Глава 3

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МЕТОДЫ НАВИГАЦИИ

Русско-японская война, 2 мая 1904 года. Броненосный крейсер "Богатырь" (один из наиболее мощных крейсеров русского флота постройки 1901 года) вследствие недопустимой, граничащей с безответственностью лихости командующего эскадрой К. П. Иессена на переходе из Владивостока в Посьет в густом тумане на ходу в 10 узлов выскочил на камни мыса Брюса и до конца войны вышел из строя. Поэтому в бою крейсеров в Корейском проливе 1 августа 1904 года четырем броненосным и двум легким крейсерам японцев противостояло не четыре, а только три русских крейсера, один из которых, сильно устаревший и тихоходный "Рюрик", и погиб в результате неравного боя.

* * *

В главе 1 показано, что определение показателей НБП основано на знании характеристик точности измеряемых НП и места корабля. С другой стороны, задачи оценивания точности НП и места корабля в учебниках по навигации [15, 32 – 34, 38,, 104, 125] решены недостаточно полно. В частности, отсутствует оценка точности абсолютного, обсервационного, инерциального счисления, имеются неточности в решении задачи оценки погрешности места по заданному направлению, и решением охвачены не все стороны задачи. Данная глава компенсирует эти и другие недостатки теории и практики навигации.

3.1 Основные факторы, искажающие траекторию движения корабля

Проблема обеспечения НБП корабля состоит из двух проблем более низкого уровня – проблемы безопасности ЗТД корабля и проблемы удержания корабля на ЗТД с такой точностью, чтобы фактическая траектория движения (ФТД) не отличалась от ЗТД на величину, превышающую допускаемое отклонение. Правильное решение обеих проблем обеспечивает НБП корабля. Решение этих проблем основано на знании факторов, смещающих ФТД относительно ЗТД, и на умении правильно оценивать точность места корабля в различных условиях.

К факторам, искажающим траекторию движения корабля, относятся снос корабля течением и ветром, погрешности системы курсоуказания и лага, погрешности МСН определения места корабля, а также погрешности, допустимые уклонения и ошибки в управлении движением корабля по ЗТД. Большинство из этих факторов в литературе по навигации[33, 34, 38, 68, 113, 118, 125] не изучалось или рассматривалось недостаточно.

Статистические характеристики поверхностных течений океанов

В гидрометеорологии [24, 40, 41] рассматриваются такие характеристики морских течений, как скорость, направление перемещения водных масс и продолжительность течения. Задача оценивания точности счисления пути корабля и прогнозирования положения его места требует знания *статистических характеристик* течений. Эти характеристики рассматривались только в специальной литературе [70, 78], что заставляет нас уделить им достаточно внимания.

Течения океанов и морей можно подразделить с точки зрения возможности их учёта при определении погрешностей счисления на дрейфовые, недрейфовые, приливные и волновые.

Дрейфовое течение обусловлено влекущим действием ветра, дующего над морем в продолжение времени счисления t_C (далее будем также обозначать это время буквой t) или в промежутке одного часа до момента, на который рассчитывают показатель точности счисления. В штиль дрейфовое течение практически отсутствует. Это течение не следует путать с *ветровым*, например, пассатным или муссонным, которое кроме дрейфовой имеет еще и мощную градиентную составляющую. Скорость дрейфового течения $v_{др}$ на поверхности определяется выражением [27]

$$v_{др}=0{,}0127U_В/(\sin\varphi)^{0,5}\approx К_U U_В, \qquad (3.1.1)$$

где $U_В$ – скорость ветра в тех же единицах, что и скорость течения; φ - широта места; $К_U\approx 0{,}02$ – ветровой коэффициент; если величина $U_В$ выражена в м, а $v_{др}$ – в узлах, то $К_U \approx 0{,}04$. Направление дрейфового течения на поверхности отклонено от направление ветра на угол 45° вправо в северном полушарии и влево – в южном.

Величину СКЗ скорости дрейфового течения $\sigma_{др}$ выбирают из табл. 3.1.1 [70] по величине U скорости ветра, или рассчитывают по формулам, приведенным в табл. 3.3.1.

Таблица 3.1.1. Среднее квадратическое значение скорости дрейфового течения

U, м/с	5	10	15	20	25	30
$\sigma_{др}$, уз	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8

Дрейфовая составляющая СКЗ течения выделяется из общей совокупности составляющих течения, воздействующего на корабль, потому, что она может быть инструментально определена для конкретных условий плавания. СКЗ остальных составляющих рассчитываются по априорным данным о течениях.

Закон распределения (ЗР) вектора скорости дрейфового течения близок к прямоугольному. Если случайный вектор скорости течения разложить на ортогональные составляющие, то их ЗР близок к закону равномерной плотности.

Недрейфовое течение представляет собой сумму остальных составляющих течения, имеющих место в площади вокруг точки

местонахождения корабля или отрезка траектории его движения (за исключением волнового течения, рассматриваемого отдельно). Среди этих составляющих выделим *случайную* (сл), *регулярную* (рг) и *постоянную* (пст), не вдаваясь в причины происхождения этих составляющих.

Случайная составляющая представляет собой двумерный случайный процесс, обозначаемый $\boldsymbol{v}_{сл}(t)$. Каждая из её проекций на ортогональные оси (Северную и Восточную) характеризуется экспоненциальной АКФ $\rho(\tau)=e^{-\alpha|\tau|}$, где α - фактор затухания, τ - промежуток времени, для которого рассчитывается значение АКФ. Для движущегося корабля эта АКФ приобретает вид $\rho(\tau)=e^{-\alpha|\tau|(1+V/11,2)}$, где V – скорость корабля, узлы, приведенный в табл. 3.3.3. [78, 70]. Заметим, что случайные величины обычно обозначаются латинскими заглавными буквами X, Y, Z, V, …, а их конкретные значения – строчными буквами x, y, z, … . Для случайных процессов используются символы X(t), Y(t), Z(t) … . Мы вынуждены обозначить случайный процесс течения $\boldsymbol{v}_{сл}(t)$, поскольку в навигации принято символом V обозначать скорость корабля, а v (с подстрочными знаками при необходимости) - скорость течения и сноса корабля. Жирными буквами в тексте обозначаются векторы.

Регулярная составляющая течения (периодическая по воздействию на движущейся корабль) также представляет собой двумерный случайный процесс, нордовая и остовая составляющие которого характеризуются экспоненциально-косинусной АКФ вида $\rho(\tau)=e^{-\alpha|\tau|}\cos\beta\tau$, где β - характерная частота процесса течения. Регулярная составляющая течения имеет место в районах приливных, инерционных, вихревых течений при пересечении вихря траекторией движения корабля, а также в океанах на больших глубинах, превышающих 500-1000 м (приливное течение).

Постоянная составляющая течения (по воздействию на движущееся корабль) чаще всего имеет место в ограниченном районе маневрирования, расположенном в области действия вдольберегового или вихревого течения при размерах вихря, значительно превосходящих размеры района. На отрезке времени, не превышающем половину интервала корреляции постоянного течения, оно характеризуется АКФ ρ(t) = 1. При большем времени счисления t АКФ $\rho(t)=\exp(-\alpha_{пст}|t|)$.

Обычно в любом океанском районе плавания или по маршруту движения корабля действуют все три составляющие, одна из которых является превалирующей по величине СКЗ. Оценки вероятности превалирования каждой из трех рассматриваемых составляющих в навигационном слое вод равны $P_{сл}$=0,63, $P_{рг}$=0,29 и $P_{пст}$=0,08 [70]. Отсюда можно сделать вывод, что в открытых районах океанов течения в навигационном слое являются преимущественно случайными.

Регионы характера течений и области скорости течений. При оценивании точности счисления необходимо рассматривать четыре вида условий плавания судов (или четыре региона течений). Сюда относятся регионы:

а) преимущественно случайных течений (в основном открытые области океанов – «океанское плавание»);

б) преимущественно регулярных течений;

в) преимущественно постоянных течений;

г) регионы, в которых вероятности превалирования случайной и регулярной составляющих соизмеримы (например, Норвежское, Гренландское и некоторые другие моря).

В силу того, что математические ожидания M_j всех рассматриваемых j – x составляющих могут быть рандомизированы и, кроме того, величины $M_{сл}$ и $M_{рг}$, как правило, бывают меньше соответствующих средних квадратических отклонений (СКО), величину среднего квадратического значения (СКЗ) модуля вектора скорости не дрейфовой составляющей можно определить как квадратичную сумму

$$\sigma_{ндр}=(\sigma^2_{сл}+\sigma^2_{рг}+\sigma^2_{пст})^{0,5}, \qquad (3.1.2)$$

где $\sigma_{сл}$, $\sigma_{рг}$, и $\sigma_{пст}$ -- СКЗ случайной, регулярной и постоянной составляющих модуля вектора скорости недрейфового течения. Однако в настоящее время СКЗ отдельных составляющих в большинстве условий плавания не известны и они не могут быть идентифицированы в судовых условиях. Поэтому оценка точности счисления основывается на априорных значениях СКЗ $\sigma_{ндр}$. Изучение статистических характеристик течений океанов и морей, выполненное в период подготовки документа [70], позволяет заключить, что, как правило, в любом регионе, определяемом видом АКФ течений, существуют 3 - 4 области, различающиеся скоростью течений. Это области очень сильных (Iос), сильных (I), средних (II) и слабых (III) течений. В некоторых регионах и морях отсутствует область Iос. Карта течений океанов приведена на рис. 3.1.1. На карте показаны: жирными линиями—очень сильные течения, двойными линиями – сильные, одинарными сплошными – средние и пунктирными – слабые течения. Соответствующие области скорости течений расположены по сторонам от этих линий.

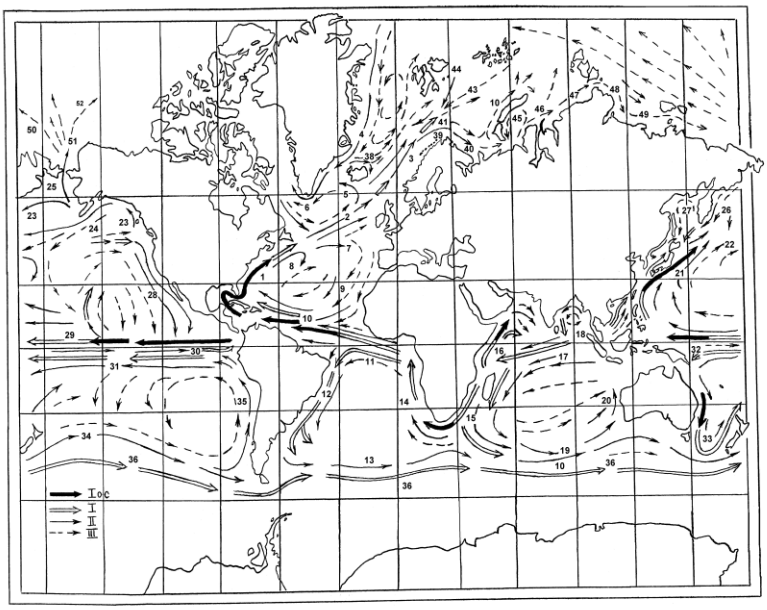

Рис. 3.1.1 Основные течения океанов

Карта областей скорости течений Мирового океана приведена в Дополнении к [70].

Значения априорных статистических характеристик поверхностных (в навигационном слое вод) недрейфовых течений – СКЗ $\sigma_{ндр}$ и интервалы корреляции τ_T в зависимости от скорости хода корабля V по областям скорости течений океанов, а также соответствующие им коэффициенты точности счисления приведены в табл. 3.1.2.

Таблица 3.1.2. Статистические характеристики поверхностных недрейфовых течений океанов и коэффициенты точности счисления

Область течений	СКЗ $\sigma_{ндр}$, уз	Коэфф. K_{C1}, уз	Интервал корреляции τ_T, ч, для V, уз, коэффициент K_{C2}, уз·ч ^{0,35}					
			V = 5		V = 15		V = 25	
			τ_T	K_{C2}	τ_T	K_{C2}	τ_T	K_{C2}
I ос	1,30	1,3	12,0	3,0	9,0	2,7	6,0	2,4
I	0,91	0,9	9,0	1,9	5,6	1,6	4,0	1,4
II	0,61	0,6	4,9	1,0	3,0	0,9	2,2	0,8
III	0,36	0,35	2,7	0,5	1,7	0,4	1,2	0,4

ПРИМЕЧАНИЕ. Для расчёта табличных величин и построения карты течений использовано свыше миллиона значений скорости течений.

Приведенные в табл. 3.1.2 значения интервала корреляции представляют собой средние значения. На самом деле интервал корреляции течения по направлению стрежня течения примерно втрое больше, а в перпендикулярном направлении – вдвое меньше показанного в таблице значения. Вообще течения океанов и морей представляют собой сложные случайные поля. Их не следует представлять как сплошные струи вод, движущихся в одном направлении, как на прямых участках рек (за исключением, может быть, пассатных и муссонных течений). Скорее поля течения надо понимать, как совокупность турбулентных потоков, сравнимых с дымом от костра, уносимого ветром. Разумеется, другого временного и пространственного масштаба.

