

**MODELING OF CARGO OPERATION ABILITY ON PRIRAZLOMNAYA
PLATFORM ACCORDING TO THE WEATHER CONDITIONS****D. A. Zaykin¹, A. G. Topaj², A. V. Kosorotov²**¹ — LLC Gazprom Neft Shelf, St. Petersburg, Russian Federation² — Krylov Shipbuilding Research Centre, St. Petersburg, Russian Federation

The basic feature of the sea ice platform Prirazlomnaya considered as an element of the transport system is its complex and heterogeneous structure, consisting of cargo handling equipment of various types, locations, operational restrictions and regulations, depending on the environment and the vessels served. Therefore, the traditional method of simulating common “weather windows” for the entire transport node is not applicable in this case. We present the alternative extended approach based on the solution of two interrelated problems: 1) information support with data on environmental parameters and 2) formalization of weather-oriented criteria for the ability of a particular vessel’s operation in a particular berthing facility. To solve the first problem, an original algorithm for dynamic modeling of weather conditions has been developed. It is a stochastic generator of virtual weather «scenarios» in the form of the samples of a multidimensional random process. The qualitative properties and quantitative characteristics of such process are identified according to actual observations. The internal logic of the realized weather generator, allowing simulation a record of 17 characteristics of meteorological, wind-