

**Комаровский Ю.А.**

СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ  
ДОПЛЕРОВСКИМИ СПУТНИКОВЫМИ НАВИГАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ

**Комаровский Ю. А.**

**Mr. Yu. A. Komarovskiy**

**СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ  
ДОПЛЕРОВСКИМИ СПУТНИКОВЫМИ НАВИГАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ**

**SEASONAL FLUCTUATIONS IN THE PRECISION OF COORDINATES OBTAINED  
FROM DOPPLER SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS**



**Комаровский Юрий Александрович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры теории и устройства судна Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского (г. Владивосток). E-mail: [komarovskiy@msun.ru](mailto:komarovskiy@msun.ru).

**Yuriy A. Komarovskiy** – PhD in Engineering, senior Researcher at the Department of Ship Theory and Naval Architecture of Maritime State University named adm. G. I. Nevel'skoi (city of Vladivostok). E-mail: [komarovskiy@msun.ru](mailto:komarovskiy@msun.ru).

**Аннотация:** Показано, что увеличение светлого времени суток приводит к ухудшению точности определения координат доплеровскими спутниковыми навигационными системами.

**Summary:** The paper shows that an increase in daytime duration leads to degradation in the precision of coordinates obtained by Doppler satellite navigation systems.

**Ключевые слова:** КОСПАС-САРСАТ, транзит, среднее квадратическое отклонение .

**Keywords:** KOSPAS-SARSAT, transit, mean square error.

УДК 629.783

Работа любой спутниковой навигационной системы зависит от состояния трансионосферного канала распространения радиоволн. Не составляет исключения из этого правила международная спутниковая система КОСПАС-САРСАТ, призванная обнаруживать сигналы бедствия и определять географические (геодезические) координаты лиц, терпящих бедствие на суше и на море. В ней источниками сигналов служат аварийные радиобуи (АБР), которые активируются в случае бедствия. Физические параметры ионосферы изменяются в течение года. Поэтому крайне желательно иметь оценку влияния сезонных изменений в ионосфере на точность определения координат людей, нуждающихся в помощи.

Максимум ионизации, влияющий на геометрию распространения радиоволн, приходится на область F ионосферы. Поведение главного максимума ионизации определяется временем года и местным временем суток. Максимум электронной концентрации в суточном ходе обычно сдвинут относительно полудня. При этом сдвиг зависит от широты, сезона и даже от долготы места АБР. Сезонная аномалия области F заключается в необычном увеличении максимума ионизации зимой по сравнению с летним сезоном. Высота главного максимума ионизации в средних широтах северного полушария изменяется в течение суток сложным образом, глубоко спускаясь утром и достигая максимума высоты вблизи полуночи. Высота слоя F зимой ниже, чем летом.

Если систематические погрешности объясняются колебаниями высоты и плотности слоя F, то случайные погрешности обсервованных координат АБР возникают по целому ряду причин. Главная из них кроется в стохастическом характере флуктуаций полного элек-

тронного содержания (ТЕС – Total Electron Content) в трансионосферном канале распространения радиоволн от АБР. Нерегулярности ТЕС вызываются сложными процессами в структурах ионосферы и зависят от географического места расположения АБР, сезона, состояния магнитосферы, солнечной активности и уровня космического излучения. Суточная вариация ТЕС определяется главным образом зенитным углом Солнца. В монографии [1] утверждается, что ионообразование возрастает быстро около восхода Солнца и остаётся почти постоянным до захода. При спокойной ионосфере наблюдается регулярное изменение ТЕС. Амплитуды и фазы суточных вариаций ТЕС зависят от географического места, времени суток и от времени года.

Чтобы оценить сезонные изменения погрешностей координат АБР системы КОСПАС-САРСАТ, в данной работе анализируются параметры распределения погрешностей координат судового приёмника FSN-70 спутниковой навигационной системы доплеровского типа Транзит. Технические характеристики систем КОСПАС-САРСАТ и Транзит близки [2]. Определение координат в них производится одним и тем же интегрально-доплеровским способом. Ранее автором были получены характеристики точности FSN-70 в зимнее время года [3]. В настоящей статье рассматриваются параметры распределения погрешностей координат FSN-70 в весенний и осенний периоды года. Для исследований были взяты массивы данных с 3 марта по 16 апреля и с 3 сентября по 14 октября. Эти массивы выбраны из данных, полученных во время наблюдений в лаборатории кафедры Промышленного судовождения и промышленного рыболовства Дальневосточного филиала Всесоюзного института повышения квалификации руководящих работников и специалистов рыбного хозяйства СССР во Владивостоке с 1987 по 1989 годы. Приёмник FSN-70 в этот период работал непрерывно круглые сутки. Обсервованные широты и долготы распределились по времени суток по шкале универсального координированного времени (UTC) так, как это показано на рис. 1.