Волновое течение обусловлено поступательным движением гребней волн со скоростью $v_{гр}$, зависящей от высоты волн h_B. Это течение не надо путать с дрейфовым течением. Оно существует, например, при отсутствии ветра и наличии зыби. Скорость v_{BT} волнового течения выражается функцией [27]

$$v_{BT}=v_{гр}(\pi h_B/\lambda)^2\exp(-2\pi z/\lambda), \qquad (3.1.3)$$

где h_B и λ – высота и длина волны, м, z – горизонт глубины, на котором определяется скорость течения. Направление волнового течения совпадает с направлением распространения волн. Применяя к (3.1.3) теорему об СКП функции [24] и ограничиваясь существенными составляющими, получим выражение для СКЗ σ_{vBT} волнового течения

$$\sigma_{VBT} = k_1 m_{Vгр}\exp(-k_2 z/h_B), \qquad (3.1.4)$$

где $k_1=(\pi h_В/\lambda)^2$; $k_2=2\pi h_В/\lambda$ - коэффициенты, принятые для упрощения записи и решения; $m_{Vгр}$ – СКЗ скорости движения гребней волн. Для уменьшения числа переменных будем рассматривать отношение К= $h_В/\lambda$, которое приблизительно можно считать равным на основании [38] 0.07 при малой крутизне (и высоте) волны; 0,14 при средней крутизне и 0,2 при большой крутизне (и высоте) волны. Если предположить, что скорость $V_{гр}$ распределена внутри диапазона 0…20 уз равномерно, то СКО $m_{Vгр}$ можно определить как $m_{Vгр}\approx 10/\sqrt{12}$ =2,9 уз. При сделанных предположениях по (3.1.4) рассчитана табл. 3.1.3, позволяющая приблизительно оценить СКЗ скорости волнового течения в разных условиях плавания. По характеру проявления волновое течение является постоянным в пределах постоянства показателей волнения.

Таблица 3.1.3. СКЗ скорости волнового течения $m_{vВТ}$, уз

Осадка корабля, м	Высота волны $h_В$, м			
	4	6	8	10
0	0,25	0,35	0,45	0,6
4	0,15	0,2	0,3	0,4
8	0,05	0,1	0,15	0,2

ПРИМЕЧАНИЯ: 1) При известной скорости $V_{гр}$ табличное значение $m_{vВТ}$ умножают на $0{,}1V_{гр}$.

2) Данные табл. 3.1.3 можно использовать также и для учёта вектора скорости волнового течения в счислении, принимая $v_{ВТ}\approx 3m_{vВТ}$.

СКЗ модуля вектора скорости сноса корабля течением (или СКЗ скорости течения) рассчитывают по формуле

$$\sigma_{сн\,Т}=\sigma_{Т}=(\sigma^2_{др}+\sigma^2_{ндр}+\sigma^2_{vВТ})^{0,5}. \qquad (3.1.5, а)$$

Изменение СКЗ течения с увеличением глубины моря характеризуется в среднем коэффициентами перехода к произвольному горизонту $К_{h1}$ в областях Iос, I и II океанов, открытых и полуоткрытых морей, $К'_{h1}$ в области III океанов, $К_{h2}$ для дрейфового течения. Волновое течение затухает на глубинах 20 – 25 м. Для закрытых морей сведения о скорости течений на разных глубинах обычно содержатся в атласах течений морей. При отсутствии таких сведений можно использовать коэффициент $К_{h2}$. СКЗ скорости течения на горизонте h рассчитывают по формуле

$$\sigma_{Th}=0{,}01К_h\sigma_{Т}, \qquad (3.1.5, б)$$

где $К_h$ – общее обозначение коэффициентов произвольного горизонта, выбираемых из табл. 3.1.4.

Таблица 3.1.4. Значеня коэффициентов $К_h$, сотые доли

Коэффициент	**Горизонт глубин, м**

	0	20	40	60	100	200	400	800
$К_{h1}$	100	82	76	69	52	38	27	13
$К'_{h1}$	100	98	96	91	72	56	52	47
$К_{h2}$	100	60	40	20	0	0	0	0

Атласы течений океанов. Основная информация в таких атласах представляет собой вероятностную характеристику течений по квадратам, на которые разбита площадь океанов. В каждом квадрате представлена «роза течений» - совокупность векторов, которая показывает скорость течений по разным направлениям и их частость. Качество этих данных, как правило, низкое из-за малого количества измерений и невысокой точности обсерваций в периоды составления атласов. Специальная проверка возможности использования этих данных в счислении показала, что с их учётом точность счисления не повышается, а часто даже и ухудшается [40]. Поэтому навигационные пособия по течениям должны характеризоваться их навигационной эффективностью – степенью повышения точности счисления при использовании содержащихся в атласах данных. При отсутствии такой характеристики использование пособий по течениям океанов в счислении нецелесообразно.

Характеристика морских и прибрежных течений

По своему положению относительно океанов моря подразделяются на открытые, полуоткрытые и внутренние (средиземные) [41].

Открытые моря представляют собой участки океанов. Свойства течений этих морей мало отличаются от океанских и достаточно полно характеризуются с помощью рис. 3.1.1 и табл. 3.1.2.

Полуоткрытые моря характеризуются равнозначностью случайной и регулярной составляющих течений (Гренландское, Норвежское, Охотское моря и др.) или превалированием регулярной (приливной) составляющей (Баренцево, Северное, Берингово (кроме района Восточно-Камчатского течения) моря и др.).

Внутренние моря (Балтийское, Средиземное, Чёрное, Японское моря и др.) не имеют широкого выхода к океану. Поэтому в них практически отсутствуют приливные течения (исключая небольшие по площади участки, примыкающие к проливам, например, западная часть моря Альбарана в Средиземном море). В этих морях главную роль играют ветровые и дрейфовые течения, образующие специфическую циркуляцию вод с завихрениями большого и малого размера. Для примера карта циркуляции вод Балтийского моря, соответствующей господствующим ветрам, представлена на рис.3.1.2 [40, 117].

Для течений внутренних морей, так же, как и для океанских течений, характерна «турбулентность», накладывающаяся на общую циркуляцию вод, и зависимость скорости и СКЗ течений от состояния атмосферы – от положения проходящих атмосферных фронтов.

СКЗ скорости течений $\sigma_{\text{Т}}$ в Балтийском, Чёрном, Японском и, возможно, в других внутренних морях примерно такой же площади, можно

определить, как функцию от скорости ветра $U_В$ (в баллах по шкале Бофорта) в точке местонахождения корабля по приближенным формулам:

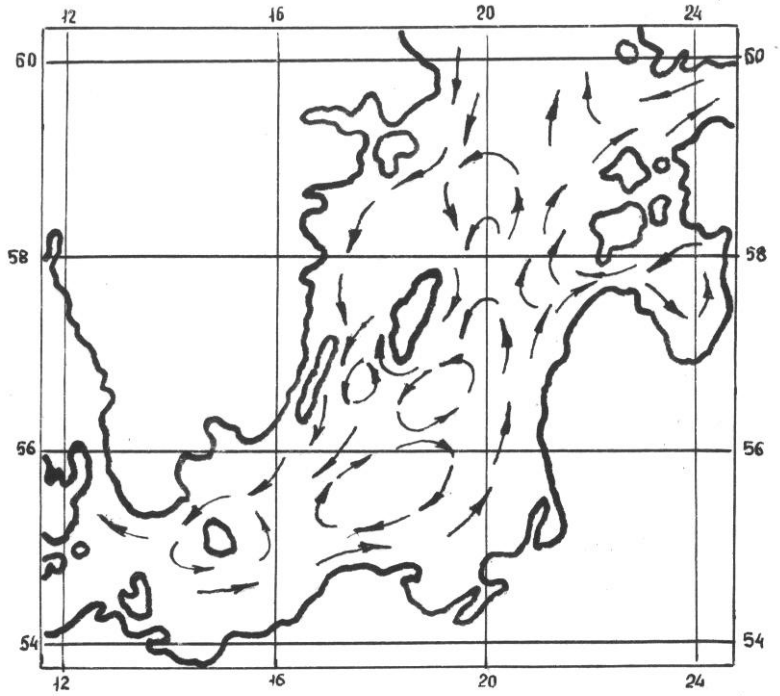

Рис.3.1.2 Циркуляция вод Балтийского моря

- летом $\sigma_Т = К_{РП}(0{,}1+0{,}07U_В)$, уз; (3.1.6, а)
- зимой $\sigma_Т = К_{РП}(0{,}2+0{,}075U_В)$, уз, (3.1.6, б)

где $К_{РП}$ - коэффициент района плавания, равный соответственно 1; 0,85 и 0,7 в южной, средней и северной частях Балтийского моря (без заливов), для которого выражения (3.1.6) являются точными (получены по материалам более, чем 400 буйковых станций и записям элементов течений на плавучих маяках за несколько лет). Для других морей $К_{РП}$=1 и формулы (3.1.6.) являются приближенными.

Характер случайных процессов течений, воздействующих на движущийся корабль, зависит от вида плавания корабля. При плавании в ограниченном районе (например, в полигоне), размеры которого много меньше диаметра вихря течения, в пределах которого расположен район, течение имеет преимущественно постоянный характер (при одних и тех же погодных условиях). На постоянную составляющую течения накладывается «турбулентная» составляющая. В этом случае АКФ течения имеет вид ρ(t)=1 или экспоненциальной функции в случае изменения погоды.

При плавании через море или его значительную часть (при межбазовом переходе) корабль пересекает вихри течений, что придаёт сносу корабля течением периодический характер. В этом случае АКФ чаще всего имеет вид экспоненциально-косинусной функции с характерным периодом $T^*=d_В/V$, где $d_В$ – длина диаметра или хорды вихря течения на линии пути корабля; V – скорость корабля. Для иллюстрации на рис. 3.1.3 показаны графики северной и восточной составляющих сноса корабля течением, наблюдавшихся при пересечении кораблем вихря течения в Ионическом море. Можно увидеть и сравнительно долгопериодные составляющие сноса, имеющие квазипериодический характер, и случайные колебания меньшей амплитуды.

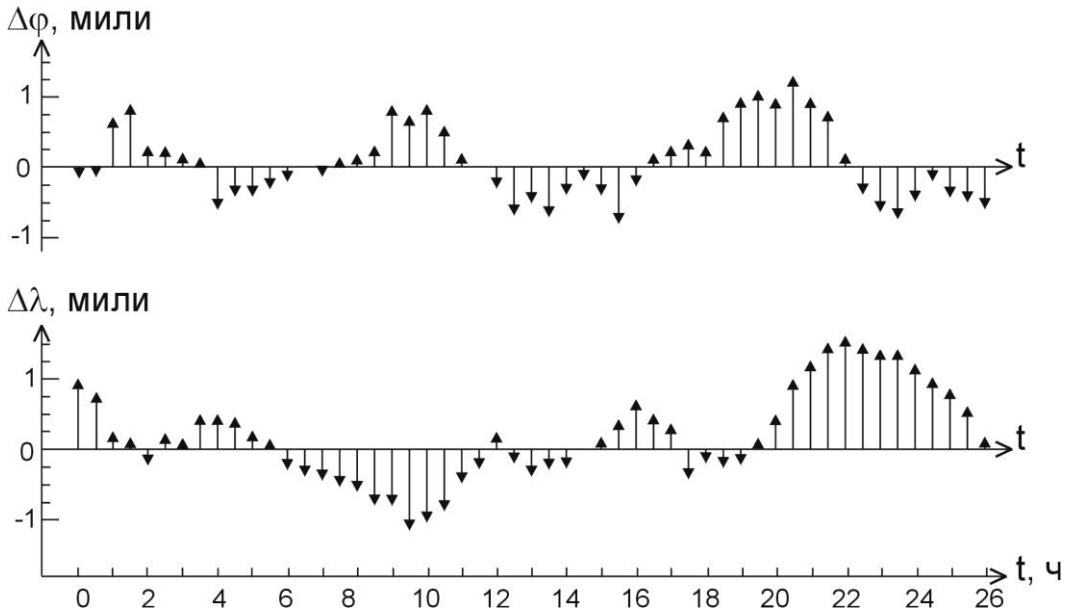

Рис. 3.1.3 Графики северной и восточной составляющих сноса корабля вихревым течением при пересечении кораблем Ионического моря

СКЗ скорости течений σ_T в Баренцевом море. Море включает в себя 4 области скорости течений (рис. 3.1.4).

