

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-209-221

ASSESSMENT OF THE PROSPECTS FOR USING METEOROLOGICAL SATELLITE DATA FOR PLANNING A VESSEL ROUTE IN THE ARCTIC WATERS

V. M. Grinyak^{1,3}, D. A. Akmaykin², A. S. Devyatisilnyi³

¹ — Vladivostok State University of Economics and Service,
Vladivostok, Russian Federation

² — Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoi,
Vladivostok, Russian Federation

³ — Institute of Automation and Control Processes Far Eastern Branch of RAS,
Vladivostok, Russian Federation

Planning a route for a vessel's passage from a port of departure to a port of destination is a topical, complicated and multifaceted problem. Due to the constant weather and ice condition changes along the vessel's course the problem of planning an optimum route should be solved dynamically taking into consideration a current and predicted situation. Thus, using the information provided by the meteorological services according to satellite monitoring data is considered promising. Nowadays there is a great number of controlled means of sensing which allows us to obtain the information on both atmosphere and hydrosphere conditions of the Earth practically in real time. At present an orbital grouping of the Earth remote sensing satellites for measuring surface wind speed over the ocean, ice conditions and significant wave height has over ten space vehicles, and their number is constantly increasing. Within the framework of e-navigation development, using the meteorological data directly on shipboard has become possible. The problem of modeling the satellite monitoring to evaluate the frequency of updating the data on weather in the selected position of the earth's surface, which are provided by existing meteorological services, is considered in the paper. The well-known equation of artificial satellite motion in an elliptical orbit is the basis of this model. The obtained results contribute to formulate a systematized concept that the use of meteorological satellite data to solve the problem of planning long range navigation in view of weather and ice conditions is promising. In case there are data from only one satellite, even with the widest swath (e.g. QuikScat), the mean time of data obtainment (the data age) at the Arctic latitudes will be from some hours up to twelve hours. The Average Wait Time of the sensing data for both an individual meteorological satellite and a group of meteorological satellites has been analyzed in the paper. The graphs of the time intervals distribution between consecutive observations of positions on the Earth surface by the different groups of meteorological satellites at the Arctic latitudes are presented. The conclusion on the implementability of planning the vessel route, taking into account the ice conditions when there is a surface wind and sea along the intended vessel course, in view of the information obtained from existing satellite weather sensors is made.

Keywords: navigation safety, route planning, polar waters, weather satellite, meteorological data, satellite track, queuing model.

For citation:

Grinyak, Victor M., Denis A. Akmaykin, and Alexander S. Devyatisilnyi. "Assessment of the prospects for using meteorological satellite data for planning a vessel route in the Arctic waters." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 209–221. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-209-221.

УДК 519.68:15:681.5

ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ МЕТЕОСПУТНИКОВ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ МАРШРУТА СУДНА В АРКТИЧЕСКИХ ВОДАХ

В. М. Гриняк^{1,3}, Д. А. Акмайкин², А. С. Девятисильный³

¹ — Владивостокский государственный университет экономики и сервиса,
Владивосток, Российская Федерация

² — Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского, Владивосток, Российская Федерация

³ — Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Российская Федерация.

Статья посвящена проблеме планирования маршрутов морских судов. Рассматривается задача поиска оптимального маршрута судна при его следовании в арктических водах, в характерных для полярных акваторий сложных метеоусловиях. Указывается на перспективность использования данных о погоде (ветре, волнении, ледовой обстановке), предоставляемых специальными метеосервисами по данным спутникового мониторинга. Отмечается, что проблемой спутниковых метеоданных является то, что они не обеспечивают глобального актуального представления о погоде, поскольку для полного покрытия сканерами поверхности Земли одному спутнику требуется значительное время. Поэтому особенно важным является исследование характера спутниковых метеоданных с точки зрения их характерного «возраста» и возможности комплексирования информации различных метеосервисов, которому посвящена предлагаемая работа. Ставится и решается задача моделирования движения искусственного спутника Земли в классических представлениях небесной механики. Отмечается возможность упрощенного решения задачи для спутников, движущихся по орбитам, близких к круговым. Путем вычисления траектории спутника определяется область земной поверхности, наблюдаемая спутником на каждом обороте. Отмечается специфическая особенность наблюдения приполярной области, обусловленная комплексированием орбитального движения на низких и средних орбитах и собственного вращения Земли. С учетом вычислений выполнена оценка среднего времени ожидания данных зондирования арктической области как от отдельного спутника, так и от их группы. Дана оценка площади арктической зоны (50–90 % в зависимости от числа спутников) с приемлемым возрастом метеоданных. Предложен подход к выбору метеоспутников для сбора данных о погоде по планируемому маршруту следования судна, основанный на известной вероятностной модели массового обслуживания. Сделан вывод о реализуемости задачи планирования маршрута судна с учетом данных о погоде, полученных с использованием имеющихся технических средств.

Ключевые слова: безопасность судоходства, планирование маршрута, полярные воды, метеоспутник, метеоданные, траектория спутника, модель массового обслуживания.

Для цитирования:

Гриняк В. М. Оценка перспектив использования данных метеоспутников для планирования маршрута судна в арктических водах / В. М. Гриняк, Д. А. Акмайкин, А. С. Девятисильный // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 209–221. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-209-221.

Введение (Introduction)

Обеспечение безопасности мореплавания представляет собой многоаспектную проблему, постоянно привлекающую внимание исследователей [1]–[3]. К настоящему времени в рамках этой проблемы сформировался широкий круг характерных задач, одной из которых является задача планирования маршрута перехода судна от порта отправления к порту назначения [4].

