

Математическая модель морского трафика через керченский пролив

Е.А. Кужбанова, С.В. Поршнева

Аннотация—В статье, на основе анализа данных о движении морских судов через Керченский пролив, извлеченных из находящихся в свободном доступе морских онлайн-карт, обоснована аналогия между динамикой движения морских судов в данном районе Мирового океана и динамикой нестационарной системы массового обслуживания (СМО), функционирующей в недогруженном режиме. Приведены результаты статистического анализа данных о движении морских кораблей через Керченский пролив, отображающие характеристики движения морского судна, отраженные в его направлении движения и в различных временных моментах. Получены оценки параметров математической модели, описывающей динамику движения морских судов в Керченском проливе. Рассмотрены зависимости числа морских судов, ожидающих прохода и прошедшими под Крымским мостом, от времени. Приведен анализ результатов имитационного моделирования одноканальной СМО на основе данных о движении морских судов через Керченский пролив, извлеченных из находящихся в свободном доступе морских онлайн-карт. Построены гистограммы зависимостей количества морских судов в исследуемой части Мирового океана от времени, а также гистограмма распределения времени ожидания обслуживания заявок, поступивших в СМО, длительности интервалов модельного времени.

Ключевые слова— система массового обслуживания, транспортный поток, имитационное моделирование.

I. ВВЕДЕНИЕ

Морские проливы, как показывает анализ морских онлайн карт [1-2], являются районами сосредоточения большого числа морских судов, в связи с чем задача управления движением морского транспорта (что эквивалентно, транспортными потоком) в районе морских проливов оказывается актуальной. Анализ опыта организации, управления и оптимизации управления транспортными потоками показывает, что здесь одним из наиболее эффективных оказывается подход, основанный на использовании их математических моделей [3-4]. В то же время, следует отметить, что большинство известных сегодня

математических моделей транспортного трафика разработаны для автомобильного транспорта, авиатранспорта, железнодорожного транспорта. В этой связи разработка математических моделей, описывающих морской трафик, является актуальной.

В статье на основе анализа данных о движении морских судов через Керченский пролив, извлеченных из находящихся в свободном доступе морских онлайн-карт, обоснована аналогия между динамикой движения морских судов в данном районе Мирового океана и динамикой стационарной системы массового обслуживания (СМО), функционирующей в недогруженном режиме и получены оценки параметров данной математической модели

II. ИСХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ДВИЖЕНИИ МОРСКИХ СУДОВ

Сегодня каждое морское судно оснащено GPS-устройствами, которые определяют в реальном режиме времени «мгновенные» значения географических координат GPS-устройства, принимаемых за географические координаты морского судна. С информационной точки зрения первичные данные, передаваемые наземным службам управления движения морским транспортом, морским судном представляет собой следующий кортеж:

$$(Name_j, t_j, x(t_j), y(t_j)),$$

где $Name_j$ — название морского судна, t_j — текущий момент времени, $(x(t_j), y(t_j))$ — координаты точки расположения GPS-устройства на морском судне (географическая долгота и географическая широта, соответственно). Информация о названиях морских судов и их «мгновенных» значениях координат в выбранные моменты сохраняется в специализированных коммерческих ХД [1-2], а также используется для отображения на онлайн-картах названий морских судов и их условных изображений, располагаемых в точках, положение которых на электронной карте, соответствует географическим координатам GPS-устройства (рис. 1).

Статья получена 8 октября 2022.

Е. А. Кужбанова, Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ УрФУ Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира 32 (e-mail: kuzhbanova.elena@urfu.ru).

С. В. Поршнева д. т. н., профессор - Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ УрФУ Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира 32 / Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук (e-mail: s.v.porshnev@urfu.ru).

