

УДК 656.61.052

**CALCULATION OF TARGET ORIGINATED RESTRICTIONS  
ON B-MANOEUVRE OF OWN SHIP****РАСЧЕТ ПОРОЖДАЕМЫХ «ЦЕЛЬЮ» ОГРАНИЧЕНИЙ НА  
В-МАНЕВР СОБСТВЕННОГО СУДНА***L.L. Vagushchenko, DSc, professor**A.L. Vagushchenko, PhD, associate professor**Л.Л. Вагущенко, д.т.н., профессор**А.Л. Вагущенко, к.т.н., доцент**Odessa National Maritime Academy, Ukraine**Одесская Национальная Морская Академия, Украина***ABSTRACT**

For avoidance of close quarter situations with other vessels shift of own ship (OS) to the parallel line of a way can be used. This action is called a B-manoeuve or Z-manoeuve. The method of B-manoeuve selection in a dialogue mode with the collision avoidance system (CAS) is based on the use of graphic elements - predicted dangerous areas at B-manoeuve ( $PAD_B$ ) or their marks. If the calculation of  $PAD_B$  marks does not consider the dynamics of OS, actual movement of this ship will not coincide with planned on these marks motion. In this article the algorithm of calculation of  $PAD_B$  marks, which takes into account inertia of OS, is offered.

**Keywords:** collision avoidance, B-manoeuve, predicted area of danger, PAD mark.

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами**

Проблема обеспечения безопасного расхождения судов является одной из основных в мореплавании. Одним из аспектов ее решения является разработка изобразительных моделей, помогающих судоводителям осуществлять выбор маневров с несколькими судами, что определяет актуальность рассматриваемой тематики.

**Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы**

На судах для предупреждения столкновений с судами применяются маневры различных видов [1-4]: курсом, скоростью, одновременно курсом и скоростью. Выбор вида действия для безопасного прохождения встречных судов определяется преобладающими обстоятельствами и условиями плавания. Одним из распространенных действий для избежания чрезмерного сближения с судами является В-маневр. Этот маневр в ряде источников называется также Z-маневром. Его схемы с пренебрежением и с учетом инерционности судна

оператора представлены в работе [1]. Для выбора В-маневров в режиме диалога с бортовой системой предупреждения столкновений предложено формировать на земной поверхности специальные области, называемые ниже опасными при В-маневре зонами акватории, порождаемыми «целями». Сокращенно эти зоны обозначаются  $OZA_J$ , где индекс  $J$  показывает, какой «цели» принадлежит эта зона.  $OZA_J$  может применяться как для выбора В-маневров, так и для оценки опасности столкновения. Такая опасность существует, когда линия пути судна оператора проходит через  $OZA_J$  другого судна.

$OZA_J$  получается проектированием в область истинного перемещения судна оператора (СО) домена опасности «цели» из области движения СО относительно этой «цели» при В-маневре. Конфигурация  $OZA_J$  зависит от взаимного расположения судна оператора и «цели», элементов их движения и от принятого домена опасности «цели». В общем случае при отображении коллизионных ситуаций метки  $OZA_J$  могут основываться на неодинаковых по форме и размерам доменах «целей». При нескольких «целях» зоны  $OZA_J$  загромождают экран, и изображение ситуации теряет наглядность. Поэтому вместо  $OZA_J$  предложено [1] использовать метки, которые отражают основные свойства этих зон.

Намечаемая по меткам траектория В-маневра представляет собой маршрут судна оператора для предотвращения столкновений с «целями». При следовании по этому маршруту поворот с одного его отрезка на другой должен начинаться с упреждением, необходимым для точного выхода на новый отрезок пути. Пока при расчете меток, отражающих ограничения «целей» на выбираемый В-маневр, динамика судна при повороте не учитывалась. Это приводит в процессе выполнения маневра к отличию значения дистанции кратчайшего сближения (ДСРА) от ее значения, соответствующего плану прохождения опасного судна. Разница этих значений иногда достигает пять кабельтов. Такая погрешность может серьезно повлиять на безопасность расхождения.

### **Формулировка целей статьи (постановка задачи)**

Целью работы является создание алгоритма расчета меток опасных при В-маневре областей, который учитывает инерционность судна оператора. В результате, в процессе движения по запланированному по этим меткам маршруту не возникнет существенного отличия в значениях действительной и соответствующей выбранному плану дистанции кратчайшего сближения.