Планирование маршрута перехода осуществляется с учетом многих факторов. Основными из них являются географические характеристики района перехода и технические возможности судна (например, максимальная дальность плавания, скорость, осадка, длина). Известны методы планирования маршрута, связанные с решением оптимизационных задач, учитывающие направление и скорость ветра и течения по маршруту и минимизирующие время перехода и расход топлива. Основанные на классических моделях теории управления [5] или алгоритмах эвристического типа [6]–[8], они зачастую характеризуются высокой вычислительной сложностью [8]–[10], что требует нетривиальных подходов к их реализации.

В Арктике при планировании маршрута перехода особую значимость имеют не экономические критерии, а показатели траектории, связанные с безопасностью [11]–[13]. Полярные воды характеризуются повышенной сложностью судоходства, прежде всего, из-за неблагоприятных погодных условий: частые и сильные шторма, плохая видимость, сложная ледовая обстановка, опас-

ность обледенения, быстрая смена погоды. Ввиду такого множества факторов и их изменчивости, опыта и знаний судоводителя может быть недостаточно для принятия правильного решения о выборе безопасного маршрута. В этом случае целесообразно использование автоматизированных систем планирования маршрута, которые должны решать задачу динамически, с учетом текущей и прогнозируемой обстановки, причем данные о ней должны быть максимально достоверными. Является перспективным использование информации, предоставляемой специальными метеосервисами по данным спутникового мониторинга [14]. В настоящее время существует большое количество спутников (более десяти), оборудованных средствами дистанционного зондирования Земли, позволяющих получить информацию о состоянии атмосферы и гидросферы практически в реальном времени и их количество постоянно увеличивается [15], [16]. Спутниковые средства способны измерять скорость ветра над водной поверхностью и высоту волн, оценивать ледовые условия. В рамках развития е-Навигации стало возможным использование таких метеоданных непосредственно на судах [17], [18].

С точки зрения обсуждаемой задачи планирования безопасного маршрута перехода проблемой использования спутниковых метеоданных является то, что они не обеспечивают глобального актуального представления о состоянии льда, морского волнения и ветра, так как для полного покрытия своими сканерами поверхности Земли одному спутнику требуется значительное время. Другими словами, данные от одного спутника о погоде и ледовых условиях по пути следования судна могут оказаться устаревшими. Поэтому является актуальным исследование характера спутниковых метеоданных в контексте их «возраста» и возможности комплексирования информации различных метеосервисов для решения задачи планирования безопасного маршрута перехода судна.

В опубликованных ранее работах [19], [20] авторами моделировался процесс спутникового мониторинга с целью оценки частоты обновления данных о погоде в выбранной точке поверхности Земли. Однако задача решалась для низких широт (до 60°). Между тем трассы спутников в высоких широтах (от 60° до 90°) имеют специфические особенности. В настоящей работе проведен анализ среднего времени ожидания данных зондирования арктической области как от отдельного спутника, так и от группы метеоспутников. Представляемые результаты позволяют сделать выводы о количестве спутников, необходимых для получения актуальных метеоданных, и выработать подход к выбору метеосервисов для планирования безопасного маршрута в арктических водах.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Примем за основу математической модели задачи известные уравнения движения искусственных спутников по эллиптической орбите. Будем использовать правую ортогональную систему отсчета x, y, z , с началом в центре Земли, осью z , направленной на север и плоскостью xy , лежащей в плоскости экватора. Движение искусственного спутника Земли может быть приближенно описано известной ограниченной задачей двух тел [21], [22]:

$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = -\mu G \frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^3}, \quad (1)$$

где $\mathbf{r}$ — радиус-вектор спутника; G — гравитационная постоянная; μ — масса Земли.

Решение этого дифференциального уравнения можно (также приближенно) описать известным уравнением Кеплера [22]:

$$E - e \sin E = M, \quad (2)$$

где M — угловое расстояние между перицентром орбиты и радиус-вектором гипотетического тела, движущегося по круговой орбите радиуса, равного большой полуоси a искомой эллиптической

орбиты (средняя аномалия); E — угловой параметр, называемый *эксцентрической аномалией*, используемый для выражения переменной длины радиуса-вектора $\mathbf{r}$; e — эксцентриситет орбиты (величина, определяемая параметрами орбиты).

Значение величины M в момент времени t может быть найдено по формуле

$$M(t) = (t - t_0) \sqrt{\frac{\mu G}{a^3}}, \quad (3)$$

где t_0 — момент времени одного из проходов спутником перицентра, принимаемый за начало отсчета; a — величина, определяемая параметрами орбиты.

Значение величины E в выражении обычно находится путем решения уравнения Кеплера относительно E численными методами. Например, популярен метод простой итерации, где последовательные приближения E имеют вид $E_{i+1} = -e \sin E_i + M$.

Далее определяется величина ϑ , называемая *истинной аномалией* — это угол, между радиус-вектором спутника r и направлением на перицентр. Истинная аномалия ϑ связана с эксцентрической аномалией E уравнением

$$\operatorname{tg} \frac{\vartheta}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \operatorname{tg} \frac{E}{2}. \quad (4)$$

Длина радиус-вектора спутника

$$|\mathbf{r}| = a(1 - e \cos E). \quad (5)$$

Рассмотрим вспомогательную систему координат $x'y'$, связанную с эллипсом движения спутника. Пусть ее начало отсчета лежит в центре Земли, ось x' направлена вдоль большой полуоси эллипса, ось y' перпендикулярна ей. Координаты точки местонахождения спутника в системе $x'y'$ могут быть вычислены следующим образом:

$$\begin{aligned} x' &= |\mathbf{r}| \cos \vartheta; \\ y' &= |\mathbf{r}| \sin \vartheta. \end{aligned} \quad (6)$$

Координаты спутника в системе отсчета xuz определяются наклоном орбиты и положением перицентра относительно системы координат xuz , которые вычисляются путем последовательного умножения вектора $\mathbf{r}' = (x', y', 0)$ на матрицы поворота M_x, M_y, M_z :

$$\mathbf{r} = M_x M_y M_z \mathbf{r}'. \quad (7)$$

Здесь

$$M_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}; \quad M_y = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix}; \quad M_z = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где α, β, γ — углы поворота вокруг координатных осей.

