуляционные движения в виде вихрей с горизонтальной или вертикальной осью [6].

Если рассмотреть структуры течений, возникающих в условном нестратифицированном водоеме однородной плотности, имеющем удлиненную форму с плавными очертаниями береговой линии и плавным рельефом дна, при ветре, устойчивом по направлению и скорости, то можно выделить десять наиболее характерных схем течений [6]. Из их анализа следует вывод, что от общей макроциркуляции вод зависит распределение скорости по вертикали и положение границы раздела дрейфового (возникающего под непосредственным воздействием трения ветра) и компенсационного (возникающего из-за горизонтального градиента давления, поддерживаемого поверхностным напряжением трения ветра), направление преобладающего переноса вод в различных зонах водоема и другие характеристики течений.

Но поскольку Вислинский залив, вытянутый вдоль побережья и имеющий среднюю глубину порядка 2,7 м [7], очень отдаленно может быть представлен таким принципиальным водоемом, так как обладает существенно более сложной структурой береговой линии и глубин, то в работе проведено прямое моделирование течений с учетом существующей батиметрии залива.

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Семейство моделей MIKE – лицензионное программное обеспечение, разрабатываемое Датским гидравлическим институтом (DHI Water&Environment, <http://www.dhi.dk/>) для моделирования гидродинамических, гидрохимических, гидробиологических, эвтрофикационных и других процессов в эстуариях, заливах, озёрах, прибрежных зонах, морях и океанах. Математической основой MIKE3 являются уравнение сохранения массы, уравнения Навье-Стокса (с осреднением по Рейнольдсу) в трёх измерениях, включая эффекты турбулентного обмена по всем трем измерениям, уравнения сохранения для солёности и температуры, уравнение состояния морской воды. Решение получается на прямоугольной регулярной сетке; толщина слоёв по вертикали также постоянна.

В настоящей работе для анализа особенностей циркуляционных режимов для Вислинского залива использовалась трехмерная гидродинамическая модель MIKE3-FlowModel (DHI Water&Environment, <http://www.dhi.dk/>) в варианте негидростатического приближения. Учитывалось действие силы Кориолиса

(54,5° N) и трение о дно, которое задается в виде размера шероховатости (величина шероховатости принималась равной 0,05 м, что соответствует случаю относительно гладкого дна). Для параметризации турбулентности была выбрана модель Смагоринского (коэффициенты турбулентной вязкости по горизонтали и вертикали равнялись 0,088 и 0,176 соответственно).

Расчеты проводились при реальной конфигурации береговой линии и структуре глубин залива (рис. 1), снятых с навигационных карт масштаба 1:50000 и 1:25000. Расчёты проводились на регулярной прямоугольной сетке 160×110 ячеек по горизонтали (500 м × 500 м), шаг по вертикали – 0,5 м (25 слоёв). Шаг по времени, определяемый условием близости к единице числа Куранта, составлял 60 с. Залив не был стратифицирован по температуре и солёности. Солёность воды равнялась 3,5 psu, что примерно соответствует условиям начала весны, была постоянна в вертикальном и горизонтальном направлениях и не менялась по времени. Температура воды также принималась постоянной и равнялась 2,5°C. В расчетах учитывался реальный для данной широты ход солнечной радиации марта месяца (дневной прогрев – ночное выхолаживание). Атмосферные осадки не были включены в расчет. Залив представлялся как полностью замкнутый водоем, сток рек отсутствовал. Водная толща приводилась в движение только за счет напряжения ветра, воздействие которого считалось однородным по всей поверхности. Коэффициент трения между воздухом и водой был постоянен на всем периоде вычислений (0,0016). Рассматривались случаи ветра продольного и поперечного направлений (SW и NW соответственно, рис. 2), а также других характерных направлений (W, S, E, SE, N) при различных вариантах скорости ветра (5, 10 м/с). Длительность интервала постоянного действия ветра составляла весь период вычислений (72 ч).

В работе рассматривалось влияние ветровых нагрузок на особенности характерных циркуляционных режимов в поверхностном слое и нижележащих слоях для Вислинского залива, анализировалась пространственная структура установившихся в течение 72 ч течений на девяти горизонтах (поверхностный горизонт 0,25 м, глубины 0,75 м, 1,25, 1,75, 2,25, 2,75, 3,25, 3,75, 4,25) и на 14 вертикальных сечениях (рис. 2).