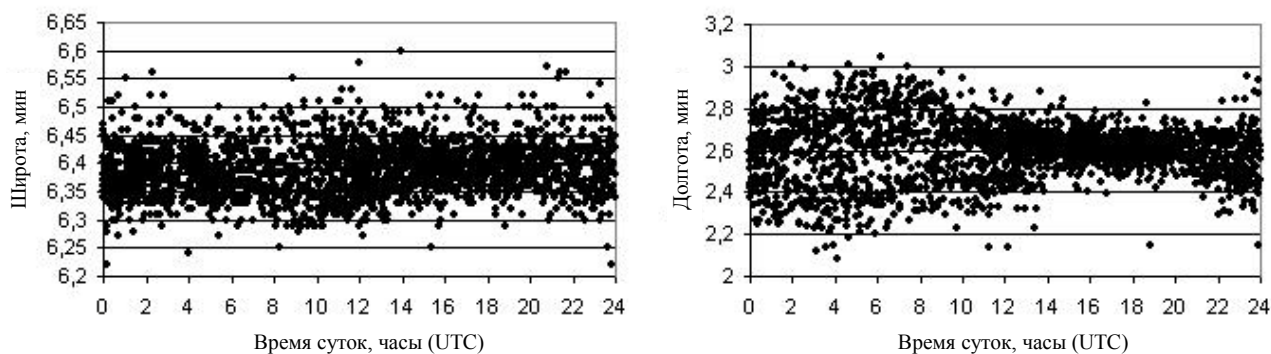


Рис. 1. Суточный ход обсервованных широт и долгот весной-осенью

На рис. 1 на левой панели можно видеть сравнительно стабильное распределение во времени суток значений широт. Дисперсия долготы распределяется во времени суток неравномерно.

Далее были рассчитаны средние, средние квадратические отклонения (СКО), асимметрии, эксцессы и размахи варьирования исходных массивов наблюдений. Результаты вычислений сведены в табл. 1. Для сравнения в эту таблицу внесены такие же параметры, полученные ранее для зимних наблюдений [3].

Как следует из табл. 1, по сравнению с зимними наблюдениями погрешности определения координат весной и осенью значительно возросли. И если СКО широты увеличилось на 8,9 %, то СКО долготы возросло на 93,7 %. Иным показателем точности выступает размах варьирования координат. Размах варьирования широты весной и осенью увеличился в 1,6 раза, а долготы возрос в 2,8 раза по сравнению с зимними наблюдениями.

Параметры распределений координат зимних и весенне-осенних наблюдений

Параметры распределения	Широта		Долгота	
	Зима	Весна-осень	Зима	Весна-осень
Среднее, мин	6,3942	6,3897	2,5974	2,5993
СКО, м	79,97	87,15	98,22	190,24
Асимметрия	0,204	0,375	-0,176	-0,233
Эксцесс	-0,291	0,627	-0,629	0,454
Размах варьирования, м	425,9	703,6	461,2	1302,2

Другим аспектом точности выступают смещения средних значений широты и долготы относительно координат антенны приёмника FSN-70, полученных с высокой точностью геодезическими способами. Понятно, что в процессе сбора экспериментальных данных положение антенны не менялось. Обозначим через  $\Delta\varphi_m$  и  $\Delta\lambda_m$  смещения в метрах средних координат. Тогда

$$\Delta\varphi_m = (\varphi'_{CP} - \varphi'_0) \frac{a(1-e^2) \operatorname{arcl}'}{\sqrt{(1-e^2 \sin^2 \varphi_0)^3}}, \quad \Delta\lambda_m = (\lambda'_{CP} - \lambda'_0) \frac{\operatorname{arcl}' a \cos \varphi_0}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \varphi_0}}, \quad (1)$$

где  $\varphi'_{CP}$  и  $\lambda'_{CP}$  – средние по всем наблюдениям значения широт и долгот соответственно, выраженные в угловых минутах,  $\varphi'_0$  и  $\lambda'_0$  – точные координаты антенны приёмника, выраженные в угловых минутах;  $a$  – размер в метрах большей полуоси референц-эллипсоида WGS-84,  $e$  – первый эксцентриситет референц-эллипсоида WGS-84.

