

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-941-953

COMPLEX EMPLOYMENT OF DATA OF METEOROLOGICAL SATELLITES FOR METERAGE WIND AND WAVE PARAMETERS ALONG THE SHIP'S ROUTE

D. A. Akmaykin¹, O. A. Bukin¹, V. M. Grinyak²

¹ — Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoi,
Vladivostok, Russian Federation

² — Vladivostok State University of Economics and Service,
Vladivostok, Russian Federation

The problem of constructing optimal routes for sea-going vessels, in addition to accounting for accounting many factors of an organizational and technical nature, requires detailed information on the forecast of the meteorological situation along the estimated route of the vessel. The existing meteorological satellites allow solving this problem, but the orbits and the width of the probing band of these satellites limit the areas of water where the necessary parameters can be measured. As a result, processing of the sensing data of one satellite does not allow obtaining continuous information along the route of the vessel for the necessary time intervals. To reduce the water areas, where there are gaps in determining of the necessary meteorological parameters, it is possible; if simultaneously use data from several satellites. The purpose of work is to analyze the possibility of complex use of data obtained from various satellite meteosensors.

In this article considered following satellite meteosensors QuikScat, ScatSat-1, Hy-2A, RapidScat, ERS, ASCAT, Jason-2. The satellites of this meteosensors, have differing altitude, inclination of the orbit, and having a different scanning bandwidth. In the paper, simulated the trajectories of the satellites, which are the carriers of the described sensors, and the geometrical location of the points on the Earth, observed by the sensors either. An analysis of the average time of expectation of data sounding from both a single and a group of meteorological satellites was carried out. Graphs of the distribution of time intervals between consecutive observations of a point on the earth's surface by various groups of meteorological satellites at various latitudes (at the equator, latitude 30 and 60 degrees) are presented. Information integration from several meteorological satellites significantly reduces the time of acquisition of satellite sounding data and allows to significantly reducing the areas of water areas along the route of the vessel where the satellite data absent. For aprioristic assessment of time of obtaining satellite data, the function of probability for time intervals where does not exceed a certain value between the next observations are presented. It is shown that in case of use of information from several satellites, this function can be approximately described by the known probabilistic queuing model. Key parameters of model are: the number of satellites, the angle of an inclination of their orbits and and the scanning bandwidth of the Earth's surface of each of the of the considered satellites. Using this model, it is possible to calculate a set of meteorological satellites, which will allow you to receive the required meteo data with a given probability.

As a result shown, that the feasibility of planning the route of the vessel, taking into account the data on the near-surface wind and surface waves along the planned route of the vessel, taking into account the information obtained from the currently existing satellite weather sensors.

Keywords: ship traffic control, route planning, Earth satellite motion, meteorological satellite, weather data, meteo data, time of data employment, queuing model.

For citation:

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.

УДК 519.68:15:681.5

КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ МЕТЕОСПУТНИКОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРА И ВОЛНЕНИЯ ВДОЛЬ МАРШРУТА СУДНА

Д. А. Акмайкин¹, О. А. Букин¹, В. М. Гриняк²

¹ — Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского,
Владивосток, Российская Федерация

² — Владивостокский государственный университет экономики и сервиса,
Владивосток, Российская Федерация

Проблема построения оптимальных маршрутов движения морских судов, помимо учета множества факторов организационного и технического характера, требует детальной информации о прогнозе метеорологической обстановки вдоль предполагаемого маршрута судна. При выборе безопасного маршрута движения судна наиболее важными метеопараметрами являются: направление и сила ветра, высота и направление волнения морской поверхности. Существующие в настоящее время метеоспутники позволяют решать эту задачу, но площади акваторий, где восстанавливаются необходимые параметры, ограничены орбитами и шириной полосы зондирования этих спутников. В результате обработка данных зондирования одного спутника не даёт возможности получить непрерывную информацию вдоль маршрута судна за необходимые временные интервалы. В работе показано, что, если использовать одновременно данные сразу нескольких спутников, уменьшаются площади акваторий, где существуют разрывы в определении необходимых метеопараметров.

Целью работы является анализ возможности комплексного использования данных, получаемых с различных спутниковых метеосенсоров. Рассмотрены спутниковые погодные сенсоры QuikScat, ScatSat-1, Ну-2А, RapidScat, ERS, ASCAT, Jason-2, отличающиеся высотой, наклоном орбиты, а также имеющие различную ширину полосы зондирования. В работе моделируются площади морских акваторий, в пределах которых возможно получение необходимых данных с выбранных метеоспутников. Проведен анализ среднего времени ожидания данных зондирования как от отдельного, так и от группы метеоспутников. Представлены графики распределения промежутков времени между последовательными наблюдениями точки на земной поверхности различными группами метеоспутников на различных широтах (на экваторе, на широте 30 и 60 град.). Комплексирование информации с нескольких метеоспутников существенно сокращает время получения данных спутникового зондирования, позволяя значительно сократить площади акваторий вдоль маршрута судна, где существуют разрывы спутниковых данных. Для априорной оценки времени получения спутниковых данных представлена функция вероятности того, что интервал времени между соседними наблюдениями заданной точки не превысит определенного значения. Показано, что в случае использования информации с нескольких спутников данная функция приближенно может быть описана известной вероятностной моделью массового обслуживания. Основными параметрами модели являются: количество спутников, угол наклона их орбит и ширина полосы сканирования Земной поверхности каждого из рассматриваемых спутников. Используя данную модель, можно рассчитать набор метеоспутников, которые позволят с заданной вероятностью получать необходимые метеоданные.