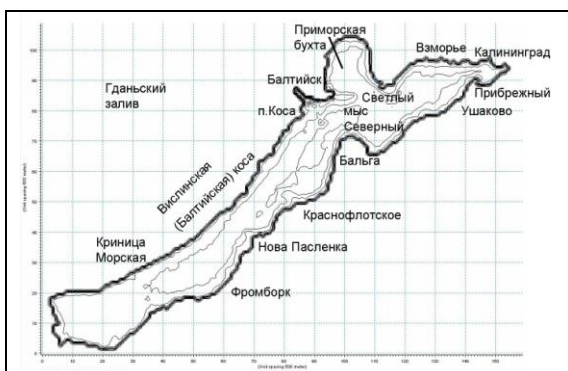


Рис. 1. Вислинский залив: область моделирования и батиметрия
Fig. 1. The Vistula Lagoon: modeling domain and bathymetry

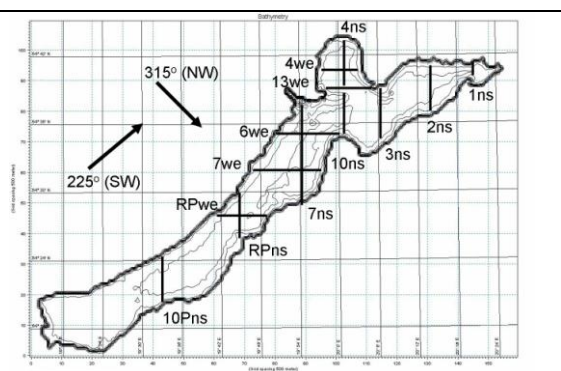


Рис. 2. Положение контрольных вертикальных сечений и направления ветра продольного (SW) и поперечного (NW)
Fig. 2. Locations of vertical cross-sections and directions of longitudinal (SW) and cross-basin (NW) winds

РЕЗУЛЬТАТЫ

При продольном ветре SW (225°) в поверхностном слое (0,25-0,75 м от поверхности) установившееся численное решение показывает наличие струйных течений вдоль берегов в направлении продольной оси лагуны. Величина скорости этих течений увеличивается с увеличением скорости ветра без изменения направления. При скорости ветра 5 м/с расчётные скорости течений у берега достигают 0,13 м/с, при скорости – 10 м/с скорость течения достигает 0,30 м/с. При поперечном ветре NW (315°) отмечено появление устойчивых струйных течений вдоль берега в Приморской бухте, а также вдоль сегментов берега, параллельных направлению действия ветра, где при скорости ветра 5 м/с расчётные скорости течений получаются порядка 0,10-0,15 м/с и при скорости ветра 10 м/с – 0,10-0,20 м/с.

Отмечено формирование двухслойной структуры течений – течения у поверхности (до глубины 1,25 м) соответствуют направлению ветра, а в областях средних и больших глубин (в слоях ниже 1,75 м от поверхности) они направлены в сторону, обратную направлению ветра. Такая структура устанавливается в течение первых 8 ч при ветровом воздействии постоянного направления и скорости.

Анализ показал, что при воздействии поперечного ветра NW (315°) скорость установившихся расчётных течений в открытой части водоёма в глубинных слоях (2,75 м от поверхности и ниже) сравнима по величине со скоростью в поверхностном слое, но направлена в обратную сторону, а на глубине 1,25-1,75 м – минимальна. Например, при скорости 10 м/с в центральном сегменте вертикального сечения 7ns (рис. 2), где глубины максимальны, в поверхностном слое (0,25-0,75 м от поверхности) скорости течения лежат в диапазоне 0,05-0,11 м/с, на глубине 0,75-1,25 м – в диапазоне 0,02-0,05 м/с, на глубине 1,25-1,75 м – 0,002-0,012 м/с, на глубине 1,75-2,25 м – 0,02-0,03 м/с, на глубине 2,25-2,75 м – 0,05-0,07 м/с, на глубине 2,75-3,35 м – 0,07-0,09 м/с, на глубине 3,25-3,75 м – 0,09-0,10 м/с, на глубине 3,75-4,25 м – 0,09-0,10 м/с, на глубине 4,25-4,75 м (у дна) – 0,06-0,08 м/с. В то же время скорости течений у берегов на глубине 1,25-1,75 м лежат в диапазоне 0,01-0,03 м/с.

При воздействии на поверхность лагуны ветров наиболее характерных направлений (SW, NW, W, S, E, SE, N) при скорости ветра 10 м/с для всех слоёв (от поверхности до дна) отмечено возникновение струйных течений. В разных частях лагуны обнаружено установление циркуляционных ячеек с вертикальной осью, но на глубинах 2,25 м от поверхности и ниже они не наблюдаются, зато выявлены устойчивые глубинные противотечения, направления которых противоположны направлению ветра.