Расчёты по формулам (1) показали, что в зимних наблюдениях смещения средних значений координат по широте и по долготу были 0,37 м к северу и 1,899 м к востоку соответственно. Средние значения широты и долготы в наблюдениях весной и осенью сместились на 7,962 м к югу и на 4,476 м к востоку. Таким образом, с позиции абсолютных погрешностей зимой координаты АБР в среднем определяются точнее, что может служить слабым утешением для терпящих бедствие.

Как отмечалось выше, существует суточная вариация ТЕС, которая определяется положением Солнца. В зимних наблюдениях [3] влияние суточной вариации ТЕС на обсервованные координаты определялись регрессионными полиномиальными степенными трендами, коэффициенты которых вычислены методом наименьших квадратов,

$$\begin{cases} \bar{\varphi}(t) = 6,34703 + 0,004511t + 0,000421t^2 - 0,000026t^3, \\ \bar{\lambda}(t) = 2,523298 + 0,015022t - 0,000492t^2 - 0,000004t^3, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\bar{\varphi}(t)$  и  $\bar{\lambda}(t)$  – значения трендов широты и долготы соответственно, выраженные в угловых минутах;  $t$  – время в часах по шкале UTC.

Аналогичные тренды, полученные в результате обработки весенних и осенних наблюдений, имеют вид:

$$\begin{cases} \bar{\varphi}(t) = 6,385304 - 0,0023954t + 0,00034653t^2 - 0,000009376t^3, \\ \bar{\lambda}(t) = 2,570508 + 0,0104267t - 0,000676116t^2 - 0,000009635t^3. \end{cases} \quad (3)$$

На рис. 2 представлены графики трендов (2), (3) широт (левая панель) и долгот зимних наблюдений (сплошные линии) и наблюдений весной и осенью (пунктирные линии).

На рис. 2 можно видеть незначительные суточные изменения широты весной и осенью по сравнению с зимним суточным ходом. Причина тому кроется в продолжительности

светлого времени суток. Для анализа точности координат весной и осенью данные выбирались по суткам, симметрично отдалённых от дней весеннего и осеннего равноденствий. За сутки весной и осенью тренд широты изменился на 0,02 мин (37 м). На 5 ч сместился максимум тренда широты в сторону большего времени суток по сравнению с зимним максимумом.

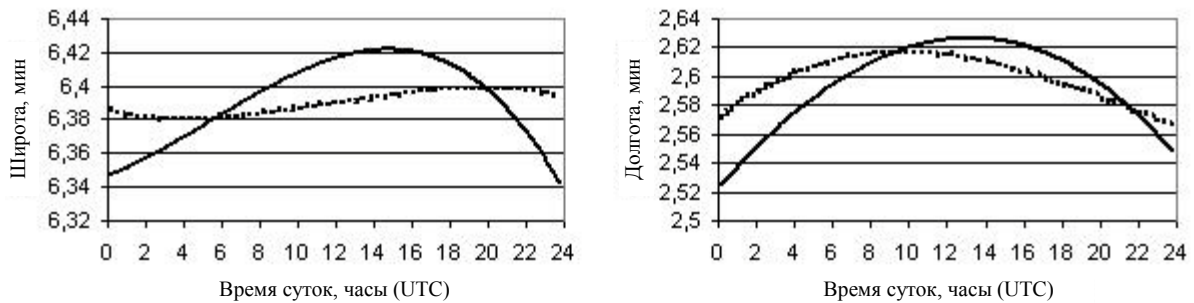


Рис. 2. Суточные тренды координат в зимних наблюдениях (сплошные линии) и в наблюдениях весной и осенью (пунктирные линии)

Как можно видеть на правой панели (см. рис. 2), суточный тренд долготы, полученный в ходе весенних и осенних наблюдений, по своей форме незначительно отличается от зимнего тренда. Суточное изменение тренда долготы весной и осенью заметно меньше зимнего и составило 0,051 мин (69,5 м). Максимум тренда долготы весной и осенью наступает раньше зимнего максимума на 4 ч.