Сделан вывод о реализуемости планирования маршрута судна с учетом данных о приповерхностном ветре и поверхностном волнении вдоль предполагаемого маршрута судна с учетом информации, получаемой с существующих в настоящее время спутниковых погодных сенсоров.

Ключевые слова: управление движением судов, планирование маршрута, движение спутника Земли, метеоспутник, метеоданные, время получения данных, модель массового обслуживания.

Для цитирования:

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.

Введение

Планирование оптимального движения морского судна представляет собой актуальную, сложную и многоаспектную проблему, привлекающую внимание многих исследователей [1]–[5]. В рамках этой проблемы в настоящее время принято выделять задачи планирования траектории движения судна на локальной акватории и планирования маршрута перехода от порта отправления к порту назначения. Целью планирования траектории судна на локальной акватории является обеспечение навигационной безопасности в условиях коллективного движения [6], [7]. Основной целью планирования маршрута перехода является оптимизация движения, например, плавание по кратчайшему из возможных путей за кратчайшее время, с минимальным расходом топлива и т. п. (в зависимости от ситуации критерии оптимизации могут быть самыми различными) [8], [9].

Планирование маршрута перехода осуществляется с учётом многих факторов, основными из которых являются географические характеристики района перехода и технические возможности судна (например, максимальная дальность плавания, скорость, осадка, длина). Существенное

влияние на решение соответствующей оптимизационной задачи оказывают и погодные условия по пути следования судна. Характер движения в штормовых условиях коренным образом отличается от такового в спокойную погоду, и для достижения оптимального пути плавания может потребоваться реализация совершенно разных маршрутов и режимов движения [10] – [12]. При этом следует иметь в виду фундаментальный принцип оптимальности Беллмана, согласно которому оптимальный маршрут плавания есть совокупность оптимальных движений на всём его протяжении [13].

В силу постоянного изменения погодных условий по пути следования судна, задача планирования оптимального маршрута должна решаться динамически, с учётом текущей и прогнозируемой погоды. В данном случае максимально достоверные сведения о погоде позволяют точнее решить соответствующую оптимизационную задачу. И здесь перспективным является использование информации, предоставляемой специальными метеосервисами по данным спутникового мониторинга [14], [15]. В настоящее время существует большое количество средств дистанционного зондирования, позволяющих получить информацию о состоянии атмосферы и гидросферы Земли практически в реальном времени. Орбитальная группировка спутников дистанционного зондирования Земли для измерения скорости приповерхностного ветра над океаном и значимых высот волн в настоящее время насчитывает более десятка космических аппаратов, и это количество постоянно увеличивается [16] – [18]. В рамках развития е-Навигации стало возможным использование таких метеоданных непосредственно на судах.

С точки зрения рассматриваемой задачи планирования маршрута перехода, проблемой использования спутниковых метеоданных является то, что они не обеспечивают глобального актуального представления о состоянии морского волнения и ветра, так как для полного покрытия своими сканерами поверхности Земли одному спутнику требуется значительное время. Другими словами, данные о состоянии погоды по пути следования судна от одного спутника могут оказаться устаревшими. Поэтому является необходимым проведение исследований характера получения спутниковых метеоданных в контексте их комплексного использования для решения задачи оптимизации движения судна.

В настоящей работе рассматривается задача моделирования процесса спутникового мониторинга с целью оценки частоты обновления данных о погоде в выбранной точке поверхности Земли, предоставляемых существующими метеосервисами. В основу модели положены известные уравнения движения искусственных спутников по эллиптической орбите. Результаты решения задачи позволяют рассчитать количество спутников, необходимых для получения актуальных метеоданных, и выработки подхода к выбору метеосервисов для оптимального планирования маршрута в том или ином районе Мирового океана.

Методы и материалы

Для анализа возможностей космического мониторинга поверхности Земли необходимо рассчитать траектории движения спутниковых погодных сенсоров с учетом их характеристик (высота, наклонение и тип орбиты). Для расчетов обычно используют правую ортогональную систему отсчёта xyz , с началом в центре Земли и осью z , направленной на север и плоскостью xy , лежащей в плоскости экватора. Движение искусственного спутника Земли может быть приближённо описано известной ограниченной задачей двух тел [19], [20]:

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

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

При эллиптическом движении спутника (именно такой характер носит движение всех метеоспутников) решение этого дифференциального уравнения может быть (в свою очередь, приближённо) описано известным уравнением Кеплера [20]:

$$E - e \sin E = M,$$

где M — угловое расстояние между перигеием орбиты и радиус-вектором гипотетического тела, движущегося по круговой орбите радиуса, равного большой полуоси a искомой эллиптической орбиты (средняя аномалия); E — угловой параметр, используемый для выражения переменной длины радиус-вектора r , называемый *эксцентрисической аномалией*; e — эксцентриситет орбиты.

При известных величинах a и e , определяемых параметрами орбиты, значение величины M в момент времени t находится по формуле

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

где t_0 — момент времени одного из прохождений спутником перигеия, принимаемый за начало отсчёта.