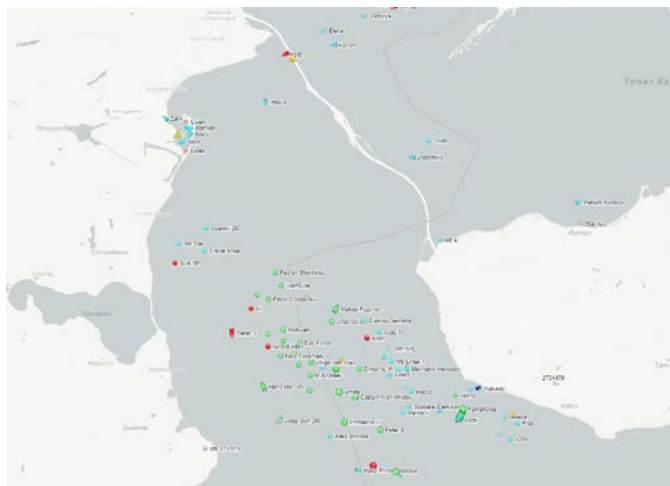


Рисунок 1 — Фрагмент мгновенной онлайн-карты Керченского пролива с изображениями морских судов

В связи с тем, что доступ к информации о координатах морских судов, находившихся в данном районе Мирового океана, в течение выбранного промежутка времени является платным, авторами разработан алгоритм извлечения информации о названиях морских судов, их географических координатах из мгновенных морских онлайн карт и его программная реализация на m-языке пакета MATLAB, подробно описанные в [5]. В данном алгоритме используются скрин-шоты мгновенных онлайн-карт, регистрируемые с шагом 20 минут. Результат использования разработанного авторами программного инструмента представлен в Таблице 1.

Таблица 1 — Фрагмент информации, извлеченной из онлайн морской карты Керченского залива

	MarinName	MarinE	MarinN	MarinDateTime
1	"Anatasiya"	36.5981	45.28577	'13-Sep-2020 00:19:13'
2	"Anatasiya"	36.5977	45.28577	'13-Sep-2020 01:59:39'
3	"Anatasiya"	36.5977	45.28577	'13-Sep-2020 02:19:44'
4	"Anatasiya"	36.5977	45.28577	'13-Sep-2020 02:39:48'
5	"Anatasiya"	36.5977	45.28577	'13-Sep-2020 02:59:52'
6	"Andrey"	36.5553	45.32482	'13-Sep-2020 00:19:13'
7	"Andrey"	36.5550	45.32490	'13-Sep-2020 00:39:18'
8	"Andrey"	36.5550	45.32490	'13-Sep-2020 00:59:22'
9	"Andrey"	36.5550	45.32490	'13-Sep-2020 01:19:28'
10	"Andrey"	36.5550	45.32490	'13-Sep-2020 01:39:33'
11	"Andrey"	36.5550	45.32490	'13-Sep-2020 01:59:39'

Данная информация сохраняется в файле формате csv, в виде таблицы, столбцы которой имеют следующие названия: «MarinName» — название судна, «MarinE» — географическая широта, «MarinN» — географическая долгота, «MarinDateTime» — дата и время вычисления мгновенного значения координат морского судна.

Наличие данной информации обеспечивает возможность проведения количественного анализа динамики движения морских судов через Керченский пролив [6], как будет показано далее, обосновать выбор соответствующей математической модели.

Данная информация сохраняется в файле формате csv, в виде таблицы, столбцы которой имеют следующие названия: «MarinName» — название судна, «MarinE» — географическая широта, «MarinN» — географическая долгота, «MarinDateTime» — дата и время вычисления мгновенного значения координат морского судна.

Наличие данной информации обеспечивает возможность проведения количественного анализа динамики движения морских судов через Керченский пролив [6], как будет показано далее, обосновать выбор соответствующей математической модели.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ О ДВИЖЕНИИ МОРСКИХ КОРАБЛЕЙ ЧЕРЕЗ КЕРЧЕНСКИЙ ПРОЛИВ

Обсудим результаты анализа первичной информации, извлеченной из скрин-шотов «мгновенных» морских онлайн карт Керченского пролива в период с 1 апреля 2021 г. по 1 апреля 2022 г., примеры которых представлены на рисунке 2. Из рисунка 2 видно, что на карте масштабом в 1 см 5 км на онлайн картах одновременного отображаются зоны ожидания прохода через Керченский пролив в Черном и Азовском морях морскими судами. При этом, однако, оказывается, что при данном масштабе карты изображения некоторых морских судов и их названия накладываются друг на друга, в связи с чем, правильное определение названий морских судов в автоматическом режиме оказывается невозможным. В этой связи далее в нашем исследовании была использована информация, извлеченная из «мгновенных» морские онлайн карты, в масштабе в 1 см 2 км, на которых отображались морские суда, находящиеся в зоне ожидания прохода из Черного моря в Азовское море (рис. 3).