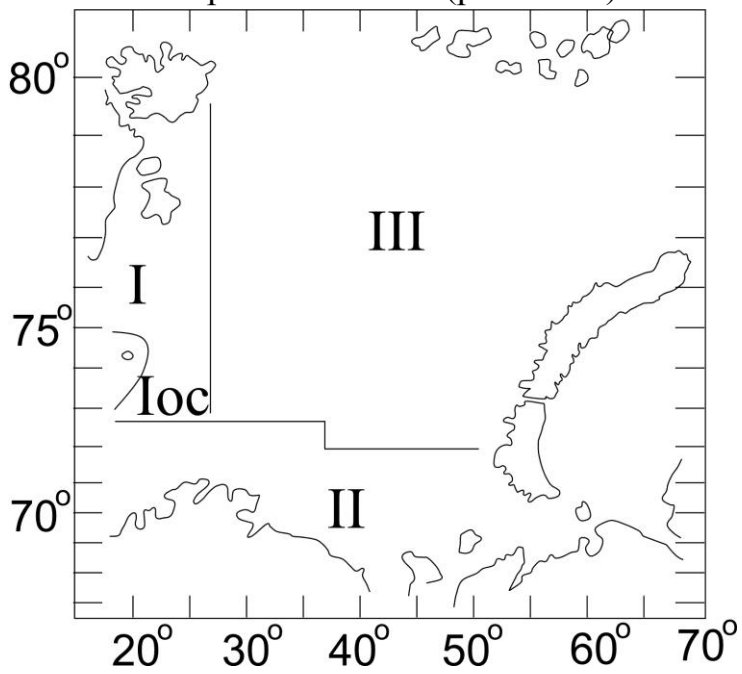

Рис. 3.1.4. Области СКЗ течений Баренцева моря

Небольшая по площади область Ioc расположена в пределах течения о. Медвежий восточнее острова. Область I занимает остальную часть площади этого течения. Область II простирается в юго-западной и южной части моря на 100 -120 миль от Мурманского берега. Северную, среднюю и восточную части моря занимает область III. Более точно определяют область, в которой находится корабль, с помощью атласа течений. Для этого рассчитывают СКЗ скорости течения по формуле $\sigma_T=(\sum v^2_i/N)^{0,5}$, где v_i – значения МВСТ с дискретностью 2 ч, выбранные из атласа за период изменения течения в месте плавания корабля; $\sum=\sum_{i=1}^{n}$ – символ суммирования от i=1 до N (здесь и далее); N – количество значений скорости течения. СКЗ течения рассчитывают по (3.1.5,а), в которой $\sigma^2_{ндр}=K^2_{прл}(\sigma^2_C+\sigma^2_{ПС})$ – сумма СКЗ суточной и полусуточной составляющих приливного течения; $K_{прл}=0,047\rho_0-1,674$; ρ_0 – горизонтальный экваториальный параллакс Луны, выбираемый из МАЕ на

период плавания. Суточная составляющая зависит не только от фазы и параллакса Луны, но и от её склонения, поэтому приведенные в табл. 3.1.5 значения СКЗ $\sigma_{ндр}$ отнесены к условиям существования максимаьного и минимального СКЗ.

Таблица 3.1.5. СКЗ $\sigma_{ндр}$, узлы, суммы приливных и постоянных приповерхностных течений Баренцева моря

Значение СКЗ	Область скорости течений			
	Iос	I	II	III
Минимальное	1,10	0,62	0,46	0,27
Максимальное	1,56	0,85	0,62	0,45

Характерный период изменения МВСТ Т*=12,4 ч. СКЗ дрейфового и волнового течений выбирают из табл. 3.1.1 и 3.1.3.

СКЗ скорости течений σ_T в Средиземном море. Море включает несколько областей скорости течений, которые показаны на рис. 3.1.5.

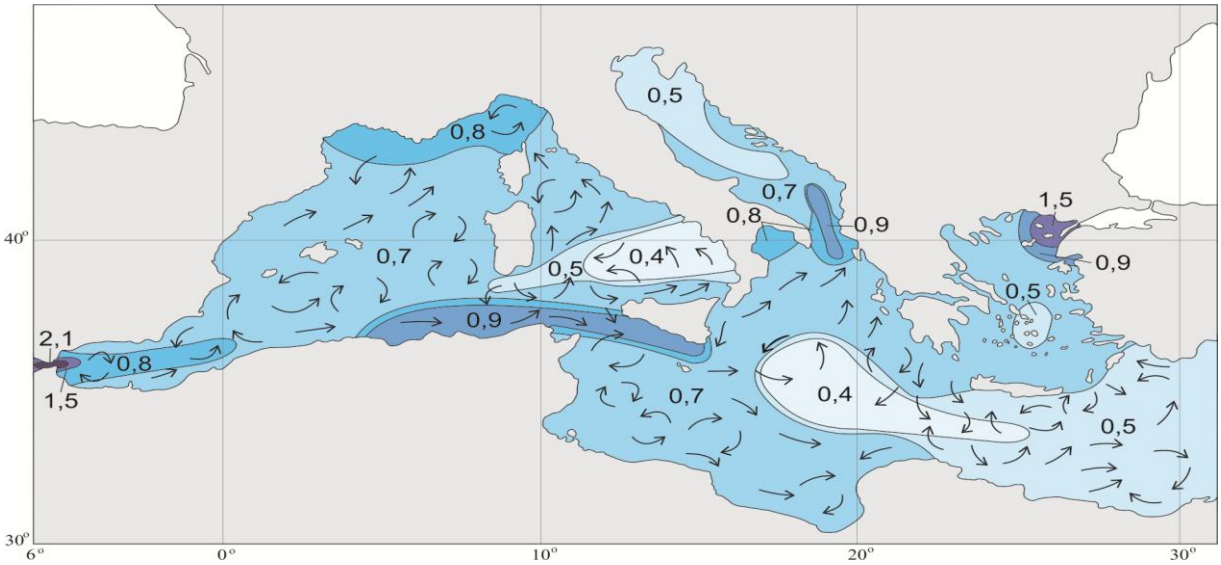

Рис. 3.1.5. Области СКЗ течений Средиземного моря

СКЗ скорости течения определяют по (3.1.5,а), в которой $\sigma_{ндр}=\sigma_{крт} \pm \Delta\sigma$, где $\sigma_{крт}$ – СКЗ недрейфового течения, снимаемая с карты течений; $\Delta\sigma$ = 0,1 уз. – дополнение, учитывающее условия погоды в районе плавания корабля, которое берётся со знаком плюс в штормовых условиях и с минусом при хорошей погоде.

Закон распределения скорости течений. Сведений о ЗР скорости океанских и морских течений в литературе найти не удалось. Эта задача для модуля вектора скорости течения (МВСТ) в навигационном слое вод в первом приближении решена с использованием атласов течений [4, 11, 98].

Атласы содержат информацию о распределении МВСТ (частости значений скорости) и направления течения (частости значений направления), полученную в результате обработки материалов буйковых станций большой продолжительности. Эта информация имеет вид гистограмм распределения скорости и направления течений и позволяет идентифицировать форму ЗР скорости течений нестандартным способом,

который состоит в следующем. Для каждой точки наблюдений рассчитаны СКЗ скорости течения по классической формуле [24]

$$\sigma_{\text{Т}}=(\sum v^2_i p_i)^{0,5}, \qquad (3.1.7)$$

где v_i – значение скорости в i–м разряде гистограммы; p_i–соответствующая ему частость; $\sum=\sum_{i=1}^{n}$ – символ суммирования от i=1 до N; N – количество разрядов. После этого для каждой точки наблюдений вычислены предельное нормированное значение МВСТ, представляющее собой коэффициент $K_{h\text{Т}}$ перехода от СКЗ скорости течения к предельному значению, (которому приписывается большая доверительная вероятность, например, $P_{\text{дв}}$=0,997), по формуле

$$K_{h\text{Т}}=v_{max}/\sigma_{\text{Т}}, \qquad (3.1.8)$$

где v_{max}– наибольшее значение последнего разряда гистограммы МВСТ. Величину $K_{h\text{Т}}$ можно использовать для расчёта предельного значения МВСТ для совокупности измерений скорости течения в данной точке при большой заданной вероятности P‘=0,997 по формуле

$$v\hat{}=v_h=K_{h\text{Т}}\sigma_{\text{Т}}, \qquad (3.1.9)$$

Полученные результаты позволяют сделать суждение о двумерном и одномерном ЗР скорости течения. Для этого с гистограммы направления течения для рассматриваемой точки снимают два значения частости: первое (a) соответствует наиболее вероятному направлению течения $K_{\text{В}}$, второе (b) – направлению $K_{\text{В}} \pm 90^{\circ}$. Соотношение $e=b/a$ характеризует степень сжатия тензора течения. Теперь можно оценить форму ЗР скорости течения следующим образом. Для полученного значения e и вероятности 0,997 сопоставим эмпирическое значение $K_{h\text{Т}}$ с табличными квантилями $K_{h\text{М}}$ предельного перехода для радиальной СКП, приведёнными в табл. 3 приложения. Например, для e=0,6 коэффициенты $K_{h\text{М}}$ равны соответственно 1,49; 2,47 и 3,91 для ЗР равномерной плотности, Гаусса и Лапласа. В результате расчётов для региона случайных течений средние значения величин оказались равными e^*=0,6; $K^*_{h\text{Т}}$=1,64, и в качестве двумерного ЗР скорости течений можно принять ЗР равномерной плотности с небольшим сдвигом в сторону ЗР Гаусса. Это даёт возможность в дальнейшем с помощью табл. 3 приложения рассчитывать коэффициент перехода от СКЗ к предельному значению МВСТ для любой заданной вероятности. Кроме того, сделанное суждение о форме двумерного ЗР распространяется также и на форму одномерного ЗР составляющих скорости течения по осям координат.

На основании выполненного анализа можно сделать вывод о том, что в морях и океанах течения присутствуют практически всегда. По всем рассмотренным данным частость того, что скорость течения не превысит 0,1 уз., оказалась равной 0,04. Поэтому приходится считать необоснованными

способы классической навигации, касающиеся учёта и определения дрейфа в предположении, что течение отсутствует.

Атласы морских течений. Сведения о морских течениях содержатся в атласах течений и приводятся на навигационных картах. Специальные исследования эффективности этих источников информации показали, что при использовании в счислении значений направления и скорости приливных течений точность счисления возрастает на 15 – 20% при плавании в Баренцевом и на 20 – 30% в Северном море [78]. Для морей со случайными течениями и океанов остаётся справедливым вывод [18] о нецелесообразности использования в счислении данных о течениях, выбранных из атласов течений, если не определена навигационная эффективность атласов.

Прибрежные течения можно подразделить на вдольбереговые, дрейфовые, устьевые, течения проливов и внутренних акваторий.

Вдольбереговое течение представляют собой геометрическую сумму дрейфового и градиентного течений. Вблизи от берега оно имеют общее направление вдоль береговой черты, на которое накладываются явления «турбулентности», вызванные изгибами берега, отмелей и рельефом дна. Скорость установившегося вдольберегового течения зависит от угла γ между направлениями ветра и береговой черты. При $\gamma \approx 0^{o}$ $v_{T}>0{,}04U_{B}$; при $\gamma \approx 90^{o}$ $v_{T} \approx 0{,}04U_{B}$, где v_{T} в узлах, U_{B} – в м/с. С удалением от береговой черты скорость течения уменьшается до скорости течения открытого моря. Вдольбереговые течения прослеживаются на расстоянии до 30 миль от приглубого берега и на ещё большем расстоянии от мелководного берега. Вдольбереговые течения доставляют заботу для штурманов тем, что в большинстве случаев действуют поперёк морских каналов и линий навигационных створов и сносят корабль с линии створа при движении по нему. В январе 2007 г. контейнеровоз «Капитан Артюх» под управлением старшего помощника на выходе из Петропавловска уклонился от входного створа и коснулся грунта. Через пробоину было затоплено машинное отделение.

Устьевые течения крупных рек образуются стоком речной воды, которая вызывает повышение уровня и возникновение стоковых течений на устьевом взморье. Кроме того, пресные речные воды создают пространственную неоднородность поля плотности верхнего слоя вод и перемещение водных масс. Влияние крупных рек на характер прибрежных течений прослеживается до расстояний в 20 – 30 миль. Для этих течений характерна значительная изменчивость по направлению и скорости, что затрудняет условия плавания судов. Имеют место также устьевые приливные течения на устьевом взморье узких заливов, например, Кольского, которые могут иметь большую скорость и влиять на судоходство на значительных расстояниях (10 миль и более).

Течения проливов, связанных с океаном, характеризуются высокими значениями скорости и большой изменчивостью вследствие приливных явлений. Течения проливов, соединяющих моря, имеют специфические причины возникновения или определяются ветром. Особенностью течений

проливов является их хорошая изученность и наличие соответствующей информации в атласах течений и на навигационных картах. Это же можно сказать о течениях акваторий узких заливов (губ, лиманов и т. д.), ведущих к гаваням.