### **Изложение материалов исследования с обоснованием полученных научных результатов**

Связанный с «целью» домен опасности ниже принят круговым с центром в месте «цели». Радиус этого круга берется равным заданному пределу  $d^s$  безопасных значений ДСРА.

Зона  $OZA_J$  отражает: связанную с землей область опасных позиций судна оператора по отношению к «цели» при В-маневре, интервал опасных смещений при таком маневре, точку начала опасных курсов уклонения под заданным

углом к исходному курсу. При выборе В-маневра основной интерес представляет второе и третье свойства опасной зоны. Ими обладает и метка  $MZ$  опасной зоны акватории, показанная на рис. 1.

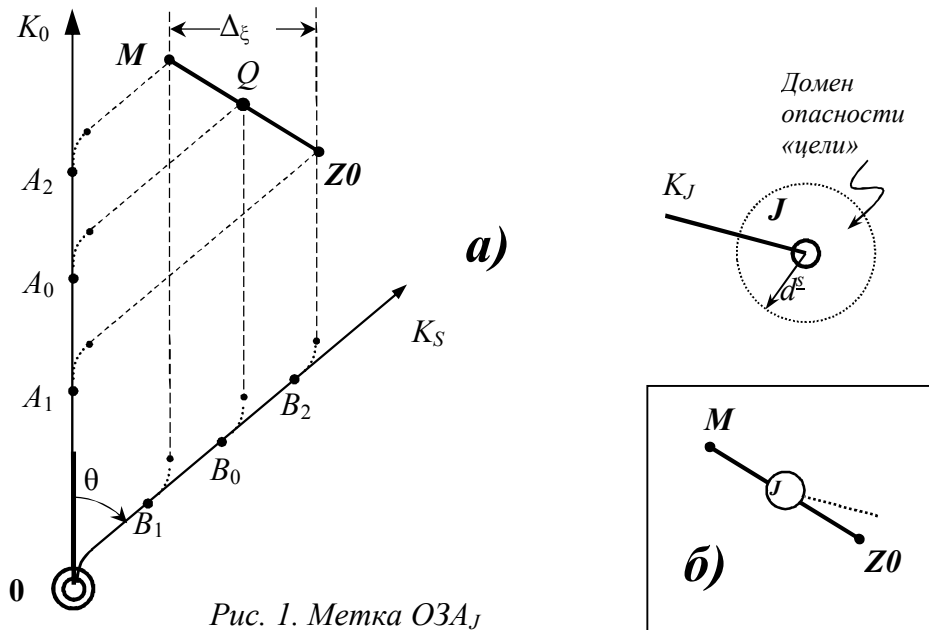


Рис. 1. Метка  $OZA_J$

Метка  $MZ$  соответствует заданной дистанции кратчайшего сближения ( $DCPA^S$  или  $d^s$ ) и выбранному углу  $\theta$  В-маневра. Курс уклонения вправо при таком угле  $\theta$  обозначим  $K_S$ , а влево -  $K_P$ . На рис. 1 показана метка  $OZA_J$  для смещения судна оператора вправо. На этом рисунке  $K_J$  - курс «цели»;  $K_0$  - исходный курс судна оператора;  $\Delta_\xi$  - интервал опасных смещений при В-маневре с заданным углом  $\theta$ .

Определяющими элементами метки  $OZA_J$  служат точки  $A_1, A_2, B_1, B_2$ . Первые две из них являются точками на линии пути судна оператора, в которых начало изменения курса на угол  $\theta$  приводит к расхождению с «целью» на дистанции  $d^s$ . На таком же расстоянии суда пройдут друг от друга, когда начало возвращения с линии уклонения к прежнему курсу проведено СО в точках  $B_1, B_2$ . Отрезок  $A_1A_2$  характеризует диапазон опасных курсов уклонения.

Если судно оператора начнет изменение курса на угол  $\theta$  в точке  $A_0$  или инициирует возвращение к прежнему курсу в точке  $B_0$ , то это приведет к столкновению с «целью» в точке  $Q$ . Таким образом,  $Q$  является точкой возможного столкновения судна оператора с «целью» при В-маневре. Точки  $A_0, B_0$  делят соответственно отрезки  $A_1A_2$  и  $B_1B_2$  пополам. Точка  $Q$  возможного столкновения с «целью» делит метку пополам. Чтобы метку  $OZA_J$  легче было идентифицировать, в ее центре в кружочке показывается номер «цели», к которой эта метка относится, и точечный отрезок, указывающий направление на эту «цель» (рис. 1,б). В памяти бортовых систем

предупреждения столкновений (СПС) все метки ОЗА<sub>1</sub> следует представлять координатами их концов  $M$ ,  $Z$ .