По известным значениям компонент радиус-вектора спутника $\mathbf{r}$ в момент времени t легко определить географические координаты точки поверхности Земли, над которой находится спутник:

$$\varphi(t) = \arcsin \left(\frac{z(t)}{|\mathbf{r}(t)|} \right); \quad (8)$$

$$\lambda(t) = \arctg(y(t), x(t)) - (t - t_0)\omega_3 - \lambda(t_0). \quad (9)$$

Здесь $\varphi(t), \lambda(t)$ — географические координаты (широта и долгота) точки трассы спутника; ω_3 — угловая скорость вращения Земли; $\lambda(t_0)$ — угловое положение нулевого меридиана Земли в начальный момент времени.

В формуле (9) функция арктангенса доопределяется до области значений $(-\pi, \pi)$, так что $\arctg(y(t), x(t)) = \arctg(y(t) / x(t)) + C$, значение константы C зависит от знака переменных x и y .

В том случае, если орбита спутника близка к круговой ($e < 0,02$), в рассматриваемой задаче с достаточной степенью приближения можно считать, что длина радиус-вектора, равная большой полуоси a , и угловая скорость движения спутника, равная $\sqrt{\mu G/a^3}$, постоянны.

Моделируя движение спутника при заданных значениях высоты и наклонения орбиты, а также учитывая ширину полосы поверхности Земли, сканируемой его сенсорами, можно получить информацию о характерном возрасте метеоданных. Пусть t_i^s — время начала i -го наблюдения спутником точки земной поверхности, t_i^f — время окончания i -го наблюдения. Для каждой точки на поверхности Земли за весь моделируемый период времени будем иметь две последовательности из N таких значений.

Средним временем ожидания спутника назовем следующую величину:

$$t_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=2}^N (t_i^f - t_{i-1}^s)}{N-1}. \quad (10)$$

С учетом механики движения спутника, сферической формы Земли и равномерности ее собственного вращения среднее время ожидания при $N \rightarrow \infty$ будет одинаковым для точек, находящихся на одной широте. Поэтому следует рассматривать среднее время ожидания спутника на той или иной широте, которое и будет соответствовать среднему возрасту метеоданных. Представление о среднем возрасте метеоданных позволяет оценить их пригодность для планирования безопасных маршрутов судов.

Результаты (Results)

Оценки среднего возраста метеоданных проводились для некоторых спутников, связанных с существующими информационными сервисами [23]–[25]. Интерес, прежде всего, представляли спутники, трассы которых пролегают в полярных широтах, имеющие относительно широкую полосу захвата (табл. 1).

Таблица 1

Параметры орбит и сенсоров некоторых метеоспутников

№ п/п.	Название спутника	Высота орбиты, км	Наклонение орбиты, град.	Ширина полосы захвата, км
1	QuikScat	803	98,6	1410
2	ScatSat-1	720	98,28	1400
3	Hy-2A	971	99,34	1350
4	ERS	780	98,5	500
5	ASCAT	800	98,6	500
6	Jason-2	1380	66,05	315

Движение спутников моделировалось в течение 20 сут, затем задавались 36 точек на каждой из широт (по одной точке на каждые 10 град долготы) и вычислялось среднее время между последовательными наблюдениями каждой точки $t_{\text{ср}}$. Полученные для 36 точек одной широты результаты усреднялись.

На рис. 1 показан фрагмент проведенных расчетов — часть поверхности Арктики, наблюдаемая спутником ScatSat-1 в течение 3,5 ч. В течение этого времени спутник делает около двух оборотов, сканируя более 45 % поверхности в области широт от 70° до 90°, т. е. почти половину этой зоны.

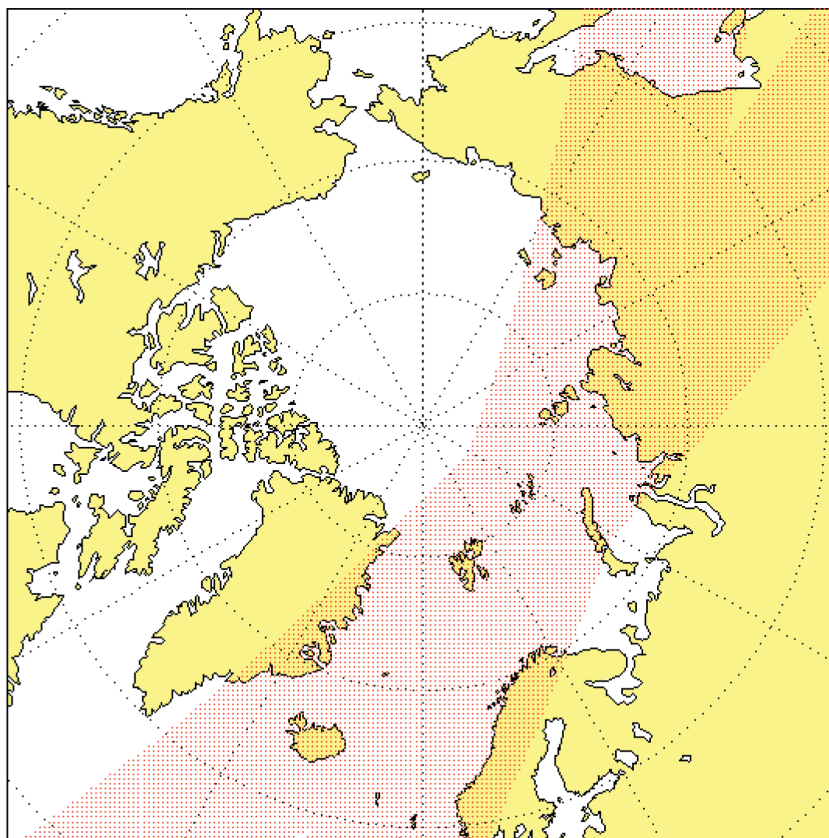


Рис. 1. Поверхность приполярной области, наблюдаемая спутником ScatSat-1 за два оборота (красная полоса)

В табл. 2 показаны результаты вычислений среднего «возраста» метеоданных спутников на различных широтах.