Статистические модели погрешностей средств определения места

Спутниковые навигационные системы. Ссреднеорбитная глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС) состоит из отечественной Глобальной спутниковой навигационной системы (ГЛОНАСС) и американской Global Positioning System (GPS). Статистические характеристики погрешностей GPS – значения радиальной СКП М и интервала корреляции $\tau_К$ для флюктуационной (Фл), среднепериодной (Сп), долгопериодной (Дп) и сверхдолгопериодной (Сдп) составляющих и для полной погрешности в условиях спокойной ионосферы приведены в табл. 3.1.5. В условиях возмущенной ионосферы – во время захода и восхода Солнца и в период магнитных бурь радиальная СКП определения места увеличивается и может достигнуть величины $М_{взм}$ =8–10 м.

Таблица 3.1.6. Показатели точности GPS при спокойной ионосфере

Код сигнала	Параметр	Составляющая погрешности				Полная радиальная СКП
		Фл	Сп	Дп	Сдп	
Р-код	М, м	1,5	2,6	1,5	4,0	3,9
	$\tau_{К,}$ мин	0,5	1,6	15	55	-
С/А-код	М, м	15	-	-	-	35-15
	$\tau_{К,}$мин	0,5	-	-	-	-

Радиальную СКП $М_{С/А}$ при работе GPS в С/А-коде в зависимости от количества *N* спутников в рабочем созвездии, можно рассчитать по формуле $М_{С/А}$=33-1,75(*N*-4), м. Например, при *N* =10 радиальная СКП $М_{С/А}$=23 м.

Коэффициент корреляции погрешностей определения широты и долготы при работе в Р-коде весьма велик: $r_{ШД}$=0,7÷0,9 зимой и $r_{ШД}$=0,3÷0,5 летом. При С/А-коде $r_{ШД}$=0.

ЗР погрешностей ГНСС характеризуется эксцессом (*E*), который равен в среднем E^*=1,64. При рассмотрении ЗР погрешностей применительно к количеству N спутников в рабочем созвездии *E*=0,42. Следовательно, если оценка точности обсервованного места производится в среднем (принимается значение М из табл. 3.1.6), то для характеристики погрешностей должен быть принят закон М-распределения (см. далее). Если же оценка точности производится для конкретного количества N, то подходящим является закон Гаусса.

Радиальная СКП измерения вектора истинной скорости корабля в условиях спокойной ионосферы составляет величину $М_V$=0,1÷0,2 уз.

Погрешности НП при пеленговании береговых ориентиров складываются из погрешностей курсоуказания (выработки курса) с СКП $m_К$, пеленгования с СКП $m_{пел}$, графических построений на карте с СКП $m_{гр}$ и положения ориентира $m_{ор}$. Суммарная СКП m_U определяется выражением

$$m_U=(m^2_{\text{К}}+m^2_{\text{пел}}+m^2_{\text{гр}}+m^2_{\text{ор}})^{0,5}. \qquad (3.1.10)$$

Погрешности курсоуказания определяются прежде всего типом курсоуказателя. СКП курсоуказания для некоторых гирокомпасов (ГК), гирокурсоуказателей (ГКУ) в гирокомпасном режиме, магнитного компаса (МК) и инерциальной навигационной системы (ИНС) равны в благоприятных условиях эксплуатации (в скобках – в неблагоприятных условиях) следующим значениям:

ГК «Амур-3М» 1,5° (5°); ГК «Курс-5», «Курс-10» 0,8° (2,5°);
ГКУ-2 1° (1,3°); ГКУ-5 «Гюйс» 0,5÷0,8° (1,5°);
МК 1÷2° (3÷4°); ИНС «Ладога» 0,05° (0,05°).

Благоприятными условиями считается работа при качке, не превышающей 3°, и на постоянном курсе корабля. Неблагоприятные условия возникают на качке и при резкопеременном маневрировании корабля.

Интервал корреляции погрешностей ГК (затухающих колебаний) равен 30÷40 мин; для ГКУ 30÷50 мин, для МК 0,2 мин и для ИНС 5 ч.

Закон распределения погрешностей выработки курса зависит от условий плавания и работы курсоуказателей: в благоприятных условиях имеет место ЗР гармонической функции, в очень неблагоприятных условиях – ЗР Лапласа. Поэтому для промежуточных условий в качестве усредняющего может быть принят ЗР М-распределения.

Поскольку параметры точности МСН курсоуказания рассчитвны на основании данных технической документации, а не определены по экспериментальным данным, то фактические СКП курсоуказания могут быть примерно в 1,5 раза больше приведённых значений. Нужно иметь в виду также, что в технической документации на МСН в качестве показателей точности чаще всего приводятся *максимальные погрешности*, переход от которых к СКП осуществляют по (1.1.4).

Погрешности пеленгования определяются типом пеленгатора. Точность пеленгаторов характеризуется постоянной $m_{\text{пст}}$ и случайной $m_{\text{сл}}$ составляющими СКП пеленгования. Для пеленгатора ПГК-2 $m_{\text{пст}}\approx 0{,}3^{\circ}$; $m_{\text{сл}}\approx 0{,}5^{\circ}$; для более новых пеленгаторов $m_{\text{пст}}=0{,}1^{\circ}$; $m_{\text{сл}}=0{,}1^{\circ}$; для пеленгатора магнитного компаса $m_{\text{пст}}=0{,}5\div 0{,}7^{\circ}$; $m_{\text{сл}}=0{,}5\div 0{,}7^{\circ}$.

Погрешность графических построений на карте определяется экваториальным масштабом карты *С*. СКП графических построений при максимальной тщательности работы с учётом глазомерной интерполяции расстояний по рамке карты принимают равной [102] $m_{\text{гр}}=0{,}5$ мм в масштабе карты при измерении и откладывании расстояний и $m_{\text{гр}}=0{,}2^{\circ}$ при измерении и прокладывании углов. Поэтому СКП $m_{\text{гр}}=50C/100\,000=C/2000$, м; радиальная стандартная погрешность $\text{М}_{\text{гр}}=70C/100\,000=C/1400$, м. При работе на дисплее ЭНИС стандартная погрешность положения объектов и курсоров на изображении карты равна 0,3 мм в масштабе изображения. СКП совмещения курсора с объектом принимается равной 0,5÷0,7 мм, и СКП $m_{\text{гр}}$ и $\text{М}_{\text{гр}}$ имеют ту же величину, что и на бумажной карте или в 1,5 раза больше. В случае автоматической обработки пеленгов погрешность графики отсутствует.

Погрешности положения ориентиров в лучшем случае соизмеримы с погрешностями графических построений, поэтому $m_{ор} \geq m_{гр}$. Если на судне курсоуказателем является ГК или ГКУ, то обе погрешности $m_{гр}$ и $m_{ор}$ являются слабодействующими и величины $m_{ор}$ и $m_{гр}$ обычно в (3.1.11) не учитывают. Когда курсоуказателем является ИНС, учёт этих погрешностей в (3.1.11) необходим. При определении ОМ с помощью НВС погрешность $m_{гр}=0$ и требуется принимать в расчёты погрешности положения ориентиров.

При оценивании точности ОМ, полученного по двум или нескольким пеленгам, рассматривают погрешности системы из n измеренных пеленгов. СКП каждого из берущихся почти одновременно пеленгов m_j представляет собой сумму общей для всех измеренных пеленгов СКП $m_{об}$ и частной СКП $m_ч$, характерной для каждого пеленга. В случае пеленгования с одного пилоруса эти СКП рассчитывают по формулам:

$$m_j=(m^2_{об}+m^2_{чj})^{0,5};\ m^2_{об}=m^2_К+m^2_{пст};\ m^2_{ч\,j}=m^2_{сл}+m^2_{гр}+m^2_{ор}. \qquad (3.1.11)$$

Если пеленгование ведется с двух пилорусов, то СКП $m_{пст}$ переходит из общей в частную составляющую. Коэффициент корреляции погрешностей каждой пары пеленгов рассчитывают по $r_{ij}=m^2_{об}/m_i m_j$.

Точность измерения дистанции с помощью РЛС при ручных измерениях зависит главным образом от расстояния до ориентира, качества ориентира, используемой шкалы РЛС и мастерства оператора в совмещении подвижного круга дальности (ПКД) с ориентиром. Расстояние до ориентира влияет на точность измерения двояко. Во-первых, инструментальная погрешность РЛС возрастает пропорционально увеличению дистанции. Во-вторых, на большом расстоянии до берега отражение радиолокационных сигналов происходит не от уреза воды, а от некоторого «горизонта» местности, высота которого над уровнем моря зависит от переменных факторов распространения сигналов и, как правило, неизвестна. В условиях равнинной местности отражение сигналов может происходить от линии дюн. Поэтому место корабля по очень удалённым ориентирам определять не следует.

По своему качеству радиолокационные ориентиры подразделяются на точечные, например, отдельные скалы, мелкие острова, гидротехнические сооружения, встречные суда на больших расстояниях, и протяжённые – участки береговой черты. Характерные мысы береговой черты и «блестящие точки» на них могут наблюдаться, как точечные ориентиры («блестящей точкой» называют точку на изображении крутого мыса, в которой нормаль к береговой черте почти совпадает с направлением на корабль).

Точность измерения дистанции по РЛС определяется точностью совмещения ПКД с ориентиром на экране РЛС или точностью совмещения и удержания в совмещённом состоянии курсоров с ориентирами на дисплее ЭНИС. Инструментальные нормы погрешностей (с вероятностью 0,95) современных РЛС составляют: для пеленгования 1°, для измерения дистанции на ближних шкалах (до 1 мили) – 10 м, на дальних шкалах –

0,8 % от максимального значения используемой шкалы. СКП ручного измерения дистанции по РЛС на основании [70] выражаются функциями: m=9D на шкалах меньше 4 миль; m=11D на шкалах меньше 16 миль; m=13D на шкалах меньше 30 миль; m=17D на шкалах больше 30 миль. СКП автоматического измерения дистанции по РЛС $m \approx 4D$. Здесь СКП m в м, дистанция D в милях. Коэффициент корреляции погрешностей измерения дистанций до двух ориентиров $r_{ij} \approx 0{,}5$. Погрешности подчиняются ЗР М-распределения.

При измерении дистанции лазерным дальномером m=1,6 м.

Точность пеленгования по РЛС зависит от качества ориентира (точечный или протяжённый) или цели, качки корабля и его рыскания при ориентации изображения относительно курса корабля. Можно считать СКП пеленгования точечных ориентиров (при отсутствии качки) равной $m_П \approx 1{,}5 m_К$.

3.2 Определение и оценивание точности обсервованного места корабля

Оценивание точности обсервованного места

Погрешности линий положения. Место корабля при обсервациях находится в точке пересечения двух или нескольких линий положения (ЛП). Для оценивания точности ОМ необходимо определить показатели точности ЛП.

Стандартной погрешности НП m_U соответствует среднее квадратическое смещение ЛП, или стандартная погрешность ЛП $m_{ЛП}=m$ (далее стандартную погрешность ЛП будем обозначать буквой m), которая выражается через СКП соответствующего НП m_U известной формулой

$$m=m_U/g=K_{ЛП}m_U, \qquad (3.2.1)$$

где $K_{ЛП}$=1/g - коэффициент ЛП, g – градиент ЛП. Формулы для определения коэффициента $K_{ЛП}$ и направления градиента НП τ содержатся в [70 и др.]. Для наиболее часто употребляемых НП эти величины равны:

- для визуального и радиолокационного пеленга (П)
  $K_{ЛП}=D/57{,}34$ [мили/градус]; τ =П–90°; (3.2.2, а)
- для расстояния до ориентира
  $K_{ЛП}$=1 [безразмерный]; τ =П ± 180°; (3.2.2, б)
- для любого НП при наличии на карте (планшете) сетки изолиний
  $K_{ЛП}=L/\Delta U$ [ед. расстояния/ед. НП];
  τ – по нормали к изолинии в сторону увеличения оцифровки, (3.2.2, в)

где L – расстояние между изолиниями вблизи счислимого места корабля;

ΔU – разность оцифровки этих изолиний. В настоящее время выходными данными основных МСН определения места являются обсервованные координаты φ, λ и их СКП $m_Ш$ и $m_Д=m_w sec\varphi$. При этом обсервованные широта и долгота являются *эквивалентными ЛП* с

постоянными градиентами ЛП $g_Ш=1$; $g_Д=1/cos\varphi$ и их направлениями $\tau_Ш=\tau_1=0^o$; $\tau_Д=\tau_2=90^o$.