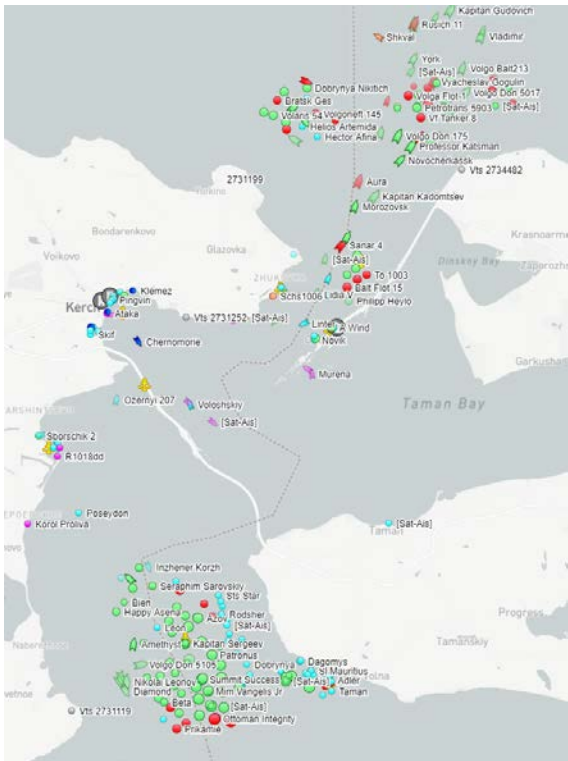


Рисунок 2 – Примеры скрин-шотов «мгновенных» электронных онлайн карты в масштабе 1 см 5 км



Рисунок 3 – Примеры скрин-шотов «мгновенных» электронных онлайн карты в масштабе 1 см 2 км

Предварительный анализ первичной информации позволил обнаружить, что в выбранный период времени через Керченский пролив из Черного моря в Азовское море прошли 76968 морских судов, при этом процесс движения каждого из них состоял из следующих последовательных этапов:

1. прибытие морского судна в район Керченского залива из Черного или Азовского морей;
2. ожидание морскими судами на якорной стоянке в течение некоторого времени разрешения прохода через Керченский залив;
3. прохождение морского судна через Керченский залив.

Таким образом, динамика движения каждого отдельного морского судна характеризуется:

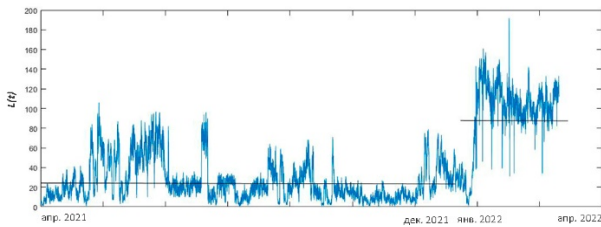
- направлением движения;
- моментом времени, в которой морское судно прибыло в район Керченского пролива t_0 ;
- моментом времени, в который морское судно снялось с якорной стоянки и начало движение в направлении прохода под Крымским мостом t_1 ;
- моментом времени, в который морское судно завершило прохождение через Керченский пролив t_2 ,
- точнее разностями данных величин;
- длительностью временного интервала $\Delta t_{0,1}$, в течение которого морское судно находилось в районе Керченского пролива в ожидании разрешения на проход через пролив $\Delta t_{0,1} = t_1 - t_0$;
- длительностью временного интервала $\Delta t_{1,2}$, в течение которого судно совершило переход от места якорной стоянки до прохода через Керченский пролив $\Delta t_{1,2} = t_2 - t_1$.