Значение величины E определяется путём решения уравнения Кеплера относительно данной величины численными методами (например, методом простой итерации, где последовательные приближения E имеют вид $E_{n+1} = -e \sin E_n + M$).

После этого находится величина ϑ — угол между радиус-вектором спутника r и направлением на перигеий (истинная аномалия), которая связана с эксцентрисической аномалией E уравнением

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

Длина радиус-вектора r при этом $|r| = a(1 - e \cos E)$.

Далее могут быть вычислены координаты точки местонахождения спутника в системе координат $x'y'$, связанной с эллипсом (начало отсчёта лежит в центре Земли, ось x' направлена вдоль большой полуоси, ось y' перпендикулярна ей):

$$x' = |r| \cos \vartheta;$$

$$y' = |r| \sin \vartheta.$$

Координаты спутника в системе отсчёта xuz определяются наклоном орбиты, положением перигеия относительно системы координат xuz и вычисляются путём последовательного умножения вектора $r' = (x', y', 0)$ на матрицы поворота M_x, M_y, M_z , так что

$$r = M_x M_y M_z r',$$

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

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

Зная значение радиус-вектора спутника r в момент времени t , легко определить географические координаты точки поверхности Земли, над которой находится спутник:

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

$$\lambda(t) = \operatorname{arctg}(y(t), x(t)) - \omega_3(t - t_0) - \lambda(t_0),$$

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

Функция арктангенса в данном случае доопределена до области значений $(-\pi, \pi)$, так что $\operatorname{arctg}(y(t), x(t)) = \operatorname{arctg}(y(t)/x(t)) + C$, а значение константы C зависит от знака переменных x и y .

Измерительные устройства спутников, используемые для определения погодных условий, характеризуются некоторой шириной полосы сканирования поверхности Земли. Имея это в виду и мо-

делируя движение одного или нескольких спутников представленным способом, можно получить геометрическое место точек земной поверхности, наблюдаемых спутником на заданном интервале времени. Кроме того, для каждой точки поверхности можно определить моменты времени наблюдения её спутником и, соответственно, интервалы времени, между наблюдениями. Эти данные позволяют оценить характерный «возраст» спутниковых метеоданных и получить представление об их пригодности для рассматриваемой здесь задачи планирования маршрутов морских судов.

Результаты

Исследования проводились на основе данных некоторых метеоспутников, связанных с соответствующими информационными сервисами. Прежде всего, интерес представляли спутники, имеющие относительно широкую полосу захвата (табл. 1) [15], [21], [22]. Вначале моделировалось движение выбранного спутника в течение некоторого интервала времени и вычислялась его траектория на поверхности Земли. Затем задавались 360 точек на каждой из оцениваемых параллелей (по одной точке на каждый градус долготы) и вычислялись моменты времени прохождения спутников над ними (с учётом ширины полосы захвата). После этого по полученным данным вычислялось время между последовательными наблюдениями каждой точки и связанные с ним величины.

Таблица 1

Параметры 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	RapidScat	435	51,65	900
5	ERS	780	98,5	500
6	ASCAT	800	98,6	500
7	Jason-2	1380	66,05	315

Для примера на рис. 1 показана часть поверхности Земли, наблюдаемая спутником QuikScat в течение 3,5 ч (выделена синим цветом). Видно, что за это время спутник успевает сделать чуть больше двух витков, что соответствует наблюдению около 15 % поверхности Земли в экваториальных широтах и около 30 % поверхности в области широты 55°.

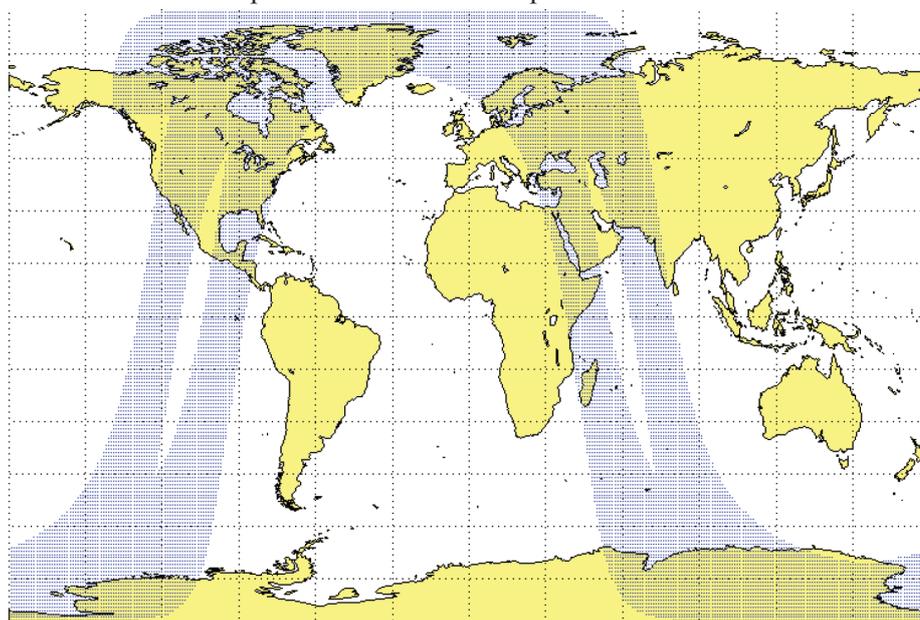


Рис. 1. Поверхность Земли, наблюдаемая спутником QuikScat за 3,5 ч

На рис. 2 представлено характерное время получения метеоданных спутника QuikScat в той или иной точке поверхности Земли. По оси абсцисс отложен интервал времени t между последовательными наблюдениями точки поверхности, а по оси ординат — доля точек P , для которых время между наблюдениями меньше заданного. Приведены данные для различных широт: экватор (сплошная линия), 30° (пунктир) и 60° (точки). Моделирование движения спутника проводилось в течение 72 ч. Среднее время ожидания данных спутника составило 21,3 ч на экваторе, 13,6 ч на широте 30° и 11,4 ч на широте 60° . Таким образом, для сбора информации о погоде на 80 % поверхности экваториальных широт спутнику QuikScat потребуется около 24 ч и около 12 ч на широте 30° .