Радиальную СКП при двух ЛП рассчитывают по формуле [70]

$$M = \frac{m_M \sqrt{1+\Lambda^2 - 2r\Lambda\cos\Delta\tau}}{|\sin\Delta\tau|} = \mu_2 m_M \qquad (3.2.3)$$

где Λ - отношение большей из двух СКП линий положения $m_Б$ к меньшей $m_М$, т. е. $\Lambda=m_Б/m_М$; r – коэффициент корреляции погрешностей этих ЛП, равный коэффициенту корреляции погрешностей соответствующих НП; $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$; τ_1 и τ_2 – направления градиентов ЛП; μ_2 – коэффициент перехода от СКП $m_М$ к радиальной СКП М обсервованного места. По этой формуле построена номограмма на рис. 3.2.1, позволяющая получить значение μ_2 для расчета радиальной СКП по (3.2.3). Для удобства интерполирования при съёме значения μ_2 укладывают вертикально прозрачную линейку на значение $\Delta\tau$ горизонтальной шкалы номограммы и производят интерполяцию вначале по r (на глаз), затем по Λ (в соответствии с делениями шкалы линейки). Например, для $\Delta\tau=35^o$, $\Lambda=1,7$ и $r=0,7$ величина $\mu_2=2,5$.

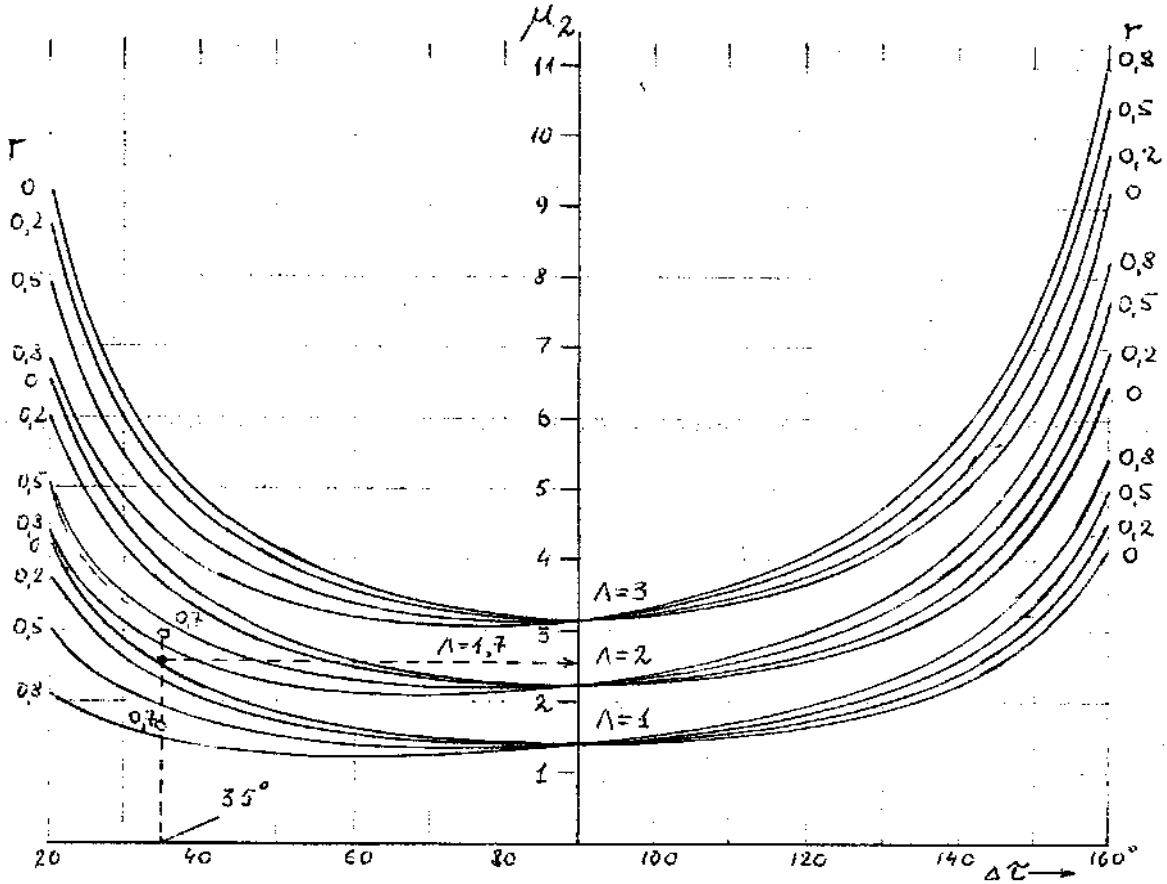

Рис.3.2.1. Номограмма для определения коэффициента μ_2

В случаях, когда НВС или приёмоиндикатор автоматически вычисляет обсервованные координаты по результатам измерений НП, угол между градиентами эквивалентных ЛП в (3.2.3) $\Delta\tau=90^o$, поэтому радиальная СКП равна $M=(m^2_Ш+m^2_Д)^{0,5}$.

Определение вероятнейшего места (ВМ) корабля по трем ЛП, пересекающимся в виде *треугольника погрешностей* производят следующим образом:

В треугольнике погрешностей малого и среднего размера (длина сторон не превышает $0{,}2 \div 0{,}5$ мили в зависимости от масштаба карты для малого и 1,5 мили для среднего треугольника), образованном коррелированными ЛП (r_{ij}>0.2):

а) в случае направления градиентов ЛП по всему горизонту (обозначаем это символом $g \subset 360^{o}$) принимают ВМ в центре окружности, вписанной в треугольник на глаз;

б) в случае направления градиентов ЛП в одну половину горизонта ($g \subset 180^{o}$) поступают следующим образом:

- в остроугольном треугольнике намечают $ЛП_{ср}$, соответствующую среднему по расположению ориентиру, проводят на глаз биссектрису противолежащего угла треугольника и принимают ВМ в точке пересечения биссектрисы с намеченной $ЛП_{ср}$;
- в прямоугольном или тупоугольном треугольнике принимают место в вершине, соответствующей прямому или тупому углу.

В треугольнике погрешностей малого и среднего размера, образованном некоррелированными ЛП ($r_{ij} \leq 0.2$), принимают ВМ в центре окружности, вписанной в треугольник на глаз, независимо от того, как направлены градиенты ЛП.

Радиальную СКП вероятнейшего места при трёх ЛП определяют следующим образом:

а) Рассчитывают радиальную СКП $М_В$ самой точной из вершин треугольника погрешностей, которая характеризуется минимальной радиальной СКП из трёх. Обычно внутренний угол треугольника при этой вершине наиболее близок к 90°.

б) Вычисляют радиальную СКП $М_{ВМ}$ вероятнейшего места по формуле [70]

$$М_{ВМ}=К_{(3)}М_В, \qquad (3.2.4)$$

где $К_{(3)}$ – коэффициент, равный 0,85 при независимых НП; 0,8 при коррелированных НП и $g \subset 360^{o}$; 0,9 при коррелированных НП и $g \subset 180^{o}$). Заметим, что в значениях коэффициента $К_{(3)}$ учтено отличие реальных законов распределения погрешностей НП от закона Гаусса и поэтому эти значения несколько меньше, чем использовавшиеся в навигации прежде.

Вероятнейшее место в фигуре погрешностей, образованной пересечением четырех ЛП, принимают на глаз в центре фигуры. Радиальную СКП этого места рассчитывают по (3.2.4) с подстановкой вместо $К_{(3)}$ коэфициента $К_{(4)}=К_{(3)}–0{,}05$.

Проверку фигуры погрешностей необычно большого размера на отсутствие грубой погрешности в одной или двух ЛП выполняют способом измерения периметра (Пр) треугольника [84] следующим образом:

а) измеряют периметр треугольника в кабельтовых, последовательно раздвигая измеритель на длину очередной стороны треугольника;

б) рассчитывают среднее значение СКП m* для СКП трёх ЛП по формуле

$$m^*=[(m^2_1+m^2_2+m^2_3)/3]^{0,5}, \qquad (3.2.5)$$

где m_1, m_2, m_3 – СКП линий положения в кабельтовых;

в) проверяют отсутствие грубых погрешностей по условию

$$\text{Пр}<\text{К}_{h\text{Пр}}m^*, \qquad (3.2.6)$$

при выполнении которого полагают, что грубые погрешности отсутствуют. Если условие (3.2.6) не выполняется, то с вероятностью 0,95 они имеют место. Здесь $\text{К}_{h\text{Пр}}$ – коэффициент предельного перехода, соответствующий закону распределения периметра треугольника погрешностей (табл. 3.2.1).

Таблица 3.2.1. Значения коэффициентов $\text{К}_{h\text{Пр}}$

Способ и условия определения места	Расположение ориентиров	
	$g \subset 360^o$	$g \subset 180^o$
Визуальное пеленгование на основе – ГК, ГА – ИНС	 19,4 12,5	 8,8 12,5
Измерение дистанций по РЛС – ручные измерения на экране РЛС – ручные измерения на ЭНИС – автоматические измерения	 12,5 15,9 15,9	 12,5 11,6 11,6
Измерение НП по РНС	15,9	11,6

Погрешности места корабля по заданному направлению

При двух обсервованных ЛП наиболее простой способ определения линейной СКП места m_z по направлению заданной оси 0z основан на использовании взаимно-направленных векториальных СКП $m\uparrow_1$ и $m\uparrow_2$ (рис. 3.2.2).

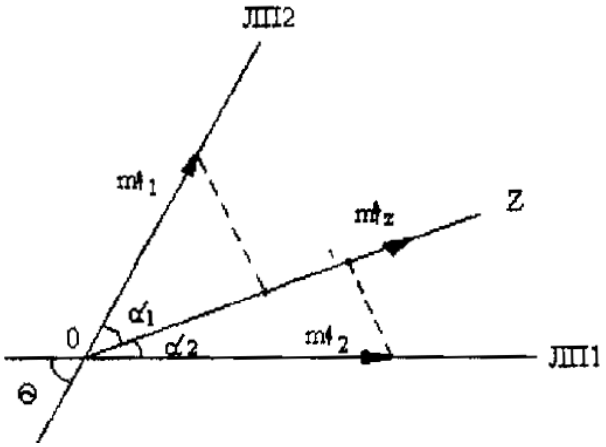

Рис. 3.2.2. СКП места по направлению оси 0z.

В таком случае величину m_z рассчитывают по формуле

$$m_z=(m\uparrow^2_1 cos^2\alpha_2+m\uparrow^2_2 cos^2\alpha_1+2rm\uparrow_1 cos\alpha_2 m\uparrow_2 cos\alpha_1)^{0,5}.$$

При характеристике точности места тензором (средним квадратическим эллипсом) погрешностей (рис. 3.2.3) величину m_z рассчитывают по формуле

$$m_z=(a^2cos^2\alpha+b^2sin^2\alpha)^{0,5}, \qquad (3.2.8)$$

где α - острый угол между направлениями большой оси тензора и оси 0z.

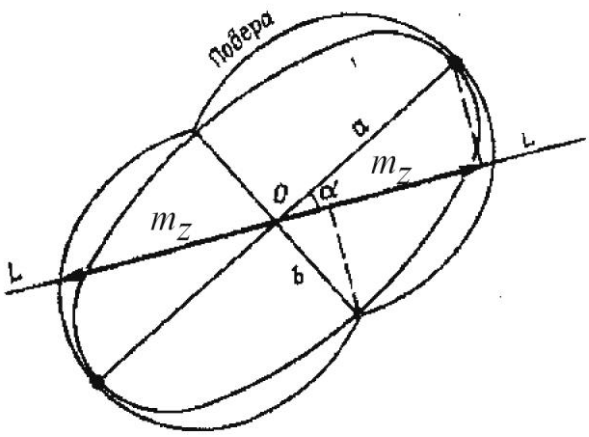

Рис. 3.2.3. СКП по направлению оси 0z.

Погрешности места корабля по направлению оси 0z подчиняется тому же закону распределения, что и погрешности исходных НП, по которым определено место корабля. Вероятность попадания случайной величины Z в интервал $\pm m_z$ равна при нормальном ЗР $P_{zГ}$=0,683, при законе Лапласа $P_{zЛ}$=0,714.

При характеристике точности места корабля радиальной СКП М стандартную погрешность m_z традиционно принимают равной [32 и др.]

$$m_z = M/\sqrt{2}\,. \qquad (3.2.9)$$

Этот способ обеспечивает вероятность попадания случайной величины Z на интервал $\pm m_z$, равную $P_{z(1)}$=0,683 или 0,714 в общем случае лишь *в среднем* [70, 78], что объясняется неравномерностью распределения вероятности внутри круга радиальной погрешности. Это иллюстрирует рис. 3.2.4, на котором показаны для девяти значений параметра сжатия тензора *b/a* круг (2) радиуса $M/\sqrt{2}$=0,7М и подера эллипса (1).