Так, например, в поверхностном слое (0,25-1,75 м от поверхности) при направлениях ветра 225° (SW), 315° (NW), 180° (S), 270° (W) устойчивые циркуляционные ячейки с вертикальной осью образуются преимущественно у восточного берега (районы у пос. Ушаково и Прибрежный, у мыса Северный, в районе пос. Краснофлотское, российско-польской границы, г. Нова Пасленка), у российской части Вислинской косы, у восточного берега в Приморской бухте. Устойчивые струйные течения в поверхностном слое (0,25-1,75 м от поверхности) при направлениях ветра 225° (SW), 315° (NW), 180° (S), 270° (W) образуются преимущественно у западного берега (вдоль Вислинской косы), у г. Балтийск,

Светлый, у восточного берега Приморской бухты, в центральной части Калининградского залива, у мыса Северный, в районе пос. Краснофлотское, вдоль основной оси в центральной области лагуны, у восточного берега в районе российско-польской границы (рис. 3).

Согласно анализу расположения в акватории Вислинского залива зон с устойчивыми струйными течениями и/или циркуляционными ячейками видно, что восточная область Вислинского залива, восточная часть Приморской бухты, побережье Калининградского залива, российское побережье Вислинской косы наиболее подвержены влиянию вихревых и/или струйных течений, вызванных ветровыми нагрузками, т. е. являются наиболее гидродинамически активными участками. Наименьшая активность течений установлена в юго-западной области бассейна.

Анализ результатов расчётов показал, что направление течения у поверхности соответствует направлению ветра, в промежуточном слое течения меняют направление, а в придонном – в областях средних и больших глубин течения направлены в сторону, обратную направлению ветра. По абсолютной величине скорости течений уменьшаются при удалении от поверхностных слоев, проходя через свой минимум в промежуточном слое, и далее возрастают до своего промежуточного максимума в придонном слое, где реализуется противотечение. В мелководных частях залива горизонтальная структура течений однослойная. Они направлены по ветру, по мере увеличения глубины скорости течений уменьшаются. Отмечено, что поверхностные скорости в самых глубоких районах залива при поперечном ветре больше, чем при продольном, а максимум скоростей глубинных противотечений, наоборот, возникали при продольных ветрах.

СВЯЗЬ СМОДЕЛИРОВАННЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ С РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ДОННОГО ОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА

В Вислинском заливе выделены [8, 9] основные гранулометрические типы осадков (валунно-галечные, пески разноразмерные, крупные алевриты, мелкоалевритовые илы, алевритово-пелитовые илы) и составлена картосхема их распределения для водоема (рис. 4).

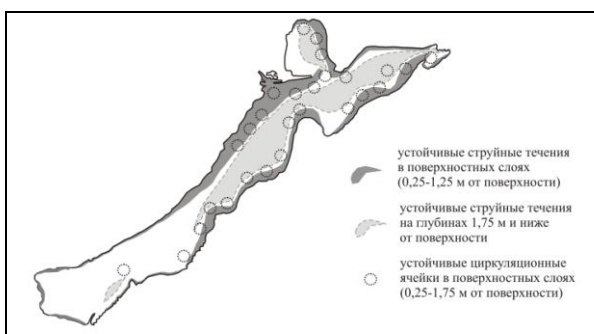


Рис.3. Выделение в акватории Вислинского залива зон с устойчивыми струйными течениями и/или циркуляционными ячейками
Fig. 3. Allocation of areas with strong jet streams and/or circulating cells in the Vistula Lagoon

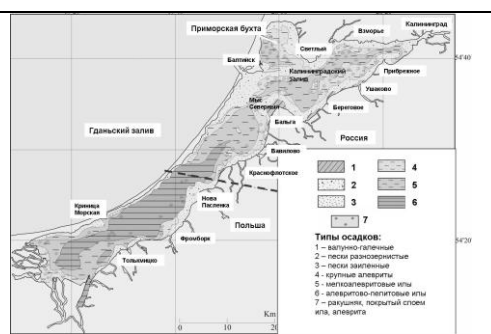


Рис. 4. Распределение донных осадков в Вислинской лагуне (рисунок взят из [9], обозначены населенные пункты)
Fig. 4. Distribution of bottom sediments in the Vistula Lagoon (Figure was taken from [9], settlements were additionally indicated)

