

7. Bondarenko V.S. Sistemy upravleniya morskim transportom. — M.: Transport, 1979.-278s.
8. Bondarenko V.S. Mahurenko G.S. Opyt primeneniya metodov optimal'nogo upravleniya na morskome transporte. — M.: CBNTI, 1979. -56s.
9. Bondarenko V.S. Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya na morskome transporte. —M.: Transport, 1977. -134s.
10. Bondarenko S.N. Voprosy modelirovaniya zadachi operativnogo planirovaniya zagruzki porta//Trudy OIMF. —1989. — s. 04-107.
11. Bruhis G.E. Kommercheskaya ekspluatatsiya morskogo transporta. -M: Morskoy transport, 1985.-210s.
12. Bulov A.A. Osnovy strategicheskogo menedzhmenta: ucheb. Posobie. - SPb.: SPGUVK, 1999.-50s.
13. Buslenko N.P. Modelirovanie slozhnyh sistem. - M.: Nauka, 1978.-400s,
14. Butov A.S. Bol'shaya enciklopediya transporta: t.6. Rechnoy transport-SPb.: Elmor, 1998.-312s.
15. Voevodskiy E.N. Sistema modelej opisaniya processov upravleniya na transporte. - M: Morflot, 1989. - 89s.
16. Karakaev A.B., Hekert E.V., Galiev G.A. Metodicheskie osnovy strukturno-funktsional'nogo podhoda v sistemnom analize. Morskoe intellektual'nye tekhnologii. 2019. T. 2. № 1 (43). S. 77-81.
17. Astrein V.V., Hekert E.V. Analiticheskoe predstavlenie termina "Sistema vnutrennej bezopasnosti sudna"//Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta im. admiral F.F. Ushakova. 2015. № 3 (12). S. 12-14.
18. Petros'yan A.V., Hekert E.V. Uluchshenie bezopasnosti moreplavaniya v rajonah dejstviya sistem upravleniya dvizheniem sudov. Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta im. admiral F.F. Ushakova. 2016. № 2 (15). S. 22-24.
19. Kondrat'ev S.I., Pechnikov A.N., Hekert E.V. Ergonomicheskij podhod k ocenivaniju deyatel'nosti sudovyh specialistov: sut' problemy i podhod k ee resheniyu/Morskoe intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 4-4 (42). S. 166-174.
20. Panamarev V., Hekert E.V. Raschet koncentracii okislov azota dlya kotel'noj ustanovki AALBORG MISSIONOL s topochnym ustrojstvom kbsd-1900 i sravnenie s eksperimental'nymi dannymi. Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2015. № 3 (76). S. 75
21. Astrein V.V., Hekert E.V. Analiticheskoe predstavlenie termina "sistema vnutrennej bezopasnosti sudna"//Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta im. admiral F.F. Ushakova. 2015. № 3 (12). S. 12-14.
22. Kondrat'ev S.I., Astrein V.V., Boran-Keshish'yan A.L. Metodika reflektivnoj ocenki effektivnosti ISPPR bezopasnosti sudovozhdeniya v usloviyah perekhodnogo perioda//Morskoe intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 1-3 (41). S. 156-161.
23. Kondrat'ev S.I., Boran-Keshish'yan A.L., Popov V.V. Optimizatsiya nadezhnosti kanalov obmena dannyh v svyaznyh sistemah nacional'noj koncepcii rossijskogo segmenta e-navigacii Azovo-CHernomorskogo bassejna// Morskoe intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 1-3 (41). S. 162-169.
24. Kondrat'ev S.I., Lickevich A.P. O sredstvakh blizhnej navigacii dlya avtomatizacii processov provodki i shvartovki sudov v mestah stesnyonno anevrirovaniya. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2006. № S. S. 34-36.