Соответственно, величину $\Delta t_{0,2} = \Delta t_{0,1} + \Delta t_{1,2}$ можно трактовать как общее время, затраченное морским судном для прохода через Керченский пролив. Необходимо отметить, что в связи с тем, часть морских судов в ожидании прохода через Керченский пролив может совершать некоторые перемещения в зоне ожидания, автоматизировать процедуру вычисления величины $\Delta t_{0,2}$ на основе информации, извлеченной из «мгновенных» морских онлайн карт, оказалось невозможным, поэтому далее был предложен алгоритм оценивания данной величины на основе описываемой ниже математической модели морского трафика в районе Керченского пролива.

В этой связи для описания свойств обобщенного морского трафика через Керченский пролив были использованы последовательные временные интервалы длительностью 1 час., на которых были вычислены следующие характеристики морского трафика:

- число морских судов, ожидавших прохода под Крымским мостом в течение данного часа L ;
- число морских судов, вновь вошедших в район Керченского пролива течение данного часа $N^{(in)}$;
- число морских судов, прошедших под Крымским мостом в течение данного часа $N^{(out)}$.

Рассмотрим зависимость $L = L(t)$, зарегистрированную в период с 01.04.2021 по 01.04.2022, с математической точки зрения представляющую собой временной ряд (ВР), который представлен на рисунке 4.

Рисунок 4 — Зависимость $L = L(t)$

Из рисунка 4 видно, что обсуждаемый ВР, составленный из значений зависимостей $L = L(t)$, представляет собой некоторую реализацию нестационарного случайного процесса с ограниченной областью рассеяния. При этом средние значения зависимости $L = L(t)$ в период с 1.04.2021 по 31.12.2021 оказалось равным $\bar{L}_1 = 25.32 \pm 5.13$, в период с 1.01.2022 г. по 31.04.2022 — $\bar{L}_2 = 80.92 \pm 40.60$.

Также для каждого из 76968 морских судов были вычислены значения $\Delta t_{0,1}$, выборочные значения которых представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Выборочные результаты вычисления характеристик движения отдельных морских судов через Керченский пролив

Название корабля	Дата и время прибытия	$\Delta t_{0,1}$	Направление движения*
ArmadaLeader	01-Jul-2021 09:32:00	60	MoveUp
Arshan	21-Mar-2022 15:43:33	20	MoveUp
Astra	23-Jan-2022 00:13:20	90	MoveUp
AleksandrShemagin	20-Feb-2022 15:40:22	0	MoveDown
Baykal	14-Jun-2021 06:23:43	102 0	MoveUp
DmitryPkrovsky	29-Mar-2022 01:05:46	180	MoveDown

* направление движения морского судна через Керченский пролив: MoveUp — направление движения морского судна из Черного моря в Азовское море, MoveDown — направление движения морского судна из Азовского моря в Черное море (для кораблей, найденных на единственном скриншоте онлайн морской карты Керченского пролива, время ожидания не определялось и в дальнейшем статистическом анализе они не учитывались).

Оказалось, что совокупность значений $\Delta t_{0,1}$ представляет собой некоторое множество случайных чисел с ограниченной областью рассеяния. для анализа статистических свойств которой были вычислены гистограммы случайных последовательностей.

Из рисунка 5 видно, что время ожидания начала прохода через Керченский пролив у 46606 морских судов оказалось менее одного часа, у 30362 – один час и более.

Рисунок 5 – Гистограмма случайной выборки $[\Delta t_{0,1}]_i$, $i = \overline{1,76968}$

Таким образом, анализ информации о координатах морских судов, проходящих через Керченский пролив из Черного моря в Азовское море, извлеченной из «мгновенных» морских онлайн карт позволяет сделать вывод о том, что морской трафик в район Керченского пролива может быть описан количество с помощью следующих характеристик:

- число кораблей, ожидающих разрешения прохода через Керченский пролив, в течение данного часа;
- число кораблей, прибывших в район Керченского пролива в течение данного часа;
- число кораблей, прошедших через Керченский пролив в течение данного часа;
- статистическими характеристиками совокупности значений $[\Delta t_{0,1}]_i$.