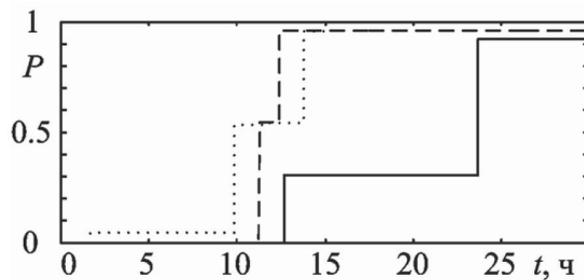


Рис. 2. Распределение времени между последовательными наблюдениями поверхности Земли спутником QuikScat

На рис. 3 показана часть поверхности Земли, наблюдаемая группой из четырех спутников: QuikScat (синий), ScatSat-1 (пурпурный), RapidScat (красный) и Jason-2 (чёрный) в течение 3,5 ч. Видно, что с увеличением количества используемых спутников растет и количество информации о гидрометеорологическом состоянии морской поверхности. Так, в течение этого времени группа спутников наблюдает около половины поверхности Земли в экваториальных широтах и около 85 % в области широты 60° . На рисунке хорошо видно, что те спутники, орбита которых сильно отклонена от полюсов, не осуществляют мониторинг земной поверхности в высоких широтах (на рисунке это RapidScat (красный) и Jason-2 (чёрный)).

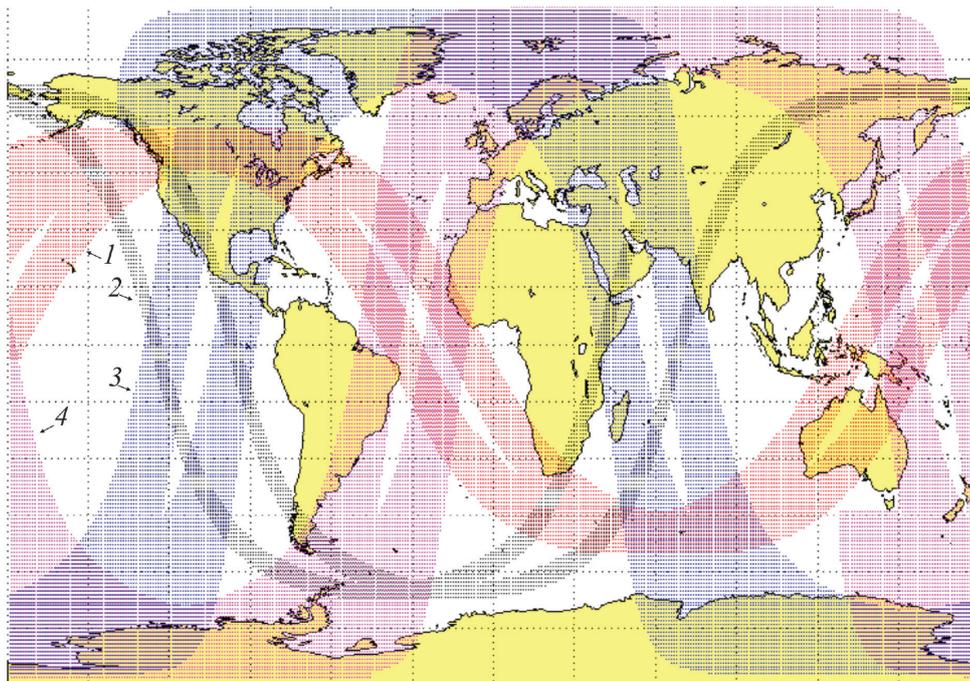


Рис. 3. Поверхность Земли, наблюдаемая группой спутников 1, 2, 4 и 7, представленных в табл. 1, в течение 3,5 ч
Условные обозначения: 1 — RapidScat (красный); 2 — Jason-2 (чёрный); 3 — QuikScat (синий); 4 — ScatSat-1 (пурпурный)

В табл. 2 приведены результаты оценки среднего времени ожидания для каждого из семи моделируемых спутников. Средний возраст данных о погоде на поверхности Земли увеличивается с уменьшением ширины полосы захвата и ростом высоты орбиты спутника и уменьшается с увеличением географической широты места и составляет по времени от чуть менее суток до нескольких суток в экваториальных широтах и от полусуток до суток (для спутников 1 – 6) в высоких широтах.