УДК 629.5.072

DOI: 10.34046/aumsuomt92/11

## МЕТОД УСТАНОВЛЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРА, ВОЛНЕНИЯ, ТЕЧЕНИЯ НА АВТОМАТИЧЕСКИХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ БУЙКОВЫХ СТАНЦИЯХ (АГБС)

*А.А. Антонов, аспирант*

*Д.Е. Студеникин, кандидат технических наук*

*Ю.В. Маевская, аспирант*

При использовании современных высокоточных датчиков, применяемых, в частности, на АГБС, встает вопрос достоверности показаний и обнаружения случайных погрешностей. Точность показаний измерителей параметров гидрометеорологических факторов сегодня не удовлетворяет возросшим требованиям к точности судовождения. Поэтому требуется новый подход к определению погрешностей, а так же метод определения достоверности. Предлагаемый метод основывается на сборе и анализе данных, полученных с измерителей, правильно расположенных по описанным в статье критериям. Накопленный большой объем данных измерений аппроксимируется и обрабатывается методом скользящего среднего для получения предсказательной модели. Результаты предсказаний, в свою очередь, обрабатываются методом вариации Аллана. Такой подход обеспечивает измерение шумовой составляющей измерений. В результатах эксперимента выявлена погрешность измерений ниже заявленной точности измерителя, что свидетельствует о достоверности показаний прибора.

**Ключевые слова:** измерение гидрометеорологических факторов, достоверность, точность, критерии оценки, расположение измерителей, анализ данных, вариация Аллана.

When using modern high-precision sensors used, in particular, on AHBS, the issue of the reliability of the readings and the detection of random errors arises. The accuracy of the readings of hydrometeorological factors measuring instruments today does not satisfy the increased requirements for navigation accuracy. Therefore, a

new approach to determining errors, as well as a method for determining reliability, is required. The proposed method is based on the collection and analysis of data obtained from gauges correctly located according to the criteria described in the article. The accumulated large amount of measurement data is approximated and processed by the moving average method to obtain a predictive model. The results of the predictions, in turn, are processed by the Allan variation method. This approach provides the measurement of the noise component of the measurements. The experimental results revealed a measurement error below the declared accuracy of the gauge, which indicates the reliability of the readings.

**Key words:** measurement of hydrometeorological factors, reliability, accuracy, evaluation criteria, meter location, data analysis, Allan variation.

Основной задачей судовождения была и остается доставка грузов из порта погрузки в порт выгрузки. Решение этой задачи сводится к решению задачи безопасной проводки судна вдоль всего маршрута плавания, которая решается в процессе управления движением корпуса судна.

Для принятия верного решения при управлении движением судна следует учитывать множество факторов, среди которых одним из главных являются параметры окружающей среды. Судно, во время своего движения находится на границе двух сред: гидросферы и атмосферы, а значит на него влияют воздействия обеих сред.

Таким образом можно утверждать, что правильное управление корпусом судна невозможно без высокоточного учета влияния гидро и аэродинамических факторов, влияющих на судно.

Сегодня для целей прогнозирования воздействия гидrometeorологических сил используются данные, предоставляемые организацией Росгидромет.

Информация Росгидромет представлена в виде полей данных, которые представляют собой сетку с ячейками 100 на 100 метров, в узлах которой находится расчетные значения гидrometeorологических факторов (рисунок 1).