Анализ перечня выбранных количественных характеристик морского трафика в районе Керченского пролива позволяет провести аналогию между движением морских судов в данном районе и процессом функционирования одноканальной системы массового обслуживания (СМО), который, как известно [7], может быть описан следующими количественными показателями:

- числом заявок, поступивших в течение выбранного временного интервала в одноканальную СМО;
- числом обслуженных заявок в течение выбранного временного интервала;
- числом заявок, ожидающих обслуживания в течение выбранного временного интервала;
- длительностью ожидания обслуживания данной заявки.

Для подтверждения проведенной аналогии между динамикой движения морских судов в районе Керченского пролива и одноканальной СМО, было проведено имитационное моделирование одноканальной СМО, результаты которого обсуждаются в следующем разделе.

IV. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОДНОКАНАЛЬНОЙ СМО

Рассмотрим результаты имитационного моделирования одноканальной СМО с интенсивностью

обслуживания 36 заявок/мин без отказов в обслуживании заявок, поступавших на вход СМО на временном интервале $[0, 6.48 \cdot 10^4]$ (здесь границы с интенсивностью поступления заявок на интервала измеряются в модельном времени) 34,7 заявок/ЕМВ (ЕИМВ – единица измерения модельного времени), а на временном интервале $[6.48 \cdot 10^4, 8.64 \cdot 10^4]$ – 35,56 заявка/ЕИМВ проведенного на основе использования подхода, развитого в [8]. Таким образом, интенсивности нагрузки на СМО на первом и втором временных интервалах оказались равными $\rho_1 = \frac{\lambda_1}{\mu} = 0.9638$, $\rho_2 = \frac{\lambda_2}{\mu} = 0.9877$, соответственно. Общее число заявок, обслуженных данной СМО, равнялось 77760.

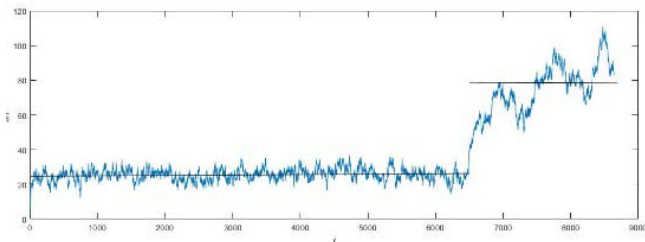


Рисунок 6 - Зависимости $L = L(t)$ имитационной модели СМО

Зависимость $L = L(t)$, вычисленная на основе анализа результатов математического моделирования обсуждаемой СМО, представлены на рисунке 6, из которого видно, что средние значения зависимостей $L = L(t)$, на первом временном интервале равны $\bar{L}_1 = 25.72 \pm 1.55$, на втором временном интервале – $\bar{L}_2 = 79.83 \pm 8.42$. Отметим, что вычисленные средние значение длин очередей заявок на обслуживание \bar{L}_1, \bar{L}_2 согласуются с их теоретическими значениями, равными в соответствие с [8] $\bar{L}_1^{(theory)} = \frac{\rho_1^2}{1-\rho_1} = 25.72$, $\bar{L}_2^{(theory)} = \frac{\rho_2^2}{1-\rho_2} = 79.83$, соответственно.

Таким образом, вид зависимости $L = L(t)$, вычисленной на основе анализа онлайн морских карт Керченского пролива (рис. 3), оказывается схожим с видом соответствующей зависимости, вычисленной на основе анализа результатов моделирования нестационарной СМО методом Монте-Карло (рис. 5).

Гистограмма распределения времени ожидания обслуживания заявок, поступивших в СМО, длительности интервалов модельного времени представлена на рисунке 7.

Из рисунка 7 видно, что 34112 заявок имеют время ожидания менее одного часа модельного времени и 43648 заявок имеют среднее время ожидания более одного часа модельного времени, что согласуется с результатами анализа информации, извлеченной из морских онлайн карт района Керченского пролива.