Таблица 2

Среднее время ожидания данных метеоспутников на различных широтах

№ п/п.	Название спутника	Среднее время ожидания на экваторе, ч	Среднее время ожидания на широте 30°, ч	Среднее время ожидания на широте 60°, ч
1	QuikScat	21,3	13,6	11,4
2	ScatSat-1	19,9	17,0	11,3
3	Hy-2A	22,2	16,1	12,3
4	RapidScat	20,3	17,1	нет
5	ERS	59,8	38,1	18,9
6	ASCAT	65,9	34,8	21,3
7	Jason-2	>72	54,6	47,3

Рис. 4 аналогичен рис. 2, но построен для случая, когда информация предоставляется несколькими спутниками табл. 1: группой спутников с широкой полосой захвата 1 – 3 (рис. 4, а), группой спутников со средней и узкой полосой захвата 4 – 7 (рис. 4, б), группой из всех семи спутников 1 – 7 (рис. 4, в). Из рис. 4 видно, что, например, для группы спутников 1 – 3 уровень в 80 % достигается за 13 ч на экваторе, за 12 ч — на широте 30° и за 6 ч — на широте 60°. Хорошо видно также, что наибольший вклад в уменьшение времени ожидания данных вносят спутники с широкой полосой захвата.

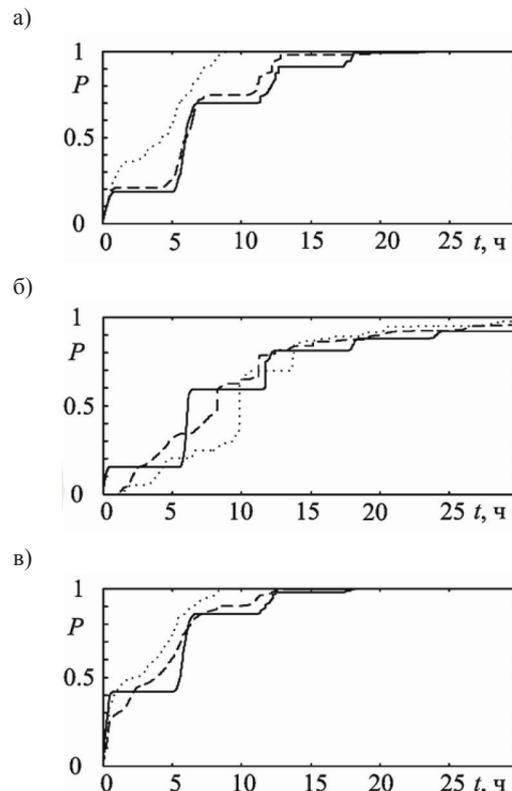


Рис. 4. Распределение времени между последовательными наблюдениями поверхности Земли группами спутников

Среднее время ожидания данных группы спутников приведено в табл. 3. Например, для группы спутников 1 – 3 оно составило 7,3 ч на экваторе, 6,4 ч — на широте 30° и 3,8 ч — на широте 60°.

Таблица 3

**Среднее время ожидания данных группы метеоспутников
на различных широтах**

№ п/п.	Номера спутников, входящих в группу	Среднее время ожидания на экваторе, ч	Среднее время ожидания на широте 30°, ч	Среднее время ожидания на широте 60°, ч
1	1 – 3	7,3	6,4	3,8
2	4 – 7	10,3	9,8	10,8
3	1 – 7	4,5	4,0	2,8

Обсуждение

Полученные результаты позволяют сформировать систематизированное представление о перспективе использования данных метеоспутников для решения задачи планирования маршрута дальнего плавания с учетом погодных условий. В том случае, если имеются данные всего одного спутника даже с самой широкой полосой обзора (например, QuikScat), среднее время получения (возраст) данных о погоде составит от полусуток в высоких широтах до суток в экваториальных, а на отдельных участках поверхности Земли и более суток. Даже с учётом возможной экстраполяции данных (прогноза погоды на основе имеющейся информации) столь существенная погрешность представлений о погоде будет нарушать оптимальность алгоритмов расчёта траектории движения судна в том или ином районе (не говоря уже о том, что достоверный прогноз погоды на столь большом интервале времени — сложная нетривиальная задача [23]). Это, в свою очередь, ставит под сомнение ожидаемый результат решения оптимизационной задачи планирования пути в целом.

Использование данных нескольких метеоспутников позволяет прогнозировать гораздо более оптимистичную картину. Например, если имеются данные о погоде, полученные с первых трёх спутников, указанных в табл. 1, то время получения данных о погоде составит в большинстве случаев 4 – 7 ч, что делает их актуальными и сами по себе, и особенно с точки зрения возможного на их основе относительно точного прогноза погоды. Это позволяет достаточно адекватно решать обсуждаемую здесь оптимизационную задачу.

Принципиальная доступность относительно «свежих» спутниковых метеоданных на оживлённых морских трассах продемонстрирована на рис. 5, где показаны участки поверхности Земли, по которым имеются данные «возрастом» менее 3,5 ч (именно за такой временной интервал обычно доступны данные метеосервисов) [14], [24].