Будем считать, что траектория судна при повороте является дугой окружности с радиусом  $R_M$ , соответствующем углу перекладки руля (рис. 2). Расстояние  $S_\theta$ , проходимое СО при изменении курса на угол  $\theta$ , и время  $t_\theta$  поворота судна можно найти по формулам

$$S_\theta = R_M \cdot \theta; \quad t_\theta = S_\theta / V; \quad (1)$$

где  $V$  - скорость судна.

Дистанция  $S_R$  до точки пересечения курсов, на которой надо начать поворот, и время  $t_R$  прохождения этой дистанции со скоростью  $V$  равны

$$S_R = R_M \cdot \tan \frac{\theta}{2}; \quad t_R = S_R / V. \quad (2)$$

Для упрощения расчетов криволинейный участок движения судна при повороте (дугу окружности) заменим эквивалентным по времени прямым отрезком  $S_E$ . Такой способ учета инерционности судна оператора при решении задач предупреждения столкновений называется «методом промежуточного курса» [2].

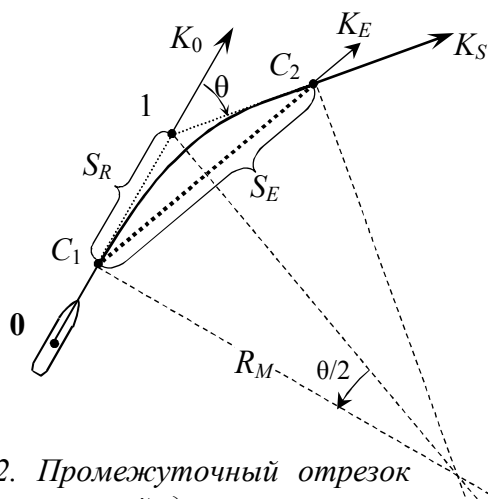


Рис. 2. Промежуточный отрезок  $SE$ , заменяющий дугу траектории поворота на угол  $\theta$

Длину промежуточного отрезка, курс и скорость СО на нем можно определить по формулам

$$S_E = 2R_M \cdot \sin \frac{\theta}{2}; \quad K_E = 0.5 \cdot (K_0 + K_S); \quad V_E = S_E / t_\theta. \quad (3)$$

Рассмотрим алгоритм расчета метки  $OЗА_J$  на примере В-маневра вправо в ситуации пересечения курсов. Схема сближения судов представлена в ориентированной по норду системе координат  $XOY$  (рис. 3). Начало этой системы связано с точкой земной поверхности, ось  $OX$  направлена на север, а ось  $OY$  - на восток.