Модуль скорости ветра [м/с]. Дата - 2014-01-09 06:00

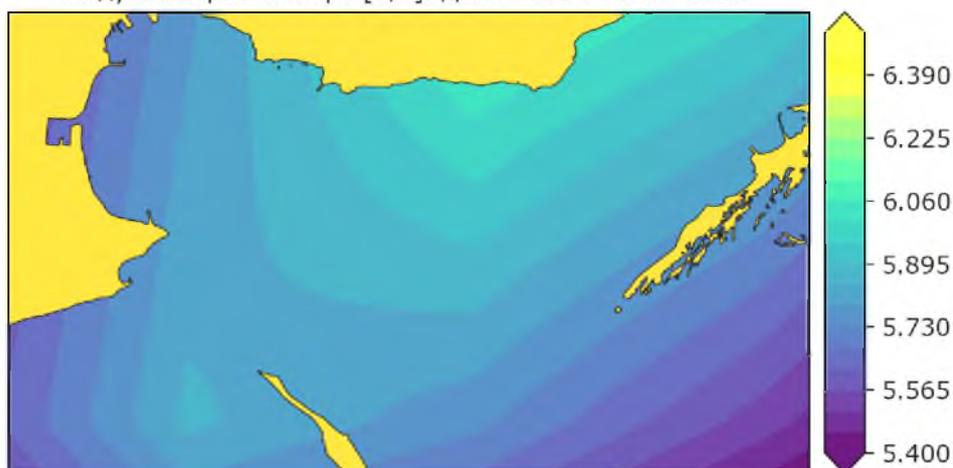


Рисунок 1 – Пример поля данных, предоставляемых Росгидрометом

Точность измерений, предоставляемых организацией Росгидромет, приведена в таблице 1. Характер предоставляемой информации - расчетный. Они получают путем обработки данных от гидrometeorологических спутников и наземных измерителей, которые располагаются на берегу на

значительной высоте над уровнем моря. Учитывая расчетных характер данных, а также расположение измерителей и частоту обновления (10 минут) можно утверждать, что достоверность этих измерений недостаточна для высокоточной проводки судна в сложных навигационных условиях.

Таблица 1 – Точность данных, предоставляемых Росгидрометом

Параметр	Среднеквадратическое отклонение	Дискретность обновления значения
Скорость течения	~ 4 см/сек	10 мин.
Курс течения	~ 10 град.	
Скорость ветра	1.5 м/сек	
Курс ветра	~ 5 град.	
Высота волны	~ 10 см	
Курс волны	~ 5 град.	
Период волны	~ 2 сек	

Для получения более надежных и высокоточных измерений применяются автоматические гидрометеорологические буйковые станции (АГБС), которые располагаются непосредственно в судоходной зоне и снабжены всем необходимым оборудованием и датчиками для измерения, хранения и передачи измерений. При использовании современных высокоточных датчиков, применяемых, в частности, на АГБС, встает вопрос достоверности показаний и обнаружения случайных погрешностей.

Высокий уровень достоверности данных АГБС достигается благодаря соблюдению ряда условий:

#### **Местоположение**

Метеорологические показатели могут значительно отличаться в удалении от берега и над сушей. Особенно, если водный участок достаточно большой. Так, например, различия скорости ветра в бухте города Керчь и на середине Керченского пролива может достигать 10 м/с. Кроме того, очевидно, что для измерения параметров течения датчик должен находиться под водой.

Таким образом, следует устанавливать измерительные станции (например, АГБС) непосредственно в судоходной зоне или в максимальной близости от судоходной зоны. В таком случае, измерения, получаемые датчиками АГБС, будут отражать гидрометеорологическую обстановку непосредственно "на месте".

#### **Высота над уровнем моря**

Скорость ветра отличается в зависимости от высоты над уровнем моря, и, соответственно, меняется сила воздействия. Поэтому важно правильно определить высоту, на которой устанавливается датчик.

Для управления движением корпуса судна наиболее важным аэродинамическим фактором является снос судна под действием ветра, который прямо пропорционален силе ветра и площади поверхности надводной части судна, а также зависит от курсового угла кажущегося ветра. Сила ветра может немного меняться при удалении от поверхности воды, однако изменение происходит равномерно. В связи с этим, адекватно мерить силу ветра на высоте, равной половине высоты надводного борта судна.

Таким образом, датчики ветра АГБС следует устанавливать на высоте, примерно равной половине высоты надводного борта среднестатистического судна, проходящего через данную судоходную зону.

Эти же принципы, однако, не работают для установления датчика течения, так как общепринято при вычислениях складывать скорости течения и судна векторально, а, следовательно, и нет смысла считать силу воздействия течения на подводную часть корпуса судна. Таким образом, датчик течения следует располагать под днищем АГБС либо на небольшой глубине, с тем чтобы параметры измеряемого течения соответствовали поверхностному течению, которое и влияет на судно.