Таблица 2

Среднее время ожидания спутниковых данных о погоде на различных широтах, ч

№ п/п.	Название спутника	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°
1	QuikScat	10,1	8,6	6,0	4,0	4,6	11,8	Нет
2	ScatSat-1	10,8	8,6	6,4	3,8	4,2	7,6	Нет
3	Hy-2A	11,2	9,0	5,8	4,6	6,0	Нет	Нет
4	ERS	30,4	24,4	18,4	11,2	9,2	Нет	Нет
5	ASCAT	31,8	25,8	18,4	11,2	9,8	Нет	Нет
6	Jason-2	>48	>48	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет

Так, данные о погоде на 85 град. широты могут предоставить только спутники QuikScat и ScatSat-1, среднее время между наблюдениями составит 11,8 и 7,6 ч соответственно. Ни один из спутников «не видит» полюса. Видна явная зависимость времени ожидания данных от ширины полосы захвата (прямая) и высоты орбиты (обратная). Спутник Jason-2, из-за узкой полосы захвата, высокой орбиты и ее наклона, практически «не видит» полярной области, а время обновления его данных составляет более двух суток. Характерный период обновления данных в наиболее востребованной судоводителями области широт 70–80° (Северный Морской путь, Северо-Западный проход) составляет 3,8–18,4 ч.

Перспективным способом уменьшения среднего времени ожидания метеоданных является работа не с одним, а сразу с несколькими спутниками. На рис. 2 показана поверхность Арктики, наблюдаемая системой спутников ScatSat-1 и ERS в течение 3,5 ч.

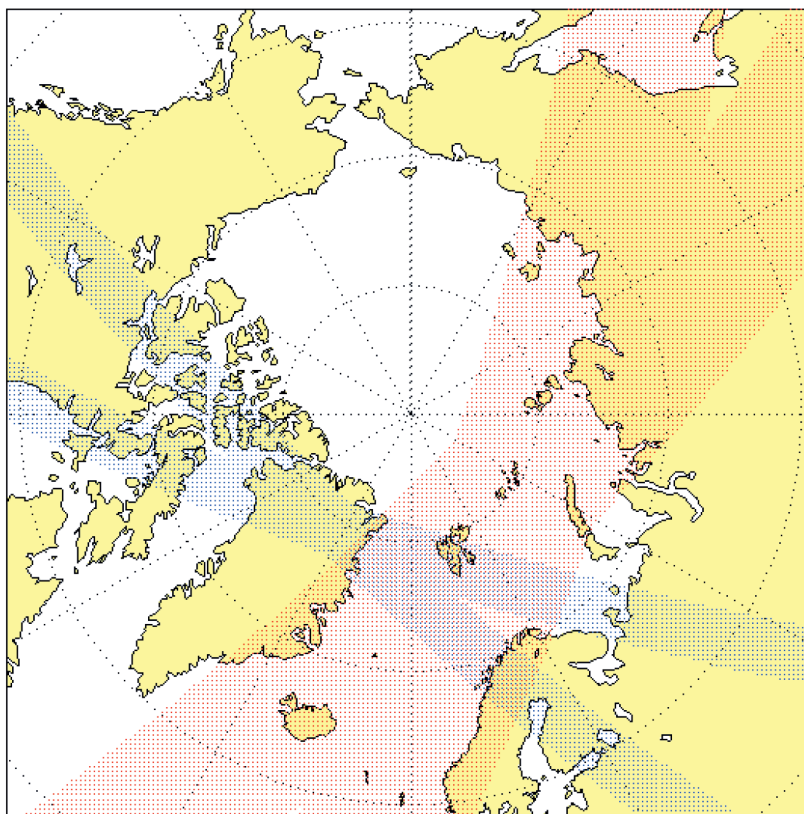


Рис. 2. Поверхность приполярной области, наблюдаемая системой спутников ScatSat-1 (красная полоса) и ERS (синяя полоса) за два оборота

Видно, что дополнительный спутник существенно (примерно до 60 %) увеличивает площадь сканируемой за это время поверхности в области широт от 70° до 90°. Табл. 3 содержит результаты вычислений среднего «возраста» метеоданных некоторых таких систем, состоящих из двух спутников.

Таблица 3

**Среднее время ожидания данных группы
из двух метеоспутников на различных широтах, ч**

№ п/п.	Название спутников	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°
1	QuikScat + Hy-2A	5,4	4,2	3,0	2,0	2,6	11,8	Нет
2	ScatSat-1 + ERS	7,8	6,2	4,8	2,9	3,0	7,6	Нет
3	Hy-2A + ASCAT	8,2	6,4	4,4	3,4	3,8	Нет	Нет

Видно, что период обновления данных в области широт 70–80° составляет 2,0–4,8 ч. Такой временной интервал вполне соответствует ожиданиям характерной скорости изменения погодных условий в указанных широтах [26]. Как показали ранее проведенные исследования [19], [20], время ожидания наблюдения спутником той или иной точки поверхности Земли $t_i^f - t_{i-1}^s$ можно приближенно описать известной вероятностной моделью массового обслуживания [27]. В этом случае вероятность F того, что время ожидания меньше заданного t , описывается экспоненциальным распределением:

$$F(t) = 1 - e^{-qt},$$

где $q = 1/m$ — среднее количество наблюдений точки за единицу времени; m — среднее время (математическое ожидание) между наблюдениями.