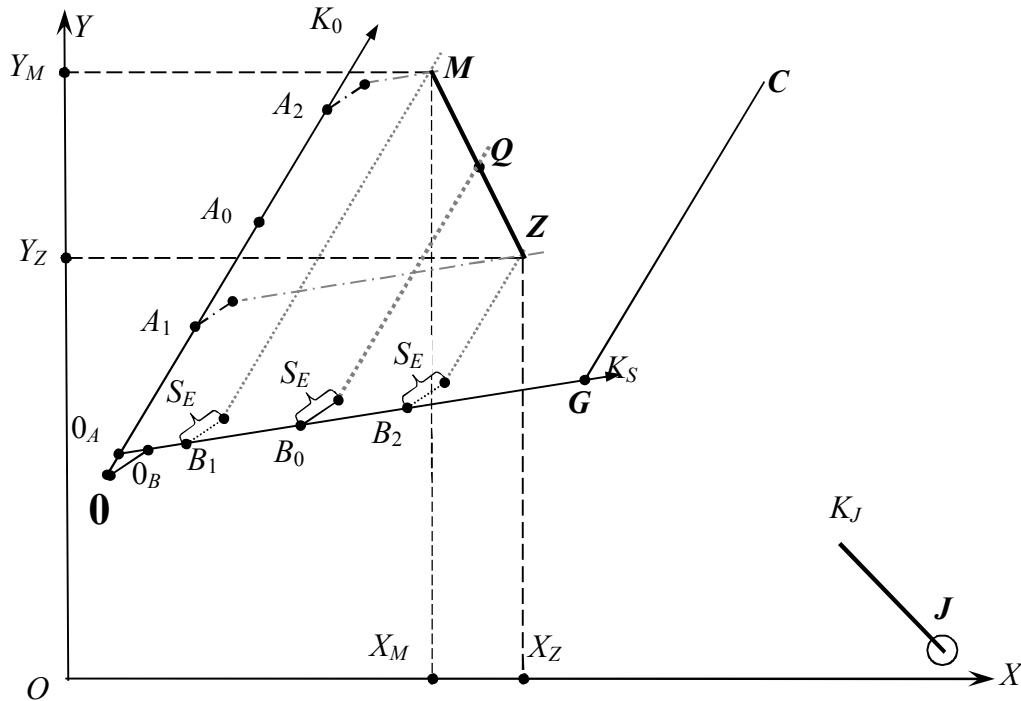


Рис. 3. Характеристика истинного движения судна оператора при В-маневре

На рисунке обозначено:

$K_0, V$  - курс и скорость судна оператора перед маневром;

$K_S = K_0 + \theta$  - курс уклонения вправо;

$K_J, V_J$  - курс и скорость «цели»  $J$ ;

$A_1, A_2$  - точки начала поворота с курса  $K_0$  на курс  $K_S$  для расхождения с «целью» на дистанции  $d^s$ ;

$B_1, B_2$  - точки начала возвращения с курса  $K_S$  к прежнему курсу  $K_0$  для расхождения с «целью» на дистанции  $d^s$ ;

$MZ$  - метка  $OЗА_J$ , порождаемая «целью»  $J$ ;

$Q, A_0, B_0$  - центр метки и точки начала поворота с курса  $K_0$  на курс  $K_S$  и возвращения с курса  $K_S$  к прежнему курсу  $K_0$  для сближения с «целью»  $J$  вплотную;

$S_E$  - промежуточный отрезок, заменяющий траекторию поворота;

$\Delta_\xi$  - интервал смещений от планового пути, приводящих к чрезмерному сближению с «целью»;

ГС - граница безопасной для движения и маневров области (ОДМ).

ОДМ представляется в виде соприкасающихся по линии пути СО правой и левой полос. Внешние границы этих полос отсекают опасные в навигационном отношении воды. На рисунке показана только правая полоса.

Метка ОЗА<sub>J</sub> полностью определяется координатами своих концов – М, Z. Для их нахождения рассмотрим показанную на рис. 3 ситуацию в относительном движении (рис. 4, 5) в системе координат  $хоу$ . Начало этой системы связано с местом «цели», ось  $ох$  направлена на север, а ось  $оу$  - на восток.