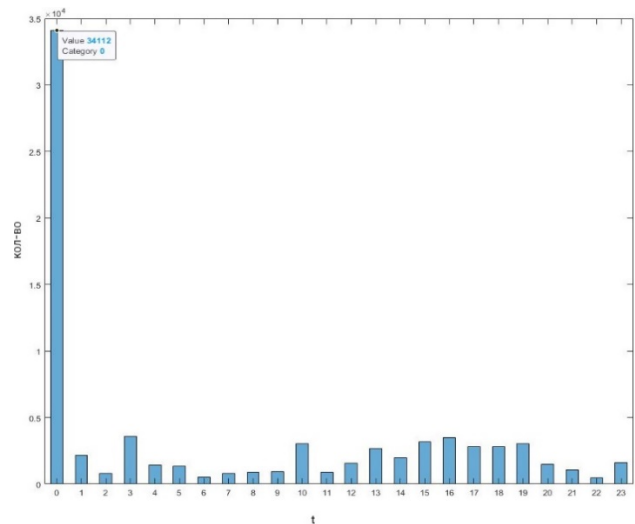


Рисунок 7 – Гистограмма распределения количества кораблей по модельному времени ожидания заявок на обслуживание в СМО

Описанные выше результаты позволяют сделать вывод о возможности использования для моделирования динамики движения судов в районе Керченского пролива подхода, развитого в [8], в соответствие с которым динамика нестационарных СМО на временных интервалах конечной длительности аналогична динамике стационарных СМО. В связи с чем, состояния нестационарной СМО быть описана множеством набором последовательных во времени состояний стационарных СМО, на вход которых в данный момент времени поступает поток заявок постоянной интенсивности, а начальная длина очереди заявок на обслуживание, соответствует конечному значению длины заявок на входе в СМО в конце предыдущего периода.

В рассматриваемом случае зависимость интенсивности поступления заявок представляла собой кусочно-постоянную функцию, принимающую два значения. Следовательно, интенсивность нагрузки на Керченский пролив, рассматриваемого как СМО, в период с 01.01.2021 по 31.12.2021 г. составила – 0.9633, в период с 01.01.2022 по 31.04.2022 – 0.9879

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа данных о движении морских судов через Керченский пролив в период 01.04.2021 по 31.04.2022., извлеченных из находящихся в свободном доступе морских онлайн-карт, обоснована аналогия между динамикой движения морских судов в данном районе Мирового океана и динамикой нестационарной системы массового обслуживания, функционирующей в недогруженном режиме, и идентифицированы параметры соответствующей математической модели.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Marine Traffic. Available online: <https://www.marinetraffic.com> (accessed on 01.08.2020).
- [2] Vessel Finder. Available online: <https://www.vesselfinder.com> (accessed on 05.06.2019).
- [3] Холодов Я. А., Холодов А. С., Гасников А. В., Морозов И. И., Тарасов В. Н. Моделирование транспортных потоков -

Актуальные проблемы и перспективы их решения // Труды МФТИ. 2010. №4.

- [4] Ветрогон А. А. Транспортное моделирование как инструмент для эффективного решения задач в области управления транспортными потоками / А. А. Ветрогон, М. Н. Крипак // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2018. -91Т. 59,№1: 310.26761/8213-9108.2018.3(59).82-91.
- [5] E.A. Kuzhbanova and S.V. Porshnev "Technology for extracting instant coordinates of sea vessels in a selected part of the World Ocean from online maps" Information Technologies and Engineering – APITECH - 2019 // Journal of Physics: Conference Series, Volume 1679, Issue 3, article id. 032053 (2020).
- [6] E. Kuzhbanova, S. Porshnev "Experience in analyzing information on the movement of sea vessels, extracted from electronic sea charts online" // International Journal of Open Information Technologies, Vol 9, No 4 (2021).
- [7] Ивченко Г. И., Каштанов В. А., Коваленко И. Н. Теория массового обслуживания. — Учебное пособие для вузов. — М.: Высшая школа, 1982. — 256 с.
- [8] Поршнев С.В., Корелин И.А. Математическое моделирование информационных контрольно-пропускных систем объектов проведения массовых мероприятий: моногр. / С.В. Поршнев, И.А. Корелин – Москва: Горячая линия-Телеком, 2021. – 188 с.