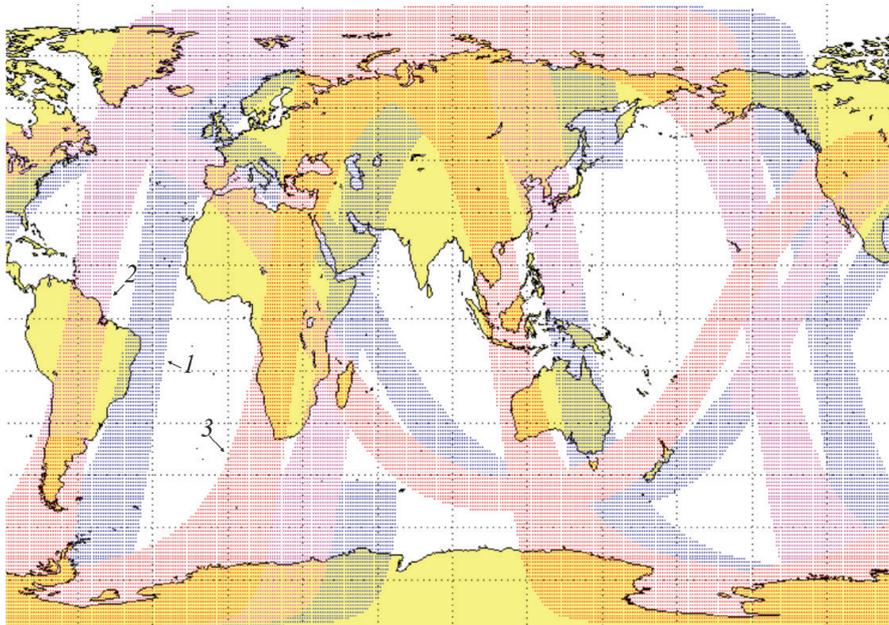
Например, на рис. 5, а хорошо видно, что данные о погоде доступны в Северной Атлантике (маршрут Европа – Северная Америка) и Северо-Восточной части Тихого океана (часть маршрута пролегает из Азии в Северную Америку). Через 5 ч (см. рис. 5, б) становятся доступными данные о погоде по маршруту Европа – Южная Америка и почти по всему маршруту Северная Америка – Азия.

При выборе метеоспутников для сбора данных о погоде по планируемому маршруту следования судна, в том случае, если таких спутников несколько, интервал времени между последовательными наблюдениями той или иной точки поверхности Земли можно приближённо описать известной вероятностной моделью массового обслуживания [25]. Вероятность F того, что интервал времени между соседними наблюдениями меньше заданного t описывается в ней экспоненциальным распределением

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

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

а)



б)

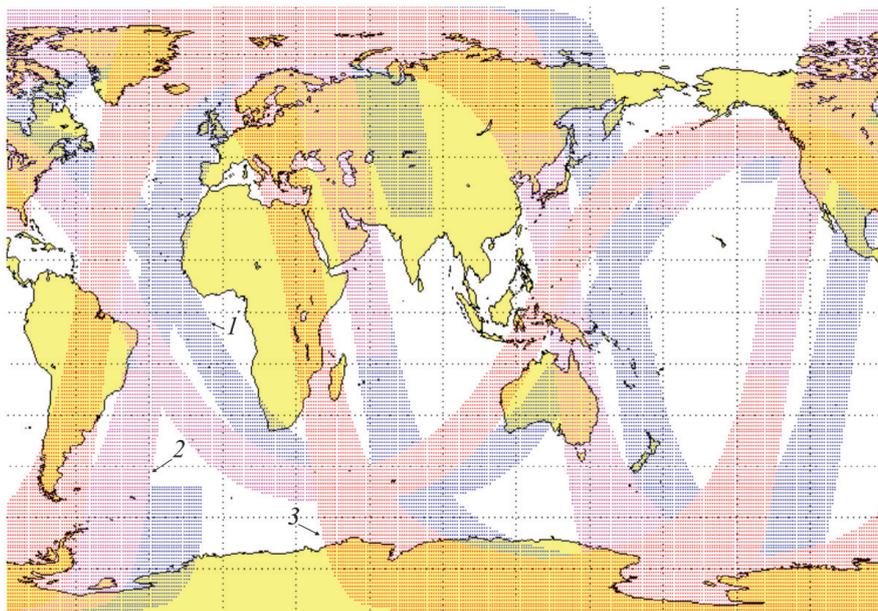


Рис. 5. «Возраст» метеоданных группы спутников QuikScat, ScatSat-1 и RapidScat:
 1 — синий — от 2 до 3,5 ч, 2 — пурпурный — от 1 до 2 ч,
 3 — красный — менее 1 ч — исходное состояние (а)
 и спустя 5 ч после исходного состояния (б)

Эта гипотеза подтверждается и результатами моделирования. На рис. 6 показаны графики функции $F(t)$ (пунктирная линия), вычисленные по данным графиков, приведённых на рис. 4, а (сплошная линия), соответственно, для экватора (синий график), широты 30° (зелёный график) и широты 60° (красный график). Видно, что теоретическое распределение вероятности, в принципе, соответствует данным моделирования особенно в области больших значений функции.

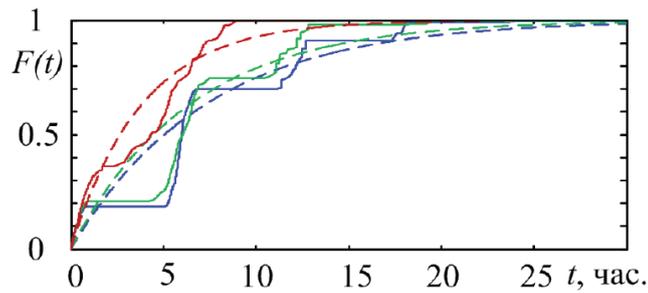


Рис. 6. Значения экспоненциальной функции распределения

При таких модельных представлениях функция распределения вероятности для группы, состоящей из двух спутников, при известном среднем времени ожидания для каждого из них m_1 и m_2 вычисляется следующим образом:

$$F_{12}(t) = 1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t},$$

где $\lambda_1 = 1 / m_1$, $\lambda_2 = 1 / m_2$.