Для оценки сезонных изменений точности определения координат терпящих бедствие экипажей и пассажиров судов и самолётов существенное значение имеет априорная информация о возможных отклонениях координат, которые определены системой КОСПАС-САРСАТ, от действительных координат. С этой целью были рассчитаны отклонения в метрах осреднённых за час координат от соответствующих высокоточных координат по формулам (1), в которых  $\varphi'_{CP}$  и  $\lambda'_{CP}$  рассчитывались следующим образом:

$$\varphi'_{CP_j} = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} \varphi'_{ji}, \quad \lambda'_{CP_j} = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} \lambda'_{ji}, \quad (4)$$

где  $j$  – номер часа суток по времени Владивостока;  $n_j$  – общее число широт и долгот, зарегистрированных в  $j$ -м часе суток за весь период наблюдений весной и осенью;  $\varphi'_{ji}$  и  $\lambda'_{ji}$  – значения обсервованных широт и долгот в угловых минутах, зарегистрированные в  $j$ -м часе суток за весь период наблюдений весной и осенью.

Графики суточных отклонений, рассчитанных по формулам (1) и (4), можно видеть на рис. 3.

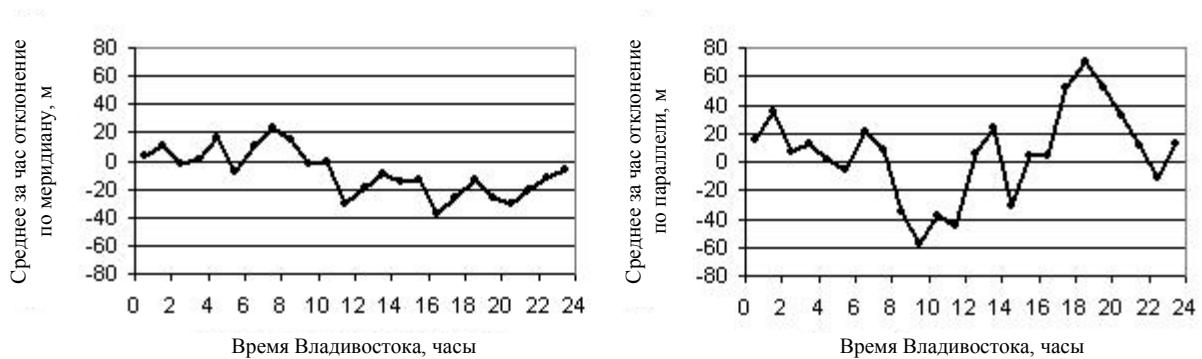


Рис. 3. Суточные изменения осреднённых координат

Анализ графиков (см. рис. 3) позволяет сделать вывод о незначительных отклонениях осреднённых за час координат по меридиану по сравнению с отклонениями по параллели. Если в первой половине суток осреднённые координаты отклоняются почти на 20 м к северу

от действительного места, то во второй половине они располагаются к югу на расстоянии до 40 м. Незначительные отклонения к востоку (до 40 м) имеют место у осреднённых координат в ночные часы суток весной и осенью. К полудню наблюдаются отклонения до 60 м к западу, а в 19 ч – до 70 м к востоку.

Чтобы оценить ожидаемые предельные отклонения координат, вычислим по каждому  $j$ -му часу суток средние квадратические отклонения (СКО) в метрах широт  $\sigma_{m_j}^{(\varphi)}$  и долгот  $\sigma_{m_j}^{(\lambda)}$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{m_j}^{(\varphi)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_j} (\varphi'_{ij} - \varphi'_{CP_j})^2}{n_j}} \cdot \frac{a(1-e^2) \operatorname{arcl}'}{\sqrt{(1-e^2 \sin^2 \varphi_0)^3}}, \\ \sigma_{m_j}^{(\lambda)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_j} (\lambda'_{ij} - \lambda'_{CP_j})^2}{n_j}} \cdot \frac{a \cos \varphi_0 \operatorname{arcl}'}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \varphi_0}}. \end{array} \right. \quad (5)$$

Графики вычисленных за каждый час суток СКО широт и долгот представлены на рис. 4.