#### **Архивация и обработка данных**

Для приобретения возможности прогнозирования измерений и исключения погрешностей, данные автоматических измерителей должны накапливаться и обрабатываться. Для этого обычно данные передаются по беспроводной связи на серверы берегового сегмента Автоматической системы гидрометеорологического мониторинга (АСГММ), которые хранят и накапливают данные, полученные от автоматических измерителей. Таким образом имеется возможность как вести наблюдения гидрометеорологических показателей «онлайн» в любой точке мира с помощью сети Интернет, так и накапливать и хранить данные непосредственно на серверах.

Анализ большого объема статистических данных позволяет определять закономерности изменения состояния окружающей среды, обнаруживать «выбросы» и случайные погрешности измерений, а также прогнозировать показания.

#### **Статистические методы обработки**

Статистический анализ данных, собранных АСГММ, осуществляется с использованием современных математических методов анализа: нелинейная регрессия и дисперсия Аллана. Применение совокупности этих методов хорошо показала себя при решении данной задачи и позволило с высокой точностью предсказывать истинные значения показаний и погрешности измерений.

Метод вариации или дисперсии Аллана - это метод, позволяющий оценивать различные виды шумов временных рядов измерений, не относящихся к систематическим погрешностям, таким как дрейф частоты.

Метод Аллана позволяет вычислить среднеквадратическое относительное двухвыборочное отклонение показаний от их истинного значения для каждого времени осреднения  $\tau$  и получить спектр шумов.

В общем виде вариация Аллана имеет вид:

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle (\bar{y}_{n+1} - \bar{y}_n)^2 \rangle$$

где  $\tau$  - время осреднения,  $\bar{y}_i$  - среднее значение измеряемого параметра на временном промежутке  $\tau$ .

Имея  $M$  пар измерений, выполненных в моменты времени  $t$  и  $t+\tau$  соответственно, получаем:

$$\sigma^2(\tau) = \left[ \frac{1}{2M} \sum_{i=0}^{M-1} (y_{i+1} - y_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Итог обработки методом Аллана - получение среднеквадратических отклонений измерений от истинных значений для каждого времени осреднения  $\tau$ .

**Порядок обработки**

Измерители выдают данные каждую секунду. Полученные данные собираются на сервере, обрабатываются и аппроксимируются за 5 минут. Такая дискретность данных обоснована в условиях управления движением судна, так как учитываемые параметры не имеют тенденции к быстрому изменению. Таким образом, разумно полагать, что значения параметров не будут меняться в течении 5 минут. Это приближении, кроме остального, поможет упростить обработку данных и поможет избежать слишком большого объема данных.

В состав каждого измерения АГБС в данном исследовании входят следующие показания:

- скорость и направление истинного ветра
- скорость и направление течения
- высота и период волны

Для удобства дальнейшей обработки, векторы скорости ветра и течения раскладываются по координатным осям  $x$  и  $y$ .

Собрав достаточно большой объем данных (авторы полагают набор данных, собираемый в течении года одним измерителем в одной и той же

позиции, достаточным), можно построить модель изменений учитываемого параметра. На основе полученной модели можно строить предсказания высокой точности, учитывая циклические во времени изменения параметров.

Для построения такой модели авторы использовали нелинейную регрессию методом взвешенного скользящего среднего. Это метод, в котором при вычислении скользящего среднего для временного ряда, последние значения исходной функции считаются более значимы чем предыдущие, при этом функция значимости линейно убывающая. Уравнение скользящей средней имеет вид [1, 4]:

$$WMA(t) = \frac{2}{n(n+1)} \sum_{i=0}^{n-1} (n-i) p_{t-i}$$

где:  $WMA$  – weighted moving average – взвешенная скользящая средняя,

$t$  – временная точка измерений,

$n$  – количество значений исходной функции, учитываемых при расчётах скользящего среднего,

$p_{t-i}$  – значение исходной функции в момент времени, отдалённый от текущего на  $i$  интервалов.

Количество учитываемых значений для построения модели подбиралось исследователями эмпирически. Подбором были выбраны оптимальные значения: {7, 8, 9}. На рисунке 2 представлен график модели, описывающие изменения 300 измерений скорости течения по оси  $x$  в северной части Керченского пролива. Данные сняты с северной АГБС Керченского пролива.