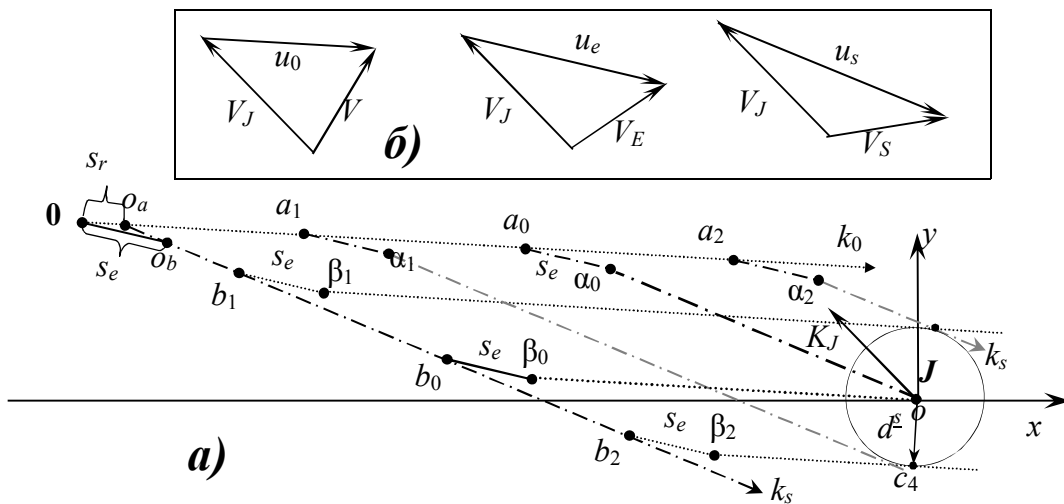


Рис. 4. Перемещения судна оператора относительно «цели» при В-маневре

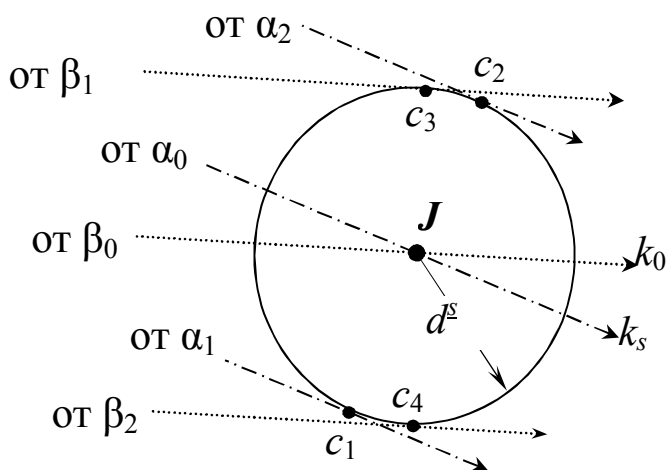


Рис. 5. Пояснение к рис. 4

На рисунках 4 и 5 обозначено:

$k_0, u_0; k_s, u_s; k_e, u_e$  – курс и скорость относительно «цели» судна оператора, следующего соответственно курсом  $K_0, K_s, K_e$ ;

$a_0, a_1, a_2$  и  $b_0, b_1, b_2$  – точки на ЛОД судна оператора, соответствующие точкам  $A_0, A_1, A_2$  и  $B_0, B_1, B_2$  на рис. 3;

$c_1, c_2$  и  $c_3, c_4$  – точки касания линий курсов  $k_0$  и  $k_s$  границы домена опасности «цели»;

$s_e$  – соответствующий  $S_E$  отрезок относительного движения.

Алгоритм вычисления положения метки ОЗА<sub>JB</sub> с учетом инерционности судна оператора включает следующие операции.

1) Находятся расстояние  $S_\theta$  и время  $t_\theta$  движения СО при повороте на угол  $\theta$  по формулам (1).

2) Криволинейные участки поворотов СО заменяется эквивалентными по времени прямыми отрезками длиной  $S_E$ . Длина промежуточного отрезка, курс и скорость СО на нем находятся по формулам (2).

3) Решением «треугольников скоростей» (рис. 4б) определяется относительный курс и скорость судна оператора:

$k_0, u_0$  – для движения судна оператора курсом  $K_0$  и скоростью  $V$ ;

$k_s, u_s$  – для движения судна оператора курсом  $K_s$  и скоростью  $V$ ;

$k_e, u_e$  – для движения судна оператора курсом  $K_E$  и скоростью  $V_E$ .

Расчет производится по формулам

$$\left. \begin{aligned} u_{ix} &= V_i \cdot \sin K_i - V_j \cdot \sin K_j \\ u_{iy} &= V_i \cdot \cos K_i - V_j \cdot \cos K_j \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} u_i &= \sqrt{u_{ix}^2 + u_{iy}^2} \\ k_i &= \arcsin(u_{ix} / u_i) \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где  $u_{ix}, u_{iy}$  – составляющие скорости  $u_i$  по осям  $ox$  и  $oy$ , где  $i=0, s, e$ .

4) По  $u_0$  и  $t_R$  определяется дистанция  $s_r$  (см. рис. 4,а)

$$s_r = u_0 \cdot t_R. \quad (6)$$

5) По  $u_e$  и  $t_\theta$  вычисляется эквивалентное расстояние  $s_e$ , которое за время поворота проходит судно оператора по отношению к «цели»

$$s_e = u_e \cdot t_\theta. \quad (7)$$

5) Определяются интервалы времени  $t_{A1}$ ,  $t_{A2}$  перемещения судна оператора от места  $0_A$  соответственно до точек  $A_1$ ,  $A_2$ . Эти значения находятся из систем уравнений (5), (6) с двумя неизвестными. Искомыми величинами в первой системе являются  $t_{A1}$  и время  $\tau_1$  движения ОС по отрезку  $\alpha_1, c_1$ . В системе уравнений (6) неизвестны  $t_{A2}$  и  $\tau_2$ , где  $\tau_2$  - время перемещения ОС по отрезку  $\alpha_2, c_2$ .

$$\left. \begin{aligned} u_{sx}t_{A1} + u_{0x}\tau_1 &= X_J - X_0 + d^s \cdot \cos k_0 - s_{ex} - s_{rx} \\ u_{sy}t_{A1} + u_{0y}\tau_1 &= Y_J - Y_0 - d^s \cdot \sin k_0 - s_{ey} - s_{ry} \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} u_{sx}t_{A2} + u_{0x}\tau_2 &= X_J - X_0 - d^s \cdot \cos k_0 - s_{ex} - s_{rx} \\ u_{sy}t_{A2} + u_{0y}\tau_2 &= Y_J - Y_0 + d^s \cdot \sin k_0 - s_{ey} - s_{ry} \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

Эти системы отражают (см. рис. 4, 5) составляющие относительных путей  $0, o_a, a_1, \alpha_1, c_1$  и  $0, o_a, a_2, \alpha_2, c_2$  судна оператора для расхождения с «целью» на расстоянии  $d^s$ .