В рассматриваемой задаче величина $t_{\text{ср}}$ является оценкой величины m . При таких модельных представлениях функция распределения вероятности для группы из n спутников при известном среднем времени ожидания для каждого из них: $m_1, m_2, \dots, m_n$, вычисляется следующим образом:

$$F_{12 \dots n}(t) = 1 - e^{-(q_1 + q_2 + \dots + q_n)t},$$

где $q_1 = 1/m_1, q_2 = 1/m_2$ и т. д.

Для среднего время ожидания группы из n спутников $m_{12 \dots n}$ справедлива формула

$$\frac{1}{m_{12 \dots n}} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \dots + \frac{1}{m_n}.$$

Это соотношение полностью подтверждается результатами моделирования. В этом легко убедиться, сопоставив данные табл. 2 и 3. Теперь, оценив по данным моделирования среднее время ожидания $t_{\text{ср}}$ каждого спутника, можно подобрать набор метеоспутников, способных обеспечить требуемое значение периода обновления данных.

Обсуждение (Discussion)

Представленные результаты исследования позволяют получить представление о возможности использования данных метеоспутников при решении задач планирования маршрута в арктических водах. Даже если имеются данные всего одного спутника, среднее время ожидания (возраст) данных для спутников с «широкой» полосой захвата (QuikScat, ScatSat-1 и Hy-2A) составляет от полсуток до нескольких часов (табл. 2). С учетом характерной динамики погодных условий и возможной экстраполяции данных (прогноза погоды и ледовой обстановки) это делает вполне возможным решение исходной задачи планирования безопасного маршрута перехода. Для спутников с «узкой» полосой захвата (ERS, ASCAT, Jason-2) возраст данных может составлять более суток. Достоверный прогноз погоды на столь большом интервале времени зачастую невозможен [26], что ставит под сомнение перспективу решения оптимизационной задачи планирования маршрута в целом.

Вместе с тем данные спутников с «узкой» полосой захвата позволяют существенно увеличить площадь поверхности полярной зоны, по которой имеются «свежие» метеоданные (рис. 2 и 3) при включении их в систему спутников. В силу особенностей орбитального движения и собственно вращения Земли, спутниковые трассы соседних витков одного спутника в полярных широтах пролегают близко друг от друга, что уменьшает площадь наблюдаемой в единицу времени поверхности (красные полосы на рис. 1). Включение в систему еще одного спутника позволяет качественно уменьшить средний возраст имеющихся метеоданных. Например, добавление к спутнику ScatSat-1 спутника ERS позволило уменьшить среднее время ожидания данных на 2–3 ч (см. рис. 2 и 3, табл. 2 и 3). Из рис. 3 видно, что система, состоящая из этих двух спутников, в течение 12 ч выполняет наблюдение на территории до 90 % площади Арктики, при этом примерно на 80 % территории имеются данные, «возраст» которых составляет менее 8 ч. Включение в систему трех-четырех спутников, в том числе с широкой полосой, даст еще более заметный эффект.

Несмотря на хорошие результаты, которые дает модель массового обслуживания при решении задачи оценки среднего времени ожидания данных системы спутников, следует отметить, что время ожидания наблюдения спутником той или иной точки поверхности Земли $t_i^f - t_{i-1}^s$ является не случайной, а детерминированной величиной. Поэтому функция экспоненциального распределения описывает рассматриваемый процесс лишь приближенно, давая только качественную картину явления.

Данные о погоде, полученные со спутников с «широкой» полосой захвата, зачастую характеризуются невысоким разрешением 30–50 км [28], [29]. Однако, как показывают результаты моделирования [30]–[32], разрешение порядка 50 км вполне позволяет адекватно решать задачу планирования маршрута перехода судна с учетом погодных условий.

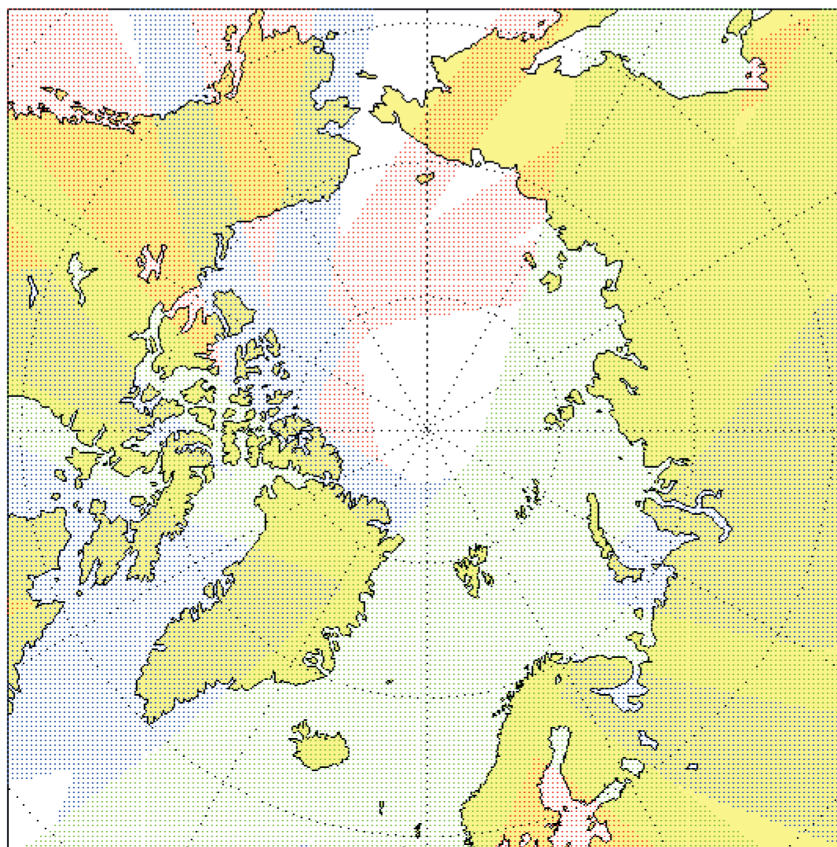


Рис. 3. Возраст метеоданных группы спутников ScatSat-1 и ERS: зеленый фон — до 4 ч, синий фон — 4–8 ч, красный фон — 8–12 ч