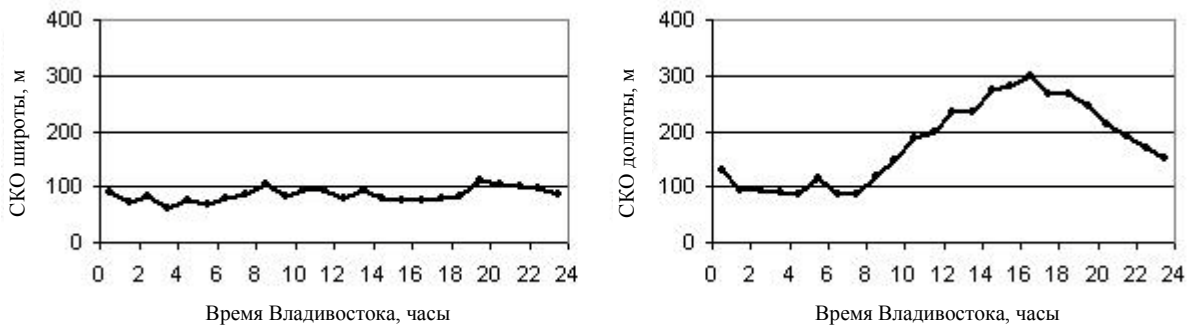


Рис. 4. Суточный ход СКО широты и долготы весной и осенью

Нетрудно заметить, что случайные погрешности определения широты места катастроф остаются практически неизменными на протяжении суток и составляют  $\pm 100$  м с вероятностью 0,68 в предположении гауссовского закона распределения случайных погрешностей. Как можно видеть на правой панели (см. рис. 4), случайные погрешности определения долготы сохраняют уровень  $\pm 100$  м с полуночи до 8 ч утра, то есть до восхода Солнца. Затем погрешности долготы увеличиваются, достигая уровня  $\pm 300$  м в 19 ч местного времени.

Полученные результаты помогают рассчитать максимальные погрешности определения места катастроф системой КОСПАС-САРСАТ весной и осенью. Если применять правило трёх сигм, то максимальные погрешности в метрах по меридиану  $\Delta\varphi_{\max}$  и по параллели  $\Delta\lambda_{\max}$  следует вычислять таким образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\varphi_{\max} = \max \Delta\varphi_m + 3 \times \max \sigma_{m_j}^{(\varphi)}, \quad \text{если } \Delta\varphi_m \text{ к северу,} \\ \Delta\varphi_{\max} = \max |\Delta\varphi_m| + 3 \times \max \sigma_{m_j}^{(\varphi)}, \quad \text{если } \Delta\varphi_m \text{ к югу,} \\ \Delta\lambda_{\max} = \max \Delta\lambda_m + 3 \times \max \sigma_{m_j}^{(\lambda)}, \quad \text{если } \Delta\lambda_m \text{ к востоку,} \\ \Delta\lambda_{\max} = \max |\Delta\lambda_m| + 3 \times \max \sigma_{m_j}^{(\lambda)}, \quad \text{если } \Delta\lambda_m \text{ к западу.} \end{array} \right.$$

Отсюда следует, что весной и осенью в первой половине суток местного времени максимальные погрешности координат по меридиану с вероятностью 0,95 составляют 320 м к



северу, а во второй половине они достигают 340 м к югу. Максимальные погрешности по параллели с той же вероятностью могут достигать 660 м к западу в первой половине суток и 970 м к востоку.

Если в оценках максимальных отклонений действительного места аварии от координат, полученных с помощью системы КОСПАС-САРСАТ, не учитывать время определения координат, то для организации поиска и спасения необходимо рассматривать площадь прямоугольника со сторонами 660 м и 1630 м. Поэтому поисковые галсы должны выполняться спасательными средствами и группами на курсах 90 и 270 градусов.

Распределение обсервованных координат относительно их средних значений в осеннее и в весеннее время года можно видеть на рис. 5.