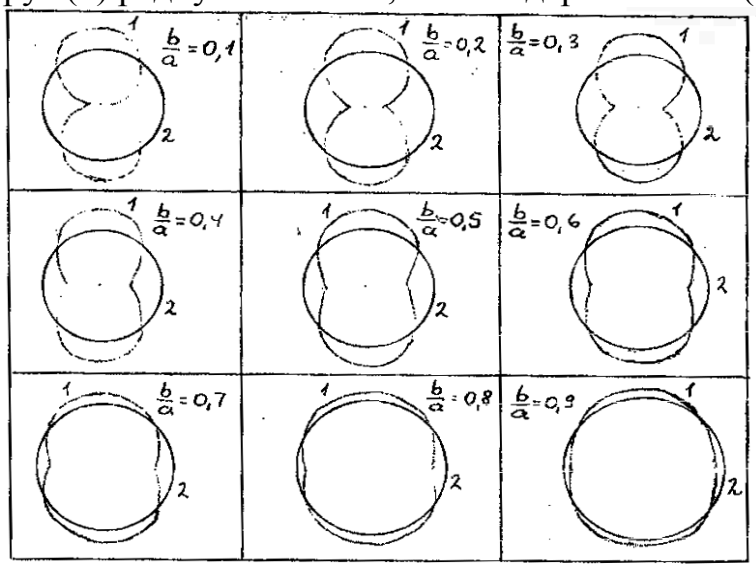

Рис.3.2.4 Соотношение величин$M/\sqrt{2}$ и подеры эллипса

Видно, что на одной половине длины окружности радиуса 0,7М стандартная погрешность m_{zK}, рассчитанная по (3.2.9), меньше, чем СКП $m_{zЭ}$, полученная по (3.2.8), а на второй половине длины этой окружности $m_{zK}>m_{zЭ}$. Следовательно, при расчете СКП места по направлению, например, на НО, реально действующая СКП (характеризуется величиной $m_{zЭ}$) с вероятностью 0,5 превышает расчетное значение (m_{zK}). Это ведет к тому, что рассчитанная с использованием (3.2.9) линия пути корабля в 50% случаев окажется проложенной ближе к НО, чем надлежит, вследствие чего заданная

вероятность БП не будет обеспечена. Для исключения такого нежелательного эффекта при решении задачи НБП в условиях, когда точность места корабля характеризуется радиальной СКП М, в качестве СКП места корабля по направлению оси 0z вместо (3.2.9) в работе [70] рекомендовано принимать

$$m_z = \text{М}, \text{ или } m_z = a, \qquad (3.2.10)$$

где a – главная СКП тензора погрешностей места корабля, вычисляемая при известных величинах радиальной СКП М и параметре сжатия эллипса $e=b/a$ по формуле

$$a = \text{М}(1+b^2/a^2)^{-0,5}. \qquad (3.2.11)$$

При характеристике точности места корабля стандартными погрешностями по осям координат $m_{\text{Ш}}$ и $m_{\text{Д}}$ и коэффициентом корреляции r этих погрешностей СКП места корабля по направлению оси 0z определяют по формуле

$$m_z(\alpha) = (\text{А}^2 + \text{Б}^2 + 2r\text{АБ})^{0,5}, \qquad (3.2.12)$$

где $\text{А} = m_{\text{Ш}} \cos\alpha$; $\text{Б} = m_{\text{Д}} \sin\alpha$; α - угол между осью 0z и меридианом.

3.3 Оценивание точности счисления

В зависимости от МСН, используемых при ведении счисления и прогнозировании места корабля, различают [70] несколько видов счисления: относительное, 3 варианта абсолютного, инерциальное и обсервационное. *Относительным н*азывают счисление, ведущееся по данным курсоуказателя и относительного лага, *абсолютным* — относительное счисление с периодическим использованием информации об абсолютной скорости корабля от гидроакустического лага (ГАЛ), приёмоиндикатора ГНСС, или измеряемой по высокоточным обсервациям. *Инерциальное* счисление ведётся по НП, вырабатываемым ИНС и НК, а *обсервационное* предусматривает циклическое поступление обсервованных координат и их совместную обработку со счислимыми координатами. Рассматривают также *метод непрерывных обсерваций*, при котором на дисплей ЭНИС непрерывно поступают обсервованные координаты, которые совместно со счислимыми не обрабатываются. Теоретическое обоснование оценок точности всех видов счисления произведено в [78]. Ниже рассматриваются статистические модели и способы расчёта показателей точности всех видов счисления.

Оценивание точности относительного счисления

Точность относительного счисления характеризуется радиальной СКП. . Традиционно в навигации [32, 33, 38,102] радиальную СКП счисления $\text{М}_{\text{С}}(t)$, обозначаемую далее также $\text{М}(t)$, определяют по формулам:

$$M_C(t)=M(t)=0{,}7K_C t \text{ при } t\le 2 \text{ ч}, \quad M_C(t)=K_C t^{0,5} \text{ при } t>2 \text{ ч}, \qquad (3.3.1)$$

где K_C - коэффициент точности счисления (КТС), имеющий размерность узлы в первой формуле и мили/ч^{0,5} – во второй. КТС определяется по невязкам счисления, полученным в процессе плавания корабля. Модель (3.3.1), хотя и не приводит к катастрофическим последствиям, но является теоретически некорректной [18] (об этом говорит хотя бы неодинаковая размерность коэффициента K_C в двух формулах), а практически неэффективной из-за усредняющего характера величины K_C и возрастания в связи с этим ее неопределённости для конкретных условий плавания. Кроме того, эта модель не предусматривает учёта в счислении сведений о течениях из навигационных пособий, а оценивание КТС с обработкой невязок представляет собой трудоемкую работу и в практике редко выполняется.

В силу указанных причин актуальной является задача определения радиальной СКП счисления на основании статистических характеристик факторов, вызывающих погрешности счисления. Ниже приводится решение этой задачи способами КТС и табличным.

Способ коэффициентов точности счисления основан на использовании следующей модели для радиальной СКП счисления при плавании в навигационном слое вод:

$$M(t)=K_{НП}K_{C1}t \text{ при } t\le t_Л; \qquad (3.3.2, а)$$
$$M(t)=K_{НП}K_{C2}t^{\theta} \text{ при } t>t_Л, \qquad (3.3.2, б)$$

где K_{C1}, K_{C2} - коэффициенты точности счисления на линейном и нелинейном участках функции (3.3.2); θ - показатель, характеризующий степень изменчивости функции (3.3.2); $t_Л$ - продолжительность линейного участка функции (3.3.2), $K_{НП}$ – коэффициент эффективности навигационного пособия о течениях, данные которого учитываются в счислении; t – продолжительность счисления. Величины имеют размерности: t (или t_C), $t_Л$ – часы, $M(t)$ – мили или километры, K_{C1} - узлы или км/ч, K_{C2} – мили/ч$^{\theta}$ или км/ч$^{\theta}$. Для получения радиальной СКП счисления на некотором горизонте глубин полученную по (3.3.2) величину умножают на коэффициент K_h, выбираемый из табл. 3.1.4.

Расчеты КТС выполняют в процессе предварительной подготовки к плаванию для типовых условий или в ходе плавания в конкретных условиях. При этом вычисляют СКЗ модуля вектора скорости сноса корабля при относительном счислении по априорным данным по формулам:

$$\sigma_{сн}=(\sigma^2_{ндр}+\sigma^2_{др}+\sigma^2_{В}+\sigma^2_{МСН})^{0,5}; \qquad (3.3.3)$$
$$\sigma_{МСН}=0{,}132(\mathrm{Id}\, m^2_{ВС}+m^2_{К}+m^2_{ЛО})^{0,5}. \qquad (3.3.4)$$

При этом величины $\sigma_{ндр}$, $\sigma_{др}$ и $\sigma_{В}$ определяют по рекомендациям разд. 3.1; величину $m_К$ – в соответствии с пояснениями к (3.1.9). Величина $m_{ЛО}$ и интервал корреляции $\tau_К$ имеют следующие значения для лагов разного типа:

лаги ртутные $m_{ЛО}$=0,04…0,08 уз; $\tau_К$=20 с

лаги гидродинамические $m_{ЛО}$=0,2…0,6 уз; $\tau_К$=20 с;

лаги индукционные $m_{ЛО}$=0,1÷0,3 уз; $\tau_К$=20 с;

лаги доплеровские $m_{ЛО}$=0,2…0,4 уз; $\tau_К$=20 с.

После определения величины $\sigma_{сн}$ рассчитывают КТС $К_{С1}$ и $К_{С2}$ по формулам, выбранным из табл. 3.3.1 в зависимости от вида превалирующих течений в районе плавания. В таблице символом *T** обозначен характерный период регулярного течения. Например, для полусуточного приливного течения *T**= 12, 4 ч.

Таблица 3.3.1. Расчетные формулы и элементы функции (3.3.2)

Вид превалирующих течений	**Коэффициент $К_{С1}$**	**Коэффициент $К_{С2}$**	**Показатель θ**	**Время $t_Л$**
Случайные	0,89 $\sigma_{сн}$	0,97 $\sigma_{сн}\tau_Т^{0,35}$	0,65	1,13$\tau_Т$
Регулярные	0,85 $\sigma_{сн}$	0,33 $\sigma_{сн}Т^{0,7}$	0,30	0,17T^*
Постоянные	0,9 $\sigma_{сн}$	0,85 $\sigma_{сн}\tau_Т^{0,2}$	0,80	1,13$\tau_Т$
Смешанные	0,9 $\sigma_{сн}$	0,8 $\sigma_{сн}\tau_Т^{0,5}$	0,50	2 ч

Значения КТС для случайных течений в условиях, когда недрейфовое течение является превалирующим по скорости из всех составляющих в (3.3.3), приведены в табл. 3.1.2. Этими значениями удобно пользоваться при океанском плавании в хорошую погоду. Для одних и тех же районов плавания и типовых условий значения КТС постоянны и не требуют повторного расчета. Для условий плавания в закрытых морях величину ($\sigma^2_{ндр}+\sigma^2_{др}$) в (3.3.3) рассчитывают по формуле (3.1.4). Для обеспечения вычислений величины t^{Θ} при отсутствии простых вычислительных средств в приложении приведена табл. 7 степеней числа *x*. При входе в таблицу принимают *x*=*t* – продолжительность счисления в часах. Для облегчения вычислений можно воспользоваться также номограммой на рис. 3.3.1.

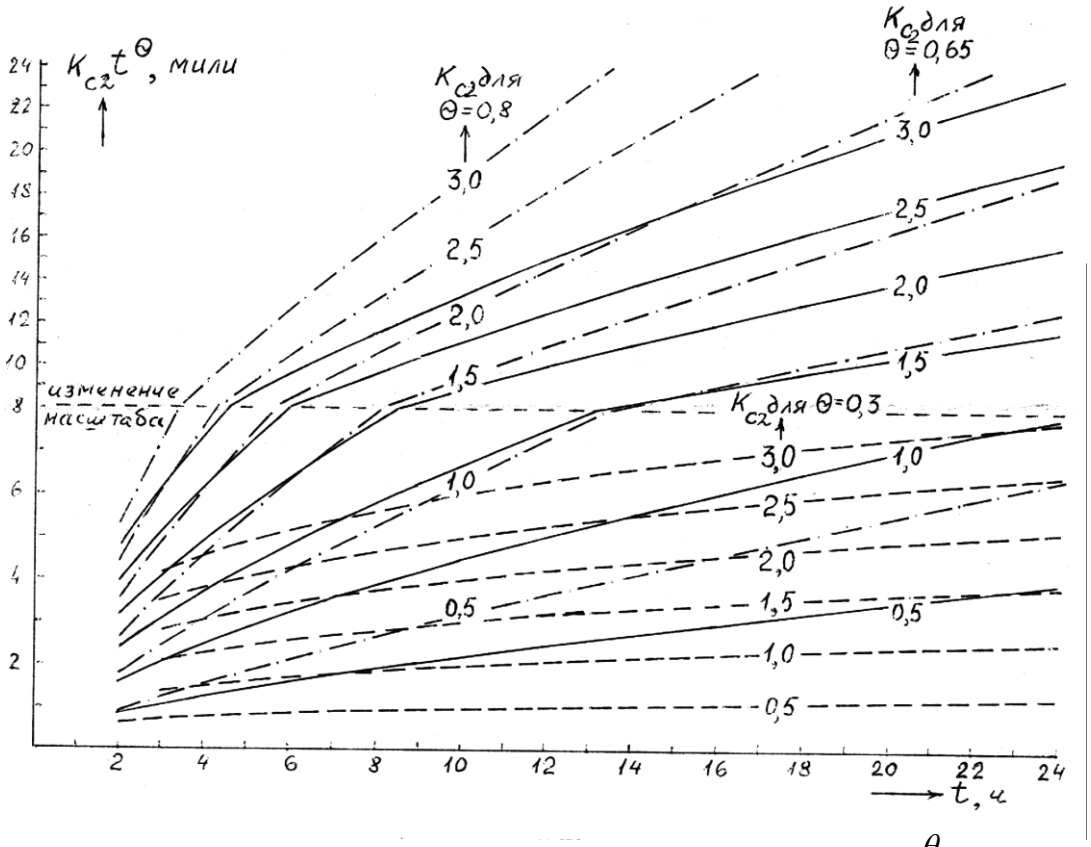

Рис. 3.3.1 Номограмма для расчёта величины $K_{C2}t^{\theta}$

Табличный способ определения радиальной СКП относительного счисления при океанском плавании основан на том, что стандартные погрешности МСН счисления сохраняют свои значения в широком диапазоне условий плавания. Это позволяет применить упрощенные способы определения радиальной СКП счисления для типовых условий плавания при незначительных методических погрешностях. Простейшим для практического использования в океанском плавании является способ, при котором значения радиальной СКП счисления М(t) рассчитываются заранее для области скорости течений и определенных значений СКП $m_{ВС}$, $m_К$ и $m_{ЛО}$, и сводятся в таблицы. Такие таблицы для четырех областей океанов, разных скоростей движения корабля, разных скоростей ветра и значений $m_{ВС}=0{,}5^0$, $m_К=1^0$, $m_{ЛО}=0{,}2$ уз имеются в МВР-96 [70].