Заключение (Conclusion)

Задача планирования маршрута перехода судна является актуальной в судоводительской практике. Одним из путей дальнейшего повышения эффективности судовождения в арктических водах является оптимизация маршрута с учетом данных о погоде и ледовой обстановке. Для решения соответствующей оптимизационной задачи необходимы актуальные данные о погоде, получение которых возможно с помощью специальных метеоспутников. Предложенная математическая модель задачи, основанная на уравнениях движения спутника по эллиптической орбите и дополненная представлениями классической задачи массового обслуживания, позволяет оценивать характерное время ожидания данных зондирования Земли группой метеоспутников, в том числе в области полярных широт. Полученные оценки позволяют формировать набор спутников, необходимых для получения актуальных метеоданных, а также требования к работе соответствующих метеосервисов.

Комплексирование данных нескольких спутников существенно уменьшает время ожидания данных о погоде в той или иной точке поверхности Земли. Наблюдаемый эффект заметен даже при включении в систему спутников с «узкой» полосой захвата. Результаты моделирования задачи позволяют сделать вывод о принципиальной возможности получения актуальных (возраст 2–3 ч) метеоданных по наиболее востребованным путям следования судов в Арктике (в частности, Северному морскому пути). Это, в свою очередь, делает возможным создание информационной системы поддержки принятия решений судоводителями при выборе маршрута перехода судна в условиях полярных вод на основе спутниковых метеоданных.

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проект 18-29-16129.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гагарский Э. А. Безопасность судоходства при проектировании морского порта / Э. А. Гагарский, С. Г. Козлов, С. А. Кириченко // Транспорт: наука, техника, управление. — 2018. — № 1. — С. 14–18.
2. Дмитриев В. И. Методы обеспечения безопасности мореплавания при внедрении беспилотных технологий / В. И. Дмитриев, В. В. Каретников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1149–1158. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1149-1158.
3. Седова Н. А. Оценка степени опасности наблюдаемой цели на море с использованием систем искусственного интеллекта / Н. А. Седова, В. А. Седов, Н. Г. Левченко // Морские интеллектуальные технологии. — 2017. — Т. 3. — № 4 (38). — С. 106–114.
4. Акмайкин Д. А. Обзор функциональных возможностей и перспективы современных автоматизированных систем планирования маршрута судна / Д. А. Акмайкин, Д. Б. Хоменко, С. Ф. Ключева // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 237–251. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-237-251.
5. Чертков А. А. Автоматизация выбора кратчайших маршрутов судов на основе модифицированного алгоритма Беллмана – Форда / А. А. Чертков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1113–1122. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1113-1122.
6. Федоренко К. В. Исследование основных параметров генетического алгоритма применительно к задаче поиска оптимального маршрута / К. В. Федоренко, А. Л. Оловянных // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 714–723. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-714-723.
7. Lu R. A semi-empirical ship operational performance prediction model for voyage optimization towards energy efficient shipping / R. Lu, O. Turan, E. Boulougouris, C. Banks, A. Incecik // Ocean Engineering. — 2015. — Vol. 110. — Pp. 18–28. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.07.042.
8. Lin Y.-H. The optimization of ship weather-routing algorithm based on the composite influence of multi-dynamic elements / Y.-H. Lin, M.-C. Fang, R. W. Yeung // Applied Ocean Research. — 2013. — Vol. 43. — Pp. 184–194. DOI: 10.1016/j.apor.2013.07.010.
9. Wang H.B. Application of Real-Coded Genetic Algorithm in Ship Weather Routing / H. B. Wang, X. G. Li, P. F. Li, E. I. Veremey, M. V. Sotnikova // The Journal of Navigation. — 2018. — Vol. 71. — Is. 4. — Pp. 989–1010. DOI: 10.1017/S0373463318000048.
10. Сотникова М. В. Алгоритмы формирования маршрутов движения судов с учетом прогноза погодных условий / М. В. Сотникова // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. — 2009. — № 2. — С. 181–196.
11. Афонин А. Б. Концепция развития судоходных трасс акватории Северного морского пути / А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 81–87. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-81-87.
12. Ольховик Е. О. Информационная модель морских транспортных потоков Северного морского пути / Е. О. Ольховик, А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 97–105. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-97-105.
13. Трипольников В. П. О регистрации рисков ледовой навигации на северном морском пути / В. П. Трипольников // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 2 (30). — С. 125–130. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-125-130.
14. Ружичка З. З. Информационно-технологическое обеспечение задач обработки и представления радиометрических спутниковых данных / З. З. Ружичка, К. В. Музалевский, О. Э. Якубайлик, Е. Г. Швец // Информационные технологии. — 2017. — № 7. — С. 529–535.
15. Ocean Surface Topography Mission/Jason-2 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.nasa.gov/mission_pages/ostm/main/#V-ebOyiLSUl. (дата обращения: 01.01.2019).
16. OSTM/Jason-2 Products Handbook / под ред. J. P. Dumont [и др.]. — 2001. — 72 p.
17. Гладских Е. П. Развитие средств навигационного оборудования прибрежной зоны российской федерации в соответствии с концепцией е-навигации / Е. П. Гладских [и др.] // Навигация и гидрография. — 2016. — № 43. — С. 13–21.