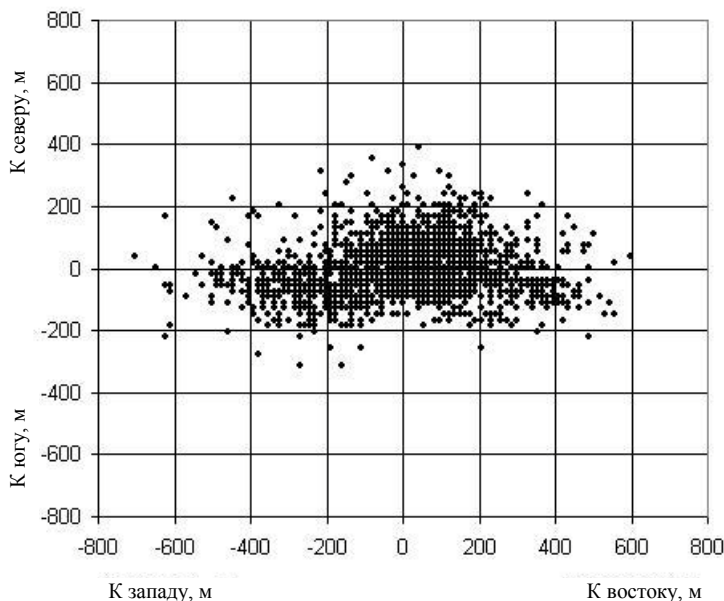


Рис. 5. Распределение центрированных координат весной и осенью

Для понимания процессов в ионосфере, влияющих на сезонные изменения точности определения координат катастроф, полезно рассмотреть распределение качественных обсерваций по времени суток. Качественными обсервациями считались только те, которые имели признак “ОК” и сопровождалась углами кульминации спутников не менее 11 и не более 74 градусов. На рис. 6 показаны графики изменения процента качественных обсерваций по каждому часу суток для зимних наблюдений (левая панель) и для наблюдений весной и осенью. Процент качественных обсерваций (см. рис. 6) рассчитывался по следующей формуле:  $p_j\% = (n_j/N) \times 100$ , где  $n_j$  – количество качественных обсерваций в  $j$ -м часу суток,  $N$  – общее количество качественных обсерваций за время наблюдений. Зимой было получено 1189 таких обсерваций. В наблюдениях осенью и весной  $N = 2129$ .

На рис. 6 можно проследить влияние солнечного терминатора на качество обсерваций. Наибольший процент надёжных определений координат в зимнее время приходился на тёмное время суток, когда физические параметры ночной ионосферы стабилизировались перед восходом и после захода Солнца.

На правой панели (см. рис. 6) видно, что удачных обсерваций весной и осенью становится меньше во время восхода и захода Солнца. Увеличение надёжных обсерваций в дневное время объясняется увеличением светлого времени суток, в течение которого ионосфера успевает стабилизироваться.

Судя по рис. 6, характер суточного хода количества надёжных обсерваций весной и осенью менее изменчив по сравнению с зимним временем. Следует отметить присутствие ярко выраженного 12-часового периода колебаний  $p_j\%$  независимо от сезона года.

**Комаровский Ю.А.**

## СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ДОПЛЕРОВСКИМИ СПУТНИКОВЫМИ НАВИГАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ

Подводя итог проделанному исследованию, следует сделать вывод о влиянии сезона года на точность определения координат терпящих бедствие. С увеличением продолжительности светлого времени суток точность ухудшается. В зимних наблюдениях на долю качественных приходилось 69,65 % наблюдений. В весенних и осенних наблюдениях их число увеличилось до 77,56 %. Следовательно, на долю наблюдений сомнительной точности приходится почти каждое четвёртое определение координат катастроф. Поэтому необходимо продолжить исследования, направленные на оценку точности координат доплеровских спутниковых навигационных систем, полученных при углах кульминации спутников менее 11 и более 74 градусов.

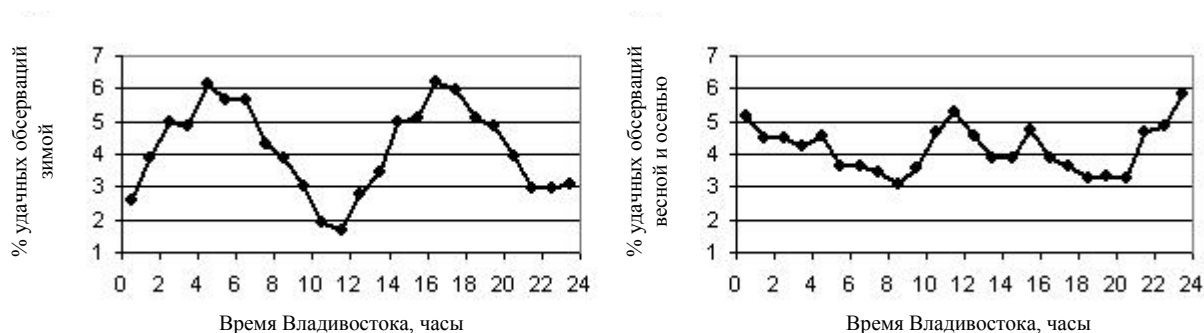


Рис. 6. Суточный ход процента качественных наблюдений

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дэвис, К. Радиоволны в ионосфере / К. Дэвис. – М.: Мир, 1973. – 502 с.
2. Международная космическая радиотехническая система обнаружения терпящих бедствие / А. И. Балашов [и др.]; под ред. В. С. Шебшаевича. – М.: Радио и связь, 1987. – 376 с.
3. Комаровский Ю. А. Повышение точности определения координат доплеровскими спутниковыми навигационными системами / Ю. А. Комаровский // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Вып. № I-1(1)/2010. Серия: Науки о природе и технике. – Комсомольск-на-Амуре: КнАГТУ, 2010. – С. 40-43.