При этом для среднего времени ожидания группы, состоящей из двух спутников m_{12} , имеет место формула

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

Последнее соотношение также подтверждается результатами моделирования, в чём легко убедиться, сопоставив значения, приведенные в табл. 2 и 3.

Оценивая по данным моделирования среднее время ожидания для каждого спутника и задавая необходимый уровень вероятности и значение возраста данных о погоде, можно сделать вывод о том, какой набор метеоспутников способен обеспечить необходимые данные. Однако необходимо отметить, что последовательность моментов времени наблюдения спутником той или иной точки поверхности Земли является не случайной, а детерминированной, поэтому функция экспоненциального распределения в данном случае описывает процесс очень приближённо, давая лишь качественное описание явления.

Заключение

1. Задача планирования маршрута судна является актуальной в судоводительской практике. Существует большое число хорошо зарекомендовавших себя и отработанных подходов к её решению, применяемых в настоящее время. Одним из путей дальнейшего повышения эффективности судовождения является оптимизация маршрута с учётом данных о погоде и параметрах движения судна в сложных погодных условиях. Для решения соответствующей оптимизационной задачи необходимы актуальные данные о погоде, их получение возможно с помощью специальных средств дистанционного зондирования Земли — метеоспутников. Для оценки реализуемости такого подхода в работе ставится задача моделирования движения спутника, что позволяет оценить характерный возраст данных, получаемых со спутника. Как показали результаты моделирования, время, необходимое для получения данных о погоде в выбранной точке поверхности Земли, может превышать сутки. Это является серьёзным препятствием для качественной оптимизации маршрута.

2. Комплексирование данных нескольких метеоспутников способно существенно уменьшить среднее время получения данных о погоде вдоль планируемого маршрута. Например, для первых трёх спутников, указанных в табл. 1, среднее время получения данных о погоде составляет 4 – 7 ч. С учётом возможного относительно достоверного прогноза погоды на этот период решение задачи оптимизации маршрута будет достаточно адекватным текущим погодным условиям.

3. Если для решения задачи планирования маршрута использовать данные от нескольких метеоспутников, то для оценки времени, в течение которого будут получены эти данные, можно использовать вероятностную модель массового обслуживания.

4. В целом можно сделать вывод о возможности реализуемости предлагаемой идеи планирования маршрута судна с учётом данных о погоде с нескольких метеоспутников в рамках судовой компании или иной организации. Реализация идеи требует заключения договоров на поставку спутниковой информации с несколькими провайдерами или владельцами метеоспутников (с каждым годом стоимость этих данных уменьшается, а некоторые из них предоставляются даже на безвозмездной основе) и разработки специализированного программного обеспечения, позволяющего осуществлять комплексную обработку метеоинформации, полученной от различных метеоспутников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kosmas O. T.* Simulated annealing for optimal ship routing / O. T. Kosmas, D. S. Vlachos // *Computers & Operations Research*. — 2012. — Vol. 39. — Is. 3. — Pp. 576–581. DOI: 10.1016/j.cor.2011.05.010.

2. *Lin Y.-H.* The Ship-Routing Optimization Based on the Three-Dimensional Modified Isochrone Method / Y.-H. Lin, M.-C. Fang // *ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. — Nantes, France: ASME, 2013. — Pp. V005T06A067. DOI: 10.1115/OMAEE2013-10959.

3. *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.

4. *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.

5. *Tam C.* Review of Collision Avoidance and Path Planning Methods for Ships in Close Range Encounters / C. Tam, R. Bucknall, A. Greig // *The Journal of Navigation*. — 2009. — Vol. 62. — Is. 3. — Pp. 455–476.

6. *Lazarowska A.* Ship's Trajectory Planning for Collision Avoidance at Sea Based on Ant Colony Optimisation / A. Lazarowska // *The Journal of Navigation*. — 2015. — Vol. 68. — Is. 2. — Pp. 291–307.

7. *Гриняк В. М.* Визуальное представление параметров траектории безопасного движения судна / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный, М. В. Трофимов // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2016. — Т. 1. — № 3 (33). — С. 269–273.

8. *Акмайкин Д. А.* Эвристический поиск оптимального маршрута судна по Северному морскому пути / Д. А. Акмайкин, С. Ф. Ключева, П. А. Салюк // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2015. — № 5 (33). — С. 55–62.

9. *Прохоренков А. А.* Применение ситуационного метода оценки навигационной безопасности при плавании по внутренним водным путям / А. А. Прохоренков // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2011. — № 1. — С. 91–95.

10. *Акмайкин Д. А.* Формирование модели экспертной системы оценки безопасности движения судна / Д. А. Акмайкин, С. Ф. Ключева, А. Д. Москаленко, М. А. Москаленко // *Транспортное дело России*. — 2015. — № 6. — С. 203–206.