Угол дрейфа корабля по экспериментальным данным определяют способом «надвух галсах корабля» в соответстчии с [70, приложение 6].

Оценивание точности абсолютного счисления при эпизодическом поступлении абсолютной информации

Имеют место 3 варианта абсолютного счисления (АС): с эпизодическим (АСЭ), циклическим (АСЦ) и непрерывным (АСН) поступлением абсолютной информации. Эта информация состоит из характеристик вектора скорости сноса $\boldsymbol{v}_{сн}$ корабля – направления сноса и модуля его скорости.

Наиболее общим и часто употребляющимся вариантом абсолютного счисления с эпизодическим поступлением абсолютной информации является предсказание (прогнозирование) счислимого места корабля на время $t_{пр}$ в условиях, когда в начальный момент t_0 прогноза измерены

векторы относительной $\boldsymbol{V}_{\text{О}}$ (по лагу и гирокомпасу) и абсолютной (относительно грунта) $\boldsymbol{V}_{\text{А}}$ (например, по приёмоиндикатору ГНСС) скоростей корабля. Это позволяет определить в момент t_0 и учитывать при прогнозировании вектор скорости сноса корабля по формулам:

$$\boldsymbol{v}_{\text{сн}}=\boldsymbol{V}_A-\boldsymbol{V}_{\text{О}};\ \boldsymbol{V}_{\text{пр}}=\boldsymbol{V}_{\text{тк}}+\boldsymbol{v}_{\text{сн}};\ \boldsymbol{S}_{\text{пр}}=\int_0^t (\boldsymbol{V}_{\text{тк}}+\boldsymbol{v}_{\text{сн}})dt,$$

где $\boldsymbol{V}_{\text{пр}}$ и $\boldsymbol{S}_{\text{пр}}$ – прогнозируемые значения скорости и пройденного расстояния; $\boldsymbol{V}_{\text{тк}}$ – текущее значение измеренного вектора скорости. При этом возникают два вопроса: как долго можно учитывать вектор сноса, и как рассчитывать радиальную СКП прогнозируемого места. Теория этой задачи рассмотрена в [78]. В частности, показано, что радиальная СКП относительного счисления $\text{М}_{\text{О}}(t)$ изменяется по параболическому закону (величина $\text{А}_{\text{сл}}(\upsilon)$ и график 1 на рис. 3.3.2), а радиальная СКП ОА счисления $\text{М}_{\text{ОА}}(t)$ изменяется по гиперболическому закону (величина $\text{Б}_{\text{ИП}}(\upsilon)$ и график 2 на рис. 3.3.2). Здесь $\upsilon=\vartheta=\text{t}/\tau_{\text{Т}}$ – нормированное время, $\tau_{\text{Т}}$ – интервал корреляции сноса.

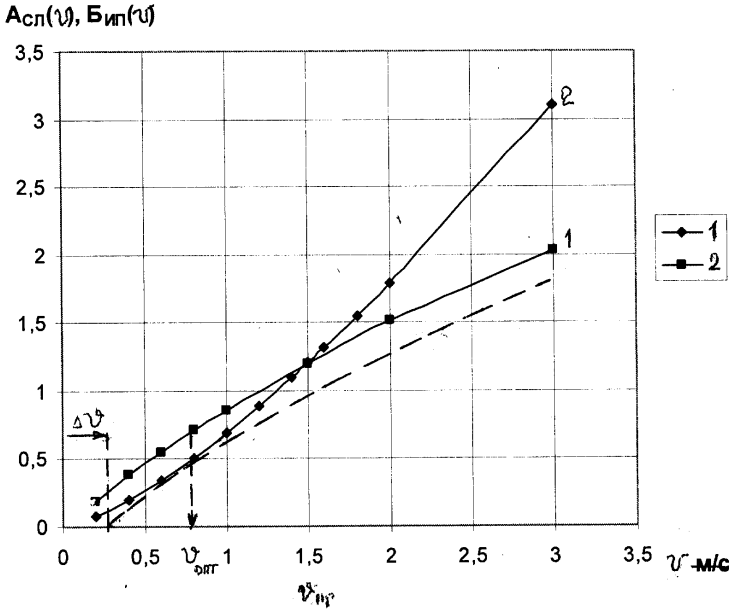

Рис. 3.3.2 Графики изменения радиальных СКП во времени

Из рисунка видно, что в начале прогнозирования величина $\text{М}_{\text{ОА}}(t)<\text{М}_{\text{О}}(t)$, т.е. точность АСЭ выше, чем относительного, но с течением времени разность между ними уменьшается и по истечении предельного времени прогноза $\vartheta_{\text{пр}}$ наступает равенство. Если в этот момент не прекратить учёт сноса, то при $\vartheta>\vartheta_{\text{пр}}$ учёт сноса приводит к понижению точности счисления, т. к. $\text{М}_{\text{ОА}}(t)>\text{М}_{\text{О}}(t)$. Существует также оптимальная продолжительность учёта сноса $\vartheta_{\text{опт}}$, при которой обеспечивается наиболее высокая точность счисления (пунктирная линия на рис. 3.3.2). Строгая оценка радиальной СКП АСЭ основана на расчёте величины $\text{Б}_{\text{ИП}}(\vartheta)$ [70, 78]. Для обеспечения простоты вычислений предлагается рассчитывать радиальную СКП ОА счисления по более простым аппроксимационным формулам:

$\text{М}_{\text{С}}(t)=\text{М}_v t$ при $t<t_{\text{УС}}$; (3.3.5, а)

$\text{М}_{\text{С}}(t)=\text{К}_{\text{УС}}\text{К}_{\text{С1}}t$ при $t\le t_{\text{УС}}$; (3.3.5, б)

$\text{М}_{\text{С}}(t)=\text{К}_{\text{С1}}(t-\Delta t)$ при $t_{\text{УС}}<t\le t_{\text{Л}}$; (3.3.5, в)

$\text{М}_{\text{С}}(t)=\text{К}_{\text{С1}}(t-\Delta t)^{\Theta}$ при $t>t_{\text{Л}}$, (3.3.5, г)

где $M_{,v}$ – радиальная СКП измерения вектора скорости сноса корабля с помощью ГАЛ или приёмоиндикатора ГНСС; $t=T_P-T_O$ – продолжительность счисления от момента T_O исходной обсервации, с которым совпадает момент определения вектора скорости сноса корабля, до текущего (расчетного) момента или момента прогноза T_P; $K_{УС}$ – коэффициент эффективности учета измеренной скорости сноса, выбираемый из табл. 3.3.3; $\Delta t=\Delta\vartheta\,\tau_T$ – поправка времени; $\Delta\vartheta$ – поправка нормированного времени, выбираемая из табл. 3.3.3; $\vartheta=\upsilon=t/\tau_T$ – нормированное время; τ_T – интервал корреляции течения в районе плавания; $t_{УС}=t_{опт}$ – оптимальная продолжительность учета измеренного на корабле сноса, по истечении которой учет сноса прекращают; выбирается из табл. 3.3.3; K_{C1}, K_{C2}, $t_Л$, Θ – величины, относящиеся к функции (3.3.2).Для определения коэффициента $K_{УС}$ эффективности учета измеренной скорости сноса, оптимальной продолжительности $t_{УС}$ учета сноса и поправки времени Δt:

- рассчитывают параметр $\delta=M_v/\sigma_{сн}$;
- принимают интервал корреляции в соответствии с рассмотренными выше рекомендациями, в частности, выбирают величину τ_T недрейфового течения из табл. 3.1.2 или для приливных течений принимают τ_T=2,5 ч;
- нормируют текущее время t, получая величину $\vartheta=t/\tau_T$;
- выбирают из табл. 3.3.3 текущее значение коэффициента $K_{УС}$ по значениям величин δ и ϑ;
- выбирают из нижнего отдела табл. 3.3.3 оптимальное нормированное время $\vartheta_{УС}$, соответствующие ему значения $K_{УС}$ и поправку $\Delta\vartheta$ по значению величины δ.
- переходят от нормированного времени к времени в часах: $t_{УС}=\Delta\vartheta_{УС}\tau_T$ и $\Delta t=\Delta\vartheta\tau_T$.

С использованием этих величин рассчитывают радиальную СКП ОА счисления по (3.3.5).

Таблица 3.3.3. Коэффициент $K_{УС}$; во второй части таблицы нормированное время $\vartheta_{УС}$ и поправка нормированного времени $\Delta\vartheta$

Величина	Коэффициент $K_{УС}$ в зависимости от параметра δ							
ϑ	δ=0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
0,001	0,032	0,105	0,202	0,302	0,401	0,501	0,60	0,707
0,0125	084	134	217	312	410	508	61	715
0,05	182	208	272	353	443	536	63	757
0,1	258	277	328	399	481	570	66	784
0,15	315	331	376	440	517	603	69	810
0,2	364	378	418	478	551	632	719	835
0,25	408	417	455	512	582	660	745	859
0,3	444	457	492	545	612	688	771	883
0,35	478	490	524	575	640	714	796	--
0,4	512	523	555	604	667	739	82	--
0,45	542	552	583	631	602	764	843	--
0,5	572	582	611	657	717	787	--	--

0,55	598	608	636	683	--	--	--	--
0,6	625	634	662	1707	--	--	--	--
0,7	674	683	700	--	--	--	--	-

Значения $\vartheta_{УС}$ и $\Delta\vartheta$ в зависимости от $К_{УС}$

$К_{УС}$	0,650	0,649	0,672	0,697	0,727	0,764	0,805	0,854
$\vartheta_{УС}$	0,65	0,63	0,62	0,58	0,52	0,45	0,37	0,29
$\Delta\vartheta$	0,24	0,23	0,22	0,19	0,15	0,11	0,07	0,03

Оценивание точности АСЦ и АСН

Радиальную СКП $M_C(t)$ абсолютного счисления при **циклическом** с дискретностью $t_Ц$ поступлении информации об абсолютной скорости (АСЦ) рассчитывают по формуле

$$M_C(t) = M_C(t_Ц)\sqrt{N}, \qquad (3.3.6)$$

где t – продолжительность времени счисления от последней обсервации; $M_C(t_Ц)$ – радиальная СКП АСЭ, накапливаемая за время цикла $t_Ц$ и рассчитываемая по одной из формул (3.3.5) при $t=t_Ц$; $N=t/t_Ц$ – количество циклов измерения абсолютной скорости на интервале счисления t; при расчетах величину N округляют в большую сторону.

Радиальную СКП $M_C(t)$ абсолютного счисления при **непрерывной** работе ГАЛ или непрерывном режиме циклической фильтрации в НВС определяют по (3.3.6), полагая, что время цикла равно времени сглаживания сигналов в ГАЛ (240-300 с) или продолжительности цикла фильтрации.

Допустимое время $t_{дп}$ плавания по абсолютному счислению определяют следующим образом:

1. Строят график величины $M_C(t)$, откладывая по горизонтальной оси время t, по вертикальной–значения величины $M_C(t)$.
2. Проводят на графике горизонтальную линию, соответствующую заданному значению радиальной СКП $M_{зд}$.
3. Из точки пересечения горизонтальной линии $M_{зд}$ с графиком $M_C(t)$ опускают перпендикуляр на горизонтальную ось и снимают значение допустимого времени $t_{дп}$.

3.4 Оценивание точности инерциального и обсервационного счисления. Дрейф корабля

Оценивание точности инерциального счисления

Стандартные погрешности выработки координат ИНС и НК определяются двумя способами: по априорным данным, полученным в результате государственных приёмочных испытаний (ГИ) и по информации, получаемой в плавании корабля.