Сравнительный анализ найденных гидродинамических пространственных особенностей с реально существующим пространственным распределением донных осадков различных фракций [8-10] (рис. 4) показал, что даже при ограниченной модельной постановке задачи (отсутствии открытой границы и речного стока, установившемся ветровом режиме в расчетном бассейне) возникают зоны, по своему местоположению располагающиеся в непосредственной близости или полностью накладывающиеся на зоны основных типов донных осадков и их фракций. Например, зоны повышенной активности циркуляционных и струйных течений у российской части Вислинской косы, у г. Балтийск, Светлый, в восточной части Приморской бухты, у северо-восточного побережья Калининградского залива (пос. Прибрежный, Ушаково), у восточного побережья залива (в районе российско-польской границы, г. Нова Пасленка, мыса Северный, пос. Бальга, в районе пос. Краснофлотское) накладываются на зоны расположения гальки, гравия, песка (рис. 4). Области залегания крупных и мелких алевритов соответствуют в основном наиболее глубоководным зонам, где возникают однонаправленные поверхностные и придонные компенсационные течения в центральной и восточной области лагуны, которые обычно меньше по своей интенсивности, чем приуроченные струйные к мелководным зонам. Зоны залегания ила и глинистого ила близки по расположению к зонам с наименьшей динамической активностью (юго-западная часть лагуны).

При сравнении типов берегов с районами возникновения циркуляционных и струйных течений получено, что при преобладающем направлении ветра (225° (SW)) вдоль западного и восточного берегов образуются устойчивые струйные течения. Например, у мыса Северный в районе пос. Бальга при скорости ветра 10 м/с скорость в поверхностном слое достигает 0,15 м/с, на глубине 0,75-1,25 м – 0,10-0,12 м/с, на глубине 1,25-1,75 м – до 0,05-0,10 м/с. При направлениях ветра 270° (W) и 315° (NW) в том же районе при скорости ветра 10 м/с скорость в поверхностном слое достигает 0,20 м/с, на глубине 0,75-1,25 м – 0,10-0,15 м/с, на глубине 1,25-1,75 м – до 0,10-0,12 м/с. Таким образом, с прибрежной полосы в таких местах глинистый материал выносится полностью, пески протянуты в виде сплошной прибрежной полосы и представлены хорошо сортированными средне- и мелкозернистыми. Крупные алевриты окаймляют зону песков, располагаясь на больших глубинах.

В заливе существуют участки различной интенсивности процессов аккумуляции, абразии и транзита осадочного материала, что свидетельствует о сложности и многообразии процессов седиментации. Распределение фракций осадочного материала с глубиной (наиболее мелкий материал находится на наибольших глубинах) в большей степени соответствует распределению интенсивности ветрового волнения и условий его воздействия на дно [11, 12], но границы распространения фракций не всегда совпадают с изобатами, они меняются в зависимости от преобладающего переноса вод, вызываемого ветровыми нагрузками. Таким образом, комплексное динамическое взаимодействие ветровых волн и течений, усредненное по длительному периоду воздействия, является основным ключевым фактором, определяющим результирующее распределение осадков в мелководном бассейне, подобном Вислинскому заливу.

ВЫВОДЫ

Выявлено, что структура течений в мелководном заливе существенно трехмерна – у берегов направление течений определяется направлением ветра и простираемостью линии берега, а в глубоких частях отмечено формирование двухслойной структуры течений – течения у поверхности (до глубины 1,25 м) соответствуют направлению ветра, а в областях средних и больших глубин (в слоях ниже 1,75 м от поверхности) течения направлены в сторону, обратную направлению ветра. По абсолютной величине скорости течений минимальны в промежуточном слое (1,25-1,75 м). Такая структура течений формируется, в среднем, за первые 8 ч ветрового воздействия постоянной силы и направления.

Отмечено, что поверхностные скорости в самых глубоких районах залива при поперечном ветре больше, чем при продольном, а максимум скоростей глубинных противотечений, наоборот, возникает при продольных ветрах. Скорости поверхностных течений и придонных противотечений в центральной, более глубокой части залива, немного меньше скоростей течений в близбереговых районах, где они реализуются как струйные однонаправленные.

Районирование Вислинского залива по наличию в его акватории зон с устойчивыми циркуляционными ячейками и струйными течениями показало, что восточная и северо-восточная область залива, восточная часть Приморской бухты, российское побережье Вислинской косы наиболее подвержены влиянию вихревых и струйных течений, вызванных ветровыми нагрузками, т. е. являются наиболее гидродинамически активными участками. Наименьшая активность течений установлена в юго-западной области бассейна.

Комплексное динамическое взаимодействие ветровых волн и течений, усредненное по длительному периоду воздействия, является основным ключевым фактором, определяющим результирующее распределение осадков в мелководном бассейне, подобном Вислинскому заливу.