18. Малеев П. И. Особенности, состояние и перспективы развития е-навигации морских объектов / П. И. Малеев, Н. И. Леденев // Навигация и гидрография. — 2012. — № 33. — С. 16–20.
19. Акмайкин Д. А. Комплексное использование данных метеоспутников для измерения параметров ветра и волнения вдоль маршрута судна / Д. А. Акмайкин, О. А. Букин, В. М. Гриняк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 941–953. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-941-953.
20. Гриняк В. М. Исследование реализуемости планирования оптимального маршрута судна с учетом спутниковых метеоданных / В. М. Гриняк, Д. А. Акмайкин, Ю. С. Иваненко // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. — 2017. — № 2 (17). — С. 15.
21. Балк М. Б. Элементы динамики космического полета / М. Б. Балк. — М.: Наука, 1965. — 338 с.
22. Маркеев А. П. Теоретическая механика / А. П. Маркеев. — М.: ЧеРо, 1999. — 572 с.
23. Chelton D. B. On the Use of QuikSCAT Scatterometer Measurements of Surface Winds for Marine Weather Prediction / D. B. Chelton, M. H. Freilich, J. M. Sienkiewicz, J. M. Von Ahn // Monthly Weather Review. — 2006. — Vol. 134. — Is. 8. — Pp. 2055–2071. DOI: 10.1175/MWR3179.1.
24. Risien C. M. A satellite-derived climatology of global ocean winds / C. M. Risien, D. B. Chelton // Remote Sensing of Environment. — 2006. — Vol. 105. — Is. 3. — Pp. 221–236. DOI: 10.1016/j.rse.2006.06.017.
25. Верба В. С. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. С. Верба. — М.: Радиотехника, 2010. — 675 с.
26. Chelton D. B. Scatterometer-Based Assessment of 10-m Wind Analyses from the Operational ECMWF and NCEP Numerical Weather Prediction Models / D. B. Chelton, M. H. Freilich // Monthly Weather Review. — 2005. — Vol. 133. — Is. 2. — Pp. 409–429. DOI: 10.1175/MWR-2861.1.
27. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей / Б. В. Гнеденко. — М.: Наука, 1988. — 445 с.
28. Бондур В. Г. Методы восстановления спектров морского волнения по спектрам аэрокосмических изображений / В. Г. Бондур, А. Б. Мурынин // Исследование Земли из космоса. — 2015. — № 6. — С. 3. DOI: 10.7868/S0205961415060020.
29. Гавриков А. В. Модификация базы данных спутниковой альтиметрии GLobWave для решения задач диагностики поля морского волнения / А. В. Гавриков, М. А. Крицкий, В. Г. Григорьева // Океанология. — 2016. — Т. 56. — № 2. — С. 322–327. DOI: 10.7868/S0030157416020064.
30. Гриняк В. М. Оптимизация маршрута перехода судна с учетом параметров волнения / В. М. Гриняк, Д. А. Акмайкин, В. И. Люлько // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. — 2018. — № 4. — С. 15.
31. Гриняк В. М. Планирование маршрутов судов с учетом опасности морского волнения / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный, Д. А. Акмайкин // Транспорт: наука, техника, управление. — 2018. — № 12. — С. 10–16.
32. Гриняк В. М. Планирование маршрута с учетом опасности волнения по пути следования судна / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный, Д. А. Акмайкин // Навигация и гидрография. — 2018. — № 53. — С. 14–23.

REFERENCES

1. Gagarskiy, E. A., S. G. Kozlov, and S. A. Kirichenko. “Safety of navigation in the design of the seaport.” *Transport: science, equipment, management* 1 (2018): 14–18.
2. Dmitriev, Vladimir I., and Vladimir V. Karetnikov. “Methods of ensuring the safety of navigation when implement unmanned technology.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.6 (2017): 1149–1158. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1149-1158
3. Sedova, Nelly A., Viktor A. Sedov, and Natalia G. Levchenko. “Risk assessment of the observed target on sea using artificial intelligence system.” *Marine Intellectual Technologies* 3.4(38) (2017): 106–114.
4. Akmaykin, Denis A., Dmitry B. Khomenko, and Svetlana F. Klueva. “Overview features and perspectives of modern automated ship route planning systems.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 237–251. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-237-251.
5. Chertkov, Alexander A. “Automation selection shortcuts routes of ships on the basis of modified BellmanFord Algorithm.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1113–1122. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1113-1122.