11. *Акмайкин Д. А.* Проект системы оперативного анализа и оптимизации движения морских судов / Д. А. Акмайкин, С. Ф. Ключева, П. А. Салюк // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2015. — № 1 (29). — С. 229–236.

12. *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.

13. *Беллман Р.* Прикладные задачи динамического программирования / Р. Беллман, С. Дрейфус. — М., 1965. — 475 с.

14. *Ocean Surface Topography Mission/Jason-2* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.nasa.gov/mission_pages/ostm/main/#V-ebOyiLSU1 (дата обращения – 20.08.2017).

15. *OSTM/Jason-2 Products Handbook* / под ред. J. P. Dumont [и др.]. — 2001. — 72 p.

16. Верба В. С. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. С. Верб. — М.: Радиотехника, 2010. — 675 с.
17. 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.
18. Гавриков А. В. Модификация базы данных спутниковой альтиметрии Glob Wave для решения задач диагностики поля морского волнения / А. В. Гавриков, М. А. Криницкий, В. Г. Григорьева // Океанология. — 2016. — Т. 56. — № 2. — С. 322–327. DOI: 10.7868/S0030157416020064.
19. Балк М. Б. Элементы динамики космического полета / М. Б. Балк. — М.: Наука, 1965. — 338 с.
20. Маркеев А. П. Теоретическая механика / А. П. Маркеев. — М.: ЧеРо, 1999. — 572 с.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. Globalware. Globalware project [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://globwave.ifremer.fr/> (дата обращения – 20.08.2017).
25. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей / Б. В. Гнеденко. — М.: Наука, 1988. — 445 с.

REFERENCES

1. Kosmas, O. T., and D. S. Vlachos. “Simulated annealing for optimal ship routing.” *Computers & Operations Research* 39.3 (2012): 576–581. DOI: 10.1016/j.cor.2011.05.010.
2. Lin, Yu-Hsien, and Ming-Chung Fang. “The ship-routing optimization based on the three-dimensional modified isochrone method.” *ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. American Society of Mechanical Engineers, 2013: V005T06A067. DOI: 10.1115/OMAE2013-10959.
3. 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.
4. Lu, Ruihua, O. Turan, E. Boulougouris, C. Banks, 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.
5. Tam, CheeKuang, Richard Bucknall, and Alistair Greig. “Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters.” *The Journal of Navigation* 62.3 (2009): 455–476.
6. Lazarowska, Agnieszka. “Ship’s trajectory planning for collision avoidance at sea based on ant colony optimisation.” *The Journal of Navigation* 68.2 (2015): 291–307.
7. Grinyak, V. M., A. S. Devyatisil’nyi, and M. V. Trofimov. “Vizual’noe predstavlenie parametrov traektorii bezopasnogo dvizheniya sudna.” *Morskije intellektual’nye tekhnologii* 1.3(33) (2016): 269–273.
8. Akmaykin, Denis Aleksandrovich, Svetlana Fedorovna Klyueva, and Pavel Anatolievich Salyuk. “Heuristic search for the optimal route ship Northern Sea Route.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(33) (2015): 55–62.
9. Prokhorenkov, A. A. “Application of situation simulation while estimation of inland waterway navigation safety.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1 (2011): 91–95.
10. Akmaykin, D., S. Klyueva, A. Moskalenko, and M. Moskalenko. “Creation of assessment of maritime safety expert system model.” *Transport business of Russia* 6 (2015): 203–206.
11. Akmaykin, Denis Aleksandrovich, Svetlana Fedorovna Klyueva, and Pavel Anatolievich Salyuk. “Operational system design analysis and optimization of maritime traffic.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(29) (2015): 229–236.
12. 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.

13. Bellman, R., and S. Dreyfus. *Prikladnye zadachi dinamicheskogo programmirovaniya*. M., 1965.
14. Ocean Surface Topography Mission/Jason-2. Web. 20 Aug. 2017 <http://www.nasa.gov/mission_pages/ostm/main/#V-ebOyiLSU>.
15. Dumont, J. P., et al, eds. *OSTM/Jason-2 Products Handbook*. 2001.
16. Verba, V. S. *Radiolokatsionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya*. M.: Radiotekhnika, 2010.
17. Bondur, V. G., and A. B. Murynin. "Metody vosstanovleniya spektrov morskogo volneniya po spektram aerokosmicheskikh izobrazhenii." *Issledovanie Zemli iz kosmosa* 6 (2015): 3. DOI: 10.7868/S0205961415060020.
18. 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.
19. Balk, M. B. *Elementy dinamiki kosmicheskogo poleta*. M.: Nauka, 1965.
20. Markeev, A. P. *Teoreticheskaya mekhanika*. M.: CheRo, 1999.
21. 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.
22. 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.
23. 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
24. Globalware. Globalware project. Web. 20 Aug. 2017 <<http://globwave.ifremer.fr/>>.
25. Gnedenko, B. V. *Kurs teorii veroyatnostei*. M.: Nauka, 1988.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Букин Олег Алексеевич — доктор физико-математических наук, профессор Морской государственной университет имени адмирала Г. И. Невельского 690003, Российская Федерация, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а
 e-mail: o_bukin@mail.ru

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Bukin, Oleg A. — Dr. of Physical and Mathematical Sciences, professor Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoi 50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003, Russian Federation
 e-mail: o_bukin@mail.ru

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

Статья поступила в редакцию 25 августа 2017 г.
 Received: August 25, 2017.