Mathematical model of sea traffic through the Kerch strait

E.A. Kuzhbanova, S.V. Porshnev

Abstract — The article substantiates an analogy between the dynamics of vessel traffic through the Kerch Strait and the dynamics of a non-stationary queuing system (QS) operating in an underloaded mode. Based on the analysis of data on the movement of ships, which were extracted from navigation charts that are freely available on the Internet, in this region of the World Ocean. The results of a statistical analysis of data on the movement of sea vessels through the Kerch Strait are presented, showing the features of the movement of a sea vessel, displayed in the direction of its movement and at different points in time. Estimates of the parameters of a mathematical model describing the dynamics of vessel traffic in the Kerch Strait are obtained. Dependences of the number of ships waiting for passage and passing under the Crimean bridge on time are considered. An analysis of the results of simulation modeling of a single-channel QS based on data on the movement of ships through the Kerch Strait, extracted from freely available online sea charts, is presented. Histograms of the dependence of the number of sea vessels in the studied part of the World Ocean on time, as well as a histogram of the distribution of the waiting time for servicing applications received by the QS, the duration of model time intervals are constructed.

Keywords — queuing system, traffic flow, simulation modeling.

- [6] E. Kuzhbanova, S. Porshnev “Experience in analyzing information on the movement of sea vessels, extracted from electronic sea charts online” // International Journal of Open Information Technologies, Vol 9, No 4 (2021).
- [7] G. I. Ivchenko, V. A. Kashtanov, and I. N. Kovalenko. Teoriya massovogo obslozgivaniya [Queuing Theory]. Uchebnoe posobie dlya vuza [Textbook for universities]. Higher School Publ, 1982, 256 p (In Russian).
- [8] Porshnev S.V., Korelin I.A. Matematicheskoe modelirovanie informacionnykh kontrolno-propusknykh system obiektoy provedeniya massovach meropriyatiy [Mathematical modeling of information checkpoint systems of facilities for holding mass events: monograph]. Moscow: Hotline-Telecom, 2021, 188 p (In Russian).

Manuscript received Oct. 8, 2022

E.A. Kuzhbanova - The Institute of Radioelectronics and Information Technologies, 620002 Ural Federal University, Mira st. 32, Yekaterinburg, Russia (e-mail: kuzhbanova.elena@urfu.ru).

S.V. Porshnev, The Institute of Radioelectronics and Information Technologies, 620002 Ural Federal University, Mira st. 32, Yekaterinburg, Russia / N.N. Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (e-mail:s.v.porshnev@urfu)

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Marine Traffic. Available online: <https://www.marinetraffic.com> (accessed on 01.08.2020)
- [2] Vessel Finder. Available online: <https://www.vesselfinder.com> (accessed on 05.06.2019)
- [3] Kholodov Ya. A., Kholodov A. S., Gasnikov A. V., Morozov I. I., Tarasov V. N. Modelirovanie transportnykh potokov – Aktualnye problem i perspektivy ikh resheniya [Modeling of traffic flows - Actual problems and prospects for their solution]. Trudy MFTI [Proceedings of the Moscow Institute of Physics and Technology], 2010, no 4 (In Russian).
- [4] Vetrogon A. A., Kripak M. N. Transportnoe modelirovanie kak instrument dlya effektivnogo resheniya zadach v oblasti upravleniya transportnymi potokami [Transport modeling as a tool for effective problem solving in the field of traffic flow management]. Sovremennye tehnologii. Sistemny analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling] 2018, V. 59, no. 3, pp. 82–91, DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).82-91 (In Russian).
- [5] E.A. Kuzhbanova and S.V. Porshnev “Technology for extracting instant coordinates of sea vessels in a selected part of the World Ocean from online maps” Information Technologies and Engineering – APITECH - 2019 // Journal of Physics: Conference Series, Volume 1679, Issue 3, article id. 032053 (2020).