В результате ГИ определяются и записываются в формуляры ИНС и НК значения максимальных по модулю погрешностей $x_{Шm}$ и $x_{Дm}$, которые наблюдались в полученных на ГИ выборках погрешностей широты и

долготы. СКП выработки координат по значениям величин $x_{Шm}$ и $x_{Дm}$ определяются по формуле (1.1.4). Этот способ имеет два недостатка. Во-первых, в большинстве случаев продолжительность ГИ ограничена, из-за чего качество оценок $x_{Шm}$ и $x_{Дm}$ оказывается невысоким. С большой вероятностью оценки $x_{Шm}$ и $x_{Дm}$ получаются заниженными (до 2,5 раз). При этом точность выработки координат завышается до 2,5 разэ Во-вторых, оценки $x_{Шm}$ и $x_{Дm}$ получаются только для штатного режима работы НК (например, НК вырабатывает координаты в продолжении 18 ч, далее в течение 6 ч производится протяжённая коррекция, которая заканчивается высокоточной обсервацией). Какова точность выработки координат в момент, предшествующий протяженной коррекции, какой будет точность НК при отсутствии протяжённой коррекции, неизвестно, как неизвестна и точность, которую можно получить при ручной обработке нештатной обсервации.

Информация, получаемая в плавании корабля, позволяет построить функцию нарастания СКП выработки НП $m(t)$ от времени t накопления погрешностей инерциального счисления после последней коррекции координат. Эта функция может быть описана двух или трехзвенной линейной регрессией вида [43].

$$m(t)=[(a_1+K_1t), \text{ или } (a_2+K_2t), \text{ или } (a_3+K_3t] \text{ при } t<t_1 \text{ или } t_1<t<t_2, \text{ или } t>t_2, \quad (3.4.1)$$

где a_j и K_j – свободный член и коэффициент регрессии; t_j – продолжительность первого и второго линейных участков функции (3.4.1). Выражения (3.4.1) использованы для оценки точности выработки координат несколькими типами НК в Дополнении к МВР-96 [70].

При изучении этой зависимости рассмотрено более 50 двух и трехмесячных реализаций невязок счислимых и обсервованных координат. На рис. 3.4.1 приведены экспериментальные графики зависимости СКП выработки широты (сплошная линия) и долготы (пунктирная линия) для одного из типов НК в зависимости от времени плавания после последней коррекции координат. Стандартные погрешности даны в условных единицах (у.е.). Кружками и крестиками здесь показаны значения СКП, рассчитанные для интервалов, на которые была разбита ось времени. При построении графиков СКП учтено, что на начальном участке времени после коррекции велось ручное счисление от обсервованного места корабля. Графики почтроены по 219 невязкам

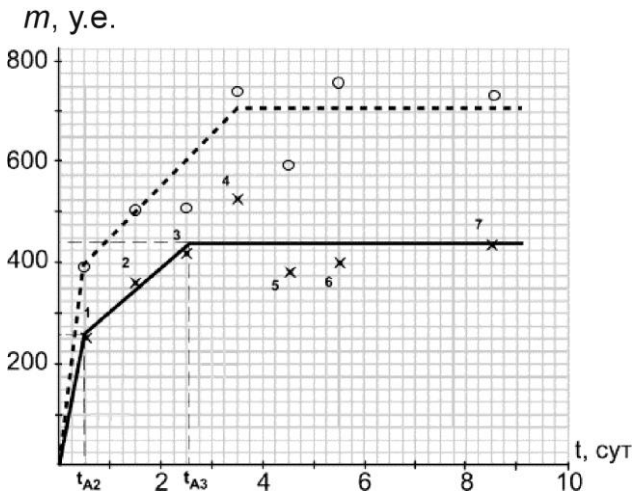

Рис. 3.4.1. Графики функций нарастания во времени СКП широты (сплошная линия) и долготы (пунктирная линия).

Для построения

подобных графиков по экспериментальным данным полученные в плавании невязки сопоставляются с временем их накопления, это время разбивается на интервалы, в каждом из которых рассчитывают СКЗ m_j невязки в j – м интервале по формуле Гаусса $m^2_j=(\sum_1^m L^2_i)/n$, где L_i - длина i–й невязки, n – количество невязок в j – м интервале. Далее по совокупностям невязок m_j строят графики, подобные изображённым на рис. 3.4.1. С этих графиков в процессе плавания снимают значения СКП для конкретного времени счисления после предыдущей обсервации.

В монографии [78] рассмотрен эффективный автономный способ оценки точности координат ИНС и НК по разнрстям одноименных показаний трёх или двух ИНС в составе НК,

Обсервационное счисление и фильтрация

Обсервационное счисление (ОС) выполняется в случаях, когда производится серия почти равноточных ОМ с дискретностью $\Delta t=10\div30$ мин. Оно состоит в объединении каждого $ОМ_i$ со счислимым местом ($СМ_i$) на этот же момент по методу наименьших квадратов (МНК). Дальнейшее счисление на новом цикле ОС ведётся от вероятнейшего (объединённого) места ($ВМ_i$).

Когда разность времени между первым и (1+k) – м обсервованными местами становится близкой к величине $t_{ОМопт}$ по обсервованным местам $ОМ_i$ и $ОМ_{i+k}$ определяют вектор скорости сноса корабля $\mathbf{v}_{сн}$ и переходят на абсолютное счисление. Величина $t_{ОМопт}$ рассмотрена в [70, 78]

Точность мест корабля, участвующих в обработке, характеризуется радиальными СКП $М_{ОМ}$, $М_{СМ}$ и $М_{ВМ}$, или линейными СКП по направлению невязки $m_{ОМ}$, $m_{СМ}$, $m_{ВМ}$, и коэффициентом корреляции r погрешностей ОМ (или ВМ) и СМ. Величина $М_{ОМi}$ в процессе ОС в общем случае остаётся постоянной, а величина $М_{СМi}$, равная сумме $М_{СМi}=(М^2_{ВМi-1}+М^2_C(\Delta t)]^{0,5}$, постепенно уменьшается. Здесь Δt – дискретность обсерваций; $М_C(\Delta t)$ – постоянная радиальная СКП счисления, накапливаемая за интервал Δt.

Для объединения ОМ и СМ или любых двух НП x_1 и x_2, характеризуемых СКП m_1 и m_2 (обозначенных так, что $m_1<m_2$) и коэффициентом корреляции r погрешностей величин x_1 и x_2, разработан удобный табличный способ [70], реализующий МНК. При этом способе вероятнейшее значение x^* и его СКП m_{x^*} находятся с помощью весовой функции [70, 78]:

$$x^*=x_1+W(x_2-x_1);\ m_{x^*}=\mu\, m_1, \qquad (3.4.2, а)$$

где W – весовой коэффициент; μ – коэффициент эффективности объединения значений x_1 и x_2. Значения коэффициентов приведены в табл. 8 приложения. Аргументами таблицы являются параметр $\Lambda=m_2/m_1$ и коэффициент корреляции r, который может иметь знаки минус и плюс. Кроме того, в этой таблице приведены значения проверочного коэффициента η, обеспечивающие возможность проверки разности $|x_2-x_1|$ на отсутствие грубых погрешностей по критерию

$$|x_2 - x_1| < 1{,}23\eta m_1, \qquad (3.4.2, б)$$

где $\eta = 1{,}96(1+\Lambda^2+2r\Lambda)^{0,5}$; 1,23 – коэффициент перехода от ЗР Гаусса к ЗР М-распределения. Если условие (3.4.2,б) выполняется, то считается, что грубые погрешности в разности $x_2 - x_1$ отсутствуют. Если же это условие не выполняется, то с вероятностью 0,95 в разности имеется грубая погрешность.

При обработке невязок длиной L_{Ci} между местами корабля BM_i и CM_i вместо расчётов по (3.4.2) вычисляют значение величины $l = WL_C$ и откладывают отрезок, пропорциональный величине l, от точки OM_i по направлению невязки. Радиальную СКП определяют по формуле $M_{BM} = 1{,}02\mu M_{OM}$, где 1,02 – коэффициент среднего ЗР погрешностей.

Фильтрация по методу Калмана или по последовательному методу отличается от ОС только тем, что вся поступающая в фильтр НВС информация обрабатывается автоматически и дискретность съёма значений обсервованных и счислимых координат может быть как угодно мала. Однако, в соответствии с [25], уменьшение дискретности Δt меньше величины интервала корреляции $\tau_К$ погрешностей обсервованной информации не приводит к повышению точности фильтрации. Поэтому все расчёты показателей фильтрации должны вестись применительно к условию $\Delta t = \tau_К$, независимо от фактической дискретности фиксаций.

Особенность динамики фильтрации и ОС состоит в том [52, 70], что в начале процесса фильтрации точность вероятнейших мест повышается, т. е. $M_{BMi+1} < M_{BMi}$, но из-за наличия постоянного по величине члена $M_C(\Delta t)$ приращение точности постепенно становится всё меньше и через $n_{ст}$ итераций процесс фильтрации выходит на *стационарный* (ст) режим, при котором величина M_{BMi} становится постоянной и равной $M_{BMст} = G_{ст}M_{OM}$, где $G_{ст}$ – коэффициент эффективности фильтрации и ОС в стационарном режиме. Динамика фильтрации сопровождается также изменением и весового коэффициента W_i , который в стационарном режиме имеет постоянную величину $W_{ст}$. Все рассмотренные величины являются функцией параметра $c = M_C(\Delta t)/M_{OM}$, (или $c = m_C(\Delta t)/m_{OM}$, когда в расчётах участвуют СКП по направлению невязки, или когда обрабатываются не места корабля, а обсервованные и счислимые НП. Показатели фильтрации и ОС приведены в табл. 3.4.1. Величина $n_{0,9}$ – количество итераций, при котором эффективность фильтрации составляет 90% от эффективности в стационарном режиме. Продолжительность времени до выхода на стационарный режим $t_{ст} = n_{ст}\tau_К$. Из табл. 3.4.1 видно, что для достижения высокой эффективности фильтрации должна быть обеспечена высокая точность счисления на интервале $\Delta t = \tau_К$. Например, эффективность $G_{ст} = 0{,}67$ можно получить при $M_C(\Delta t) = 0{,}6M_{OM}$. Такая точность может быть достигнута применением метода абсолютного счисления.

Оговоримся, что в настоящее время фильтрация реализуется в НВС ограниченно в связи с достаточно высокой исходной точностью ГНСС. Вместо фильтрации в ЭНИС штурману предоставляется возможность выбора одного из нескольких доступных средств определения места, по

информации от которого начинает использоваться метод непрерывных обсерваций. Однако метод фильтрации эффективен при необходимости достижения дециметровой точности GPS [3, 5].

Таблица 3.4.1. Показатели динамики процесса фильтрации и ОС

Показатель	Параметр c=$M_C(\Delta t)/M_{ОМ}$											
	0,012	0,025	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	2,0
$n_{ст}$	110	75	60	40	20	13	10	9	7	5	4	2
$n_{0,9}$	30	26	18	10	6	5	4	3	3	2	2	2
$W_{ст}$	0,01	0,02	0,04	0,07	0,18	0,26	0,33	0,39	0,45	0,54	0,62	0,83
$G_{ст}$	0,11	0,16	0,23	0,31	0,42	0,51	0,57	0,63	0,67	0,74	0,78	0,91

Метод непрерывных обсерваций

Метод непрерывных обсерваций (МНО) состоит в непрерывном (с дискретностью от 1 до 10 с) выводе обсервованного места корабля на экран ЭНИС или на автопрокладчик. Штурман в любой текущий момент (T) может увидеть положение этого места $ОМ_T$ относительно заданной линии пути и навигационных опасностей. Радиальная СКП места $ОМ_T$ с учётом погрешностей дисплея определяется выражением

$$M_{ОМT}=(M^2_{ОМ}+M^2_{Д})^{0,5}, \qquad (3.4.3)$$

где $M_{ОМT}$ – радиальная СКП места $ОМ_T$; $M_{ОМ}$ – радиальная СКП обсервованного места; $M_Д=C/1410 \div \boldsymbol{C}/1000$ – радиалиная СКП отображения места на дисплее ЭНИС, эквивалентная погрешности графических построений на бумажной карте; **C** – знаменатель экваториального масштаба карты. Радиальная СКП дисплея обязательно должна учитываться, т. к. уже при $C \geq 5000$ радиальная СКП $M_Д>M_{ОМ}$ при ОМ по ГНСС. Метод непрерывных обсерваций включает, помимо отображения места корабля, решение задач прогнозирования местоположения корабля на некоторое время вперёд, корректуры курса корабля для выхода на ЗТД и др. Поскольку приёмоиндикатор ГНСС измеряет путевой угол и скорость корабля, то задача прогнозирования места и оценки его точности решается по методу абсолютного счисления при эпизодическом (в момент T_0 начала решения задачи) прогнозирования) поступлении абсолютной информации. При этом на момент T_0 определяют вектор $\boldsymbol{v}_0$ скорости сноса корабля, и затем выполняют абсолютное счисление с учётом вектора $\boldsymbol{v}_0$. При необходимости производят оценку точности прогнозируемого места (см. разд. 3.3).