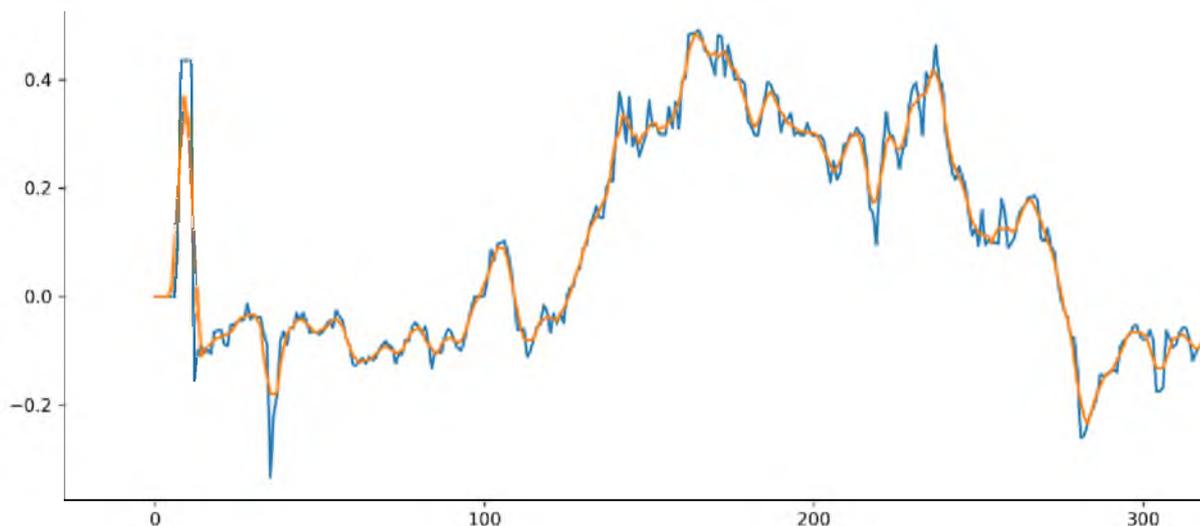


Рисунок 2 – график модели, описывающие изменения 300 измерений скорости течения по оси  $x$  в северной части Керченского пролива. Синяя линия - показания измерителей, оранжевая - модельные предсказания

Для выявления степени достоверности применяют метод вариации Аллана. В качестве пар измерений, передаваемых вариатору, используют реальные показания прибора и показание, предсказанное моделью [3]. На рисунке 3 выведены результаты обработки данных 300 измерений скорости течения по оси x в северной (слева) и южной(справа) частях Керченского пролива. В колонке слева указаны временные промежутки осреднения  $\tau$ . В правых колонка указаны среднеквадратические отклонения показаний.

tau	adev	adev
1	0.052609	0.0434278
2	0.0344707	0.0268719
4	0.0177766	0.0135491
8	0.00701503	0.00564239
16	0.0027271	0.00226069
32	0.00140108	0.00124815
64	0.000755977	0.000583098
128	0.000360407	0.000329451
256	0.000291511	0.000274997

Рисунок 3 – результаты обработки вариацией Аллана данных 300 измерений скорости течения по оси x в северной (слева) и южной(справа) частях Керченского пролива

Как видно из рисунка, даже при минимальном времени осреднения, среднеквадратическое отклонение едва превышает 0.05 узлов (примерно

0.026 м/с), а это меньше заявленной точности измерителя (0.1 узла). Уровень погрешности меньше точности измерителя является основанием считать показания достоверными.

Таким образом, получается выявить степень зашумленности показаний, а также определить спектр шумов и среднеквадратическую погрешность измерений. Для определения спектра шумов строят график зависимости десятичного логарифма среднеквадратического отклонения, полученного вариацией Аллана, от десятичного логарифма времени осреднения. По наклону этого графика понимают, шум какого типа присутствует в данных[3].

Таблица 2 – Соотношение наклона графика среднеквадратического отклонения и шумового спектра

Наклон $\sigma^2(\tau)$ -графика	Тип погрешности в терминах спектральной плотности шума
+2	Тренд приращения выходного сигнала
+1	Красный (коричневый) шум приращения
0	Фликкер-шум
-1	Белый шум
-2	Шум квантования

В качестве примера, график вариации Аллана, полученной в результате обработки данных 300 измерений скорости течения по оси x в северной части Керченского пролива, показывает присутствие исключительно шума квантования в данных (рисунок 4). Таким образом, можно сделать заключение, о чистоте получаемых измерений [2].

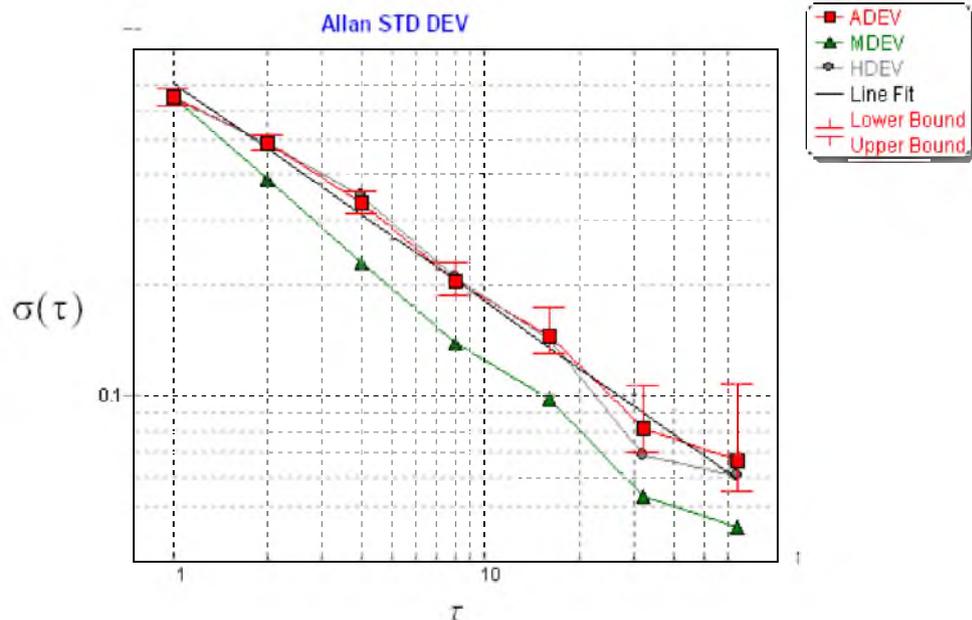


Рисунок 4 – График десятичного логарифма среднеквадратического отклонения, полученного вариацией Аллана от десятичного логарифма времени осреднения

### Заключение

Предложенный метод позволяет оценивать точность и достоверность результатов измерений параметров ветра, течения, волнения, полученных автоматическими измерителями, а также определять спектр шумов измерений. При правильной установке измерителей и анализе достаточного большого объема измерений, удается получить погрешность измерений меньше, чем точность датчика, что говорит о высокой надежности показаний датчика. В данной работе метод был испытан на данный, полученных с реального измерителя, находящегося на АГБС в Керченском проливе. Анализ показал высокую надежность измерений, получаемых в режиме «онлайн» от измерителя.

### Литература

1. Грешилов А.А., Стакун В.А., Стакун А.А. Математические методы построения прогнозов // Радио и связь. – 1997. – 112 с.
2. Кутовой Д.А., Перепелкина С.Ю., Федотов А.А. Использование вариации Аллана для практического определения структуры шумов инерциальных измерителей // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2015. – 15(4). – 67-71.
3. Рамиян Ф., (2009). Измерение вариации Аллана анализатором фазовых шумов. Указание к применению изделий фирмы Rohde&Schwarz.
4. Marz N., Warren A.J., (2015). Big Data Principles and Best Practices of Scalable Real-Time Data Systems. Manning Publications Co.
5. Астреин В.В., Хекерт Е.В. Аналитическое представление термина "Система внутренней безопасности судна" // Вестник государственного морского университета им. адмирала Ф.Ф. Ушакова. – 2015. – № 3 (12). – С. 12-14.
6. Петросьян А.В., Хекерт Е.В. Улучшение безопасности мореплавания в районах действия систем управления движением судов. Вестник государственного морского университета им. адмирала Ф.Ф. Ушакова. 2016. № 2 (15). С. 22-24.
7. Кондратьев С.И., Печников А.Н., Хекерт Е.В. Эргономический подход к оцениванию деятельности судовых специалистов: суть проблемы и подход к ее решению // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 4-4 (42). – С. 166-174.
8. Астреин В.В., Хекерт Е.В. Аналитическое представление термина "система внутренней безопасности судна" // Вестник государственного морского университета им. адмирала Ф.Ф. Ушакова. – 2015. – № 3 (12). – С. 12-14.
9. Кондратьев С.И., Боран-Кешишьян А.Л., Попов В.В. Оптимизация надежности каналов обмена данными в связных системах национальной концепции российского сегмента e-навигации Азово-Черноморского бассейна // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 1-3 (41). – С. 162-169.
10. Кондратьев С.И., Липкевич А.П. О средствах ближней навигации для автоматизации процессов

проводки и швартовки судов в местах стесненного маневрирования // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2006. – № 5. – С. 34-36.

11. Кондратьев С.И., Астреин В.В., Боран-Кешишьян А.Л. Методика рефлексивной оценки эффективности ИСППР безопасности судовождения в условиях переходного периода // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 1-3 (41). – С. 156-161.

### REFERENCES

1. Greshilov A. A., Stakun V. A., Stakun A. A. (1997). Matematicheskie metody postroeniya prognozov. Radio i svyaz', 112 s.
2. Kutovoj D.A., Perepelkina S.YU., Fedotov A.A. (2015). Ispol'zovanie variacii allana dlya prakticheskogo opredeleniya struktury шумов инерциальных измерителей. Vestnik YUzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo universiteta, 15(4), 67-71.
3. Ramian F., (2009). Izmerenie variacii Allana analizatorom fazovyh шумов. Ukazanie k primeneniyu izdelij firmy Rohde&Schwarz.
4. Marz N., Warren A.J., (2015). Big Data Principles and Best Practices of Scalable Real-Time Data Systems. Manning Publications Co.
5. Astrein V.V., Hekert E.V. Analiticheskoe predstavlenie termina "Sistema vnutrennej bezopasnosti sudna" // Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta im. admiral F.F. Ushakova. 2015. № 3 (12). S. 12-14.
6. Petros'yan A.V., Hekert E.V. Uluchshenie bezopasnosti moreplavaniya v rajonah dejstviya sistem upravleniya dvizheniem sudov. Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta im. admiral F.F. Ushakova. 2016. № 2 (15). S. 22-24.
7. Kondrat'ev S.I., Pechnikov A.N., Hekert E.V. Ergonomicheskij podhod k ocenivaniyu deyatel'nosti sudovyh specialistov: sut' problemy i podhod k ee resheniyu // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 4-4 (42). S. 166-174.
8. Astrein V.V., Hekert E.V. Analiticheskoe predstavlenie termina "sistema vnutrennej bezopasnosti sudna" // Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta im. admiral F.F. Ushakova. 2015. № 3 (12). S. 12-14.
9. Kondrat'ev S.I., Boran-Keshish'yan A.L., Popov V.V. Optimizaciya nadezhnosti kanalov obmena dannyh v svyaznyh sistemah nacional'noj koncepcii rossijskogo segmenta e-navigacii Azovo-CHernomorskogo bassejna // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 1-3 (41). S. 162-169.
10. Kondrat'ev S.I., Lickevich A.P. O sredstvakh blizhnej navigacii dlya avtomatizacii processov provodki i shvartovki sudov v mestah stesnyonnogo manevrirovaniya. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2006. № 5. S. 34-36.
11. Kondrat'ev S.I., Astrein V.V., Boran-Keshish'yan A.L. Metodika refleksivnoj ocenki effektivnosti ISPPR bezopasnosti sudovozhdeniya v usloviyah perekhodnogo perioda // Morskie intellektual'nye tekhnologii. – 2018. – № 1-3 (41). – С. 156-161.