6. Fedorenko, Kirill V., and Arkadii L. Olovyannikov. "Research of the main parameters of the genetic algorithm for the problem of searching the optimal route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.4 (2017): 714–723. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-714-723.
7. Lu, Ruihua, O. Turan, E. Boulougouris, C. Banks, and A. Incecik. "A semi-empirical ship operational performance prediction model for voyage optimization towards energy efficient shipping." *Ocean Engineering* 110 (2015): 18–28. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.07.042.
8. Lin, Yu-Hsien, Ming-Chung Fang, and Ronald W. Yeung. "The optimization of ship weather-routing algorithm based on the composite influence of multi-dynamic elements." *Applied Ocean Research* 43 (2013): 184–194. DOI: 10.1016/j.apor.2013.07.010.
9. Wang, Hong-Bo, Xiao-Gang Li, Peng-Fei Li, Evgeny I. Veremey, and Margarita V. Sotnikova. "Application of Real-Coded Genetic Algorithm in Ship Weather Routing." *The Journal of Navigation* 71.4 (2018): 989–1010. DOI: 10.1017/S0373463318000048.
10. Sotnikova, M. V. "Algorithms of marine ships routing taking into account weather forecast." *Vestnik of Saint Petersburg university applied mathematics. Computer science. Control processes* 2 (2009): 181–196.
11. Afonin, Andrej B., and Aleksandr L. Tezikov. "The concept of development of shipping routes along the northern sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.1 (2017): 81–87. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-81-87.
12. Olhovik, Evgeniy O., Andrej B. Afonin, and Aleksandr L. Tezikov. "Information model of maritime transport flows of the North sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.1 (2018): 97–105. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-97-105.
13. Tripolnikov, V. P. "On registration of ice navigation risks along the Northeast Passage." *Arctic: Ecology and Economy* 2(30) (2018): 125-130. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-2-125-130.
14. Ruzicka, Z. Z., K. V. Muzalevskiy, O. E. Yakubailik, and E. G. Shvetsov. "Information Technological Support of Tasks of Processing and Submission of Radiometric Satellite Data." *Information Technologies* 23.7 (2017): 529–535.
15. Ocean Surface Topography Mission/Jason-2. Web. 1 Jan. 2019 <http://www.nasa.gov/mission_pages/ostm/main/#.V-ebOyiLSUL>.
16. Dumont, J. P., et al, eds. *OSTM/Jason-2 Products Handbook*. 2001.
17. Gladskih, E. P., V. N. Kostin, V. A. Maksimov, and Yu. M. Repin. "Razvitie sredstv navigatsionnogo oborudovaniya pribrezhnoi zony rossiiskoi federatsii v sootvetstvii s kontseptsiei e-navigatsii." *Navigatsiya i gidrografiya* 43 (2016): 13–21.
18. Maleev, P.I., and N.I. Ledenev. "Osobennosti, sostoyanie i perspektivy razvitiya e-navigatsii morskikh ob»ektov." *Navigatsiya i gidrografiya* 33 (2012): 16–20.
19. Akmaykin, Denis A., Oleg A. Bukin, and Victor M. Grinyak. "Complex employment of data of meteorological satellites for meterage wind and wave parameters along the ship's route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 941–953. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-941-953.
20. Grinyak, V. M., D. A. Akmaykin, and Yu. S. Ivanenko. "Feasibility study for ship trajectory planning problem using marine weather data from satellites." *Modeling, optimization and information technology* 2(17) (2017): 15.
21. Balk, M. B. *Elementy dinamiki kosmicheskogo poleta*. M.: Nauka, 1965.
22. Markeev, A. P. *Teoreticheskaya mekhanika*. M.: CheRo, 1999.
23. Chelton, Dudley B., M. H. Freilich, J. M. Sienkiewicz, and J. M. Von Ahn. "On the use of QuikSCAT scatterometer measurements of surface winds for marine weather prediction." *Monthly Weather Review* 134.8 (2006): 2055–2071. DOI: 10.1175/MWR3179.1.
24. Risien, Craig M., and Dudley B. Chelton. "A satellite-derived climatology of global ocean winds." *Remote Sensing of Environment* 105.3 (2006): 221–236. DOI: 10.1016/j.rse.2006.06.017.
25. Verba, V. S. *Radiolokatsionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya*. M.: Radiotekhnika, 2010.
26. Chelton, Dudley B., and Michael H. Freilich. "Scatterometer-based assessment of 10-m wind analyses from the operational ECMWF and NCEP numerical weather prediction models." *Monthly Weather Review* 133.2 (2005): 409–429. DOI: 10.1175/MWR-2861.1.
27. Gnedenko, B. V. *Kurs teorii veroyatnostei*. M.: Nauka, 1988.
28. Bondur, V. G., and A. B. Murynin. "Methods for retrieval of sea wave spectra from aerospace image spectra." *Izvestiya. Atmospheric and oceanic physics* 52.9 (2016): 877–887. DOI: 10.1134/S0001433816090085.

29. Gavrikov, A. V., M. A. Krinitsky, and V. G. Grigorieva. "Modification of Globwave satellite altimetry database for sea wave field diagnostics." *Oceanology* 56.2 (2016): 301–306. DOI: 10.1134/S0001437016020065.
30. Grinyak, V. M., D.A. Akmaykin, and V. I. Lulko. "Ships route planning with respect of sea wave properties." *Modeling, optimization and information technology* 4 (2018): 15.
31. Grinyak, V. M., A. S. Devyatisilny, and D. A. Akmaykin. "Route planning for vessels with respect to sea waves danger." *Transport: science, equipment, management* 12 (2018): 10–16.
32. Grinyak, V. M., A. S. Devyatisilny, and D. A. Akmaykin. "Ships Route Planning with Respect of Sea Waves Danger." *Navigation and Hydrography* 53 (2018): 14–23.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гриняк Виктор Михайлович —
доктор технических наук, профессор
Владивостокский государственный университет
экономики и сервиса
690014, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Гоголя, 41
e-mail: victor.grinyak@gmail.com

Акмайкин Денис Александрович —
кандидат физико-математических наук, доцент
Морской государственный университет имени
адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: akmaykin@gmail.com

Девятисильный Александр Сергеевич —
доктор технических наук,
главный научный сотрудник
Институт автоматизации и процессов
управления ДВО РАН
690041, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Радио, 5
e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Grinyak, Victor M. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Vladivostok State University of Economics
and Service
41 Gogolya Str., Vladivostok, 690014,
Russian Federation
e-mail: victor.grinyak@gmail.com

Akmaykin, Denis A. —
PhD, associate professor
Maritime State University named
after admiral G.I. Nevelskoi
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: akmaykin@gmail.com

Devyatisilnyi, Alexander S. —
Dr. of Technical Sciences,
Chief Researcher
Institute of Automation
and Control Processes FEBRAS
5, Radio Str., Vladivostok, 690041,
Russian Federation
e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

Статья поступила в редакцию 6 марта 2019 г.
Received: March 6, 2019.