Аналогично находятся промежутки времени  $t_{B1}$ ,  $t_{B2}$  следования судна оператора от места  $0_B$  соответственно до точек  $B_1$ ,  $B_2$  (по линии курса  $K_S$ ) из систем уравнений (8), (9), где  $\tau_3$ ,  $\tau_4$  - соответственно время движения ОС по отрезкам  $\beta_1, c_3$  и  $\beta_2, c_4$ .

$$\left. \begin{aligned} u_{sx}t_{B1} + u_{0x}\tau_3 &= X_J - X_0 - d^s \cdot \cos k_0 - 2 \cdot s_{ex} \\ u_{sy}t_{B1} + u_{0y}\tau_3 &= Y_J - Y_0 + d^s \cdot \sin k_0 - 2 \cdot s_{ey} \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} u_{sx}t_{B2} + u_{0x}\tau_4 &= X_J - X_0 + d^s \cdot \cos k_0 - 2 \cdot s_{ex} \\ u_{sy}t_{B2} + u_{0y}\tau_4 &= Y_J - Y_0 - d^s \cdot \sin k_0 - 2 \cdot s_{ey} \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

Эти системы составляются при рассмотрении относительного перемещения судна оператора по пути  $0, o_b, b_1, \beta_1, c_3$  и  $0, o_b, b_2, \beta_2, c_4$  (см. рис. 4, 5) для расхождения СО с «целью» на расстоянии  $d^s$ .

6) Определяются координаты концов  $M$ ,  $Z$  метки ОЗА<sub>JB</sub>

$$\left. \begin{aligned} X_M &= X_0 + 2 \cdot S_{EX} + V \cdot t_{B1} \cdot \sin K_S + V \cdot t_{A2} \cdot \sin K_0 \\ Y_M &= Y_0 + 2 \cdot S_{EY} + V \cdot t_{B1} \cdot \cos K_S + V \cdot t_{A2} \cdot \cos K_0 \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} X_Z &= X_0 + 2 \cdot S_{EX} + V \cdot t_{B2} \cdot \sin K_S + V \cdot t_{A1} \cdot \sin K_0 \\ Y_Z &= Y_0 + 2 \cdot S_{EY} + V \cdot t_{B2} \cdot \cos K_S + V \cdot t_{A1} \cdot \cos K_0 \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$



7) По этим значениям выделяются для отображения на экране метки, попавшие в ОДМ, и находятся координаты точки  $Q$  (см. рис. 3)

$$X_Q = (X_M + X_Z)/2, \quad Y_Q = (Y_M + Y_Z)/2. \quad (14)$$

Значения  $X_M$ ,  $Y_M$ ,  $X_Q$ ,  $Y_Q$ ,  $X_Z$ ,  $Y_Z$  используются в СПС для представления метки на экране дисплея и при расчете ДСПА.

### **Выводы и перспективы дальнейшей работы по данному направлению**

Полученный алгоритм позволяет вычислять метки порождаемых «целями» опасных при В-маневре зон акваторий с учетом динамики судна. Это повышает точность выбранных СО по этим меткам В-маневров и оценку опасности встречных судов.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Вагущенко Л.Л. Поддержка решений по расхождению с судами / Л.Л.Вагущенко, А.Л. Вагущенко. – Одесса: Феникс, 2010. – 296 с.
2. Демин С.И. Управление судном: учебник (для вузов) / С.И. Демин, Е.И.Жуков, Н.А. Кубачев и др.; под ред. В.И. Снопкова. – М.: Транспорт. 1991. – 359 с.
3. Мальцев А.С. Маневрирование судов при расхождении /А. С. Мальцев. – Одесса: Морской тренажерный центр, 2002. – 208 с.
4. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н.Н. Цымбал, И.А.Бурмака, Е.Е. Тюпиков. – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.