Анализ проводился авторами при поддержке грантов РФФИ № 10-05-00540, 10-05-00472, 10-05-90765 и проекта LAGOONS (№ 283157).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Szymkiewicz, R. A mathematical model of storm surge in the Vistula lagoon, Poland / R. Szymkiewicz // Coastal Engineering. – 1992. – V.16. – P. 181-203.
2. Чубаренко, И.П. Использование комплексной модели MIKE21 для моделирования гидрологического режима Вислинской лагуны / И.П. Чубаренко, М.Я. Колосенцева // Экологические проблемы Калининградской области: сб. науч. тр. / КГУ. – Калининград, 1997. – С. 80-83.
3. Chubarenko, B.V. Regionalisation of river Pregel estuary and Russian part of the Vistula lagoon on hydrophysical parameters / B.V. Chubarenko, I.P. Chubarenko // Int. Conf. on Regionalization in Hydrology, Braunschweig, Federal Republic of Germany: Extended Abstracts/ Braunschweig, 1997.- P.41- 44.
4. Чубаренко, Б.В. Зонирование Калининградского залива и устьевого участка р. Преголи по показателям гидролого-экологического состояния и в целях оптимизации мониторинга / Б.В. Чубаренко // Комплексное исследование

процессов, характеристик и ресурсов российских морей Северо-Европейского бассейна (проект программы «Исследование природы Мирового океана» федеральной целевой программы «Мировой океан»): сб. науч. тр. / Кольский научный центр РАН. – Апатиты, 2007. – Вып. 2. – С. 591-602.

5. Богачев, А.Г. Течения в мелководных не стратифицированных водоемах (на примере Чудско-Псковского озера) / А.Г. Богачев, Т.Н. Филатова // IV Всесоюзный гидрологический съезд: труды / ГГИ. – Ленинград, 1975. – Т. 5. – С. 288.

6. Каган, Б.А. О расчете поверхностных и дрейфующих течений / Б.А. Каган // Труды ЛГМИ. – 1961. – Т. 10. – С. 106.

7. Гидрометеорологический режим Вислинского залива / под ред. Н.Н. Лазаренко, А. Маевского. – Л., 1971. – 279 с.

8. Чечко, В.А. Процессы современного осадкообразования в Вислинском заливе Балтийского моря: автореф. дисс...канд. геол.-минерал. наук; 25.00.28. – Океанология / РГУ; В.А.Чечко.– Калининград, 2006. – 26 с.

9. Chechko, V. Spatial structure and evolution of bottom sediments in the Vistula Lagoon / V. Chechko // Transboundary water and basins in the South-East Baltic: Proceedings / Terra Baltica.-Kaliningrad, 2008.– P. 246-251.

10. Chechko, V.A. Bottom deposits of the Vistula Lagoon of the Baltic Sea / V.A. Chechko, A.I. Blazhchishin // Baltica. – 2002. – V. 15. – P.13-22.

11. Чубаренко, Б.В. Анализ зон вторичного загрязнения акваторий Калининградского и Куршского заливов / Б.В. Чубаренко // География и природные ресурсы. – 1994. – N 3. – С. 3-33.

12. Chubarenko, B.V. Comparative analysis of potential wind-wave impact on bottom sediments in the Vistula and Curonian lagoons. / B.V. Chubarenko, L.Ch. Lund-Hansen, A.A. Beloshitski // Baltica. – 2002. – V. 15. – P. 31-39.

INFLUENCE OF TYPICAL WIND FORCING ON THE PECULIARITY OF CIRCULATION REGIMES IN VISTULA LAGOON: RESULTS OF NUMERICAL MODELING

E.E. Esiukova, B.V. Chubarenko, L.V. Leitsina, J.S.Bebieva

Three-dimensional hydrodynamic model MIKE3-FlowModel (DHI Water & Environment, <http://www.dhi.dk>) was used to study the peculiarities of circulation regimes in the Vistula Lagoon (Baltic Sea), corresponding to the characteristic wind load conditions, for the determination of the circulation zones and stream-like motion. The structure of flow fields in the pool at 9 levels (surface horizon 0,25m, the depth of 0,75 m, 1,25, 1,75, 2,25, 2,75, 3,25, 3,75, 4,25) and 14 vertical sections for different wind loads were analyzed. As a result, on the example of the Vistula Lagoon the Baltic Sea, it was determined that in the area of the shallow-water coastal lagoon, there are specific areas where the regime of circulation or stream-like motion of water exist at most cases of the wind load. These zones are associated with the bathymetric structure and the geometry of the boundary and, most importantly, there is a correspondence between the hydrodynamically defined zones and the actual distribution of fine material at the bottom of the lagoon.

Vistula Lagoon, circulation regime, wind forcing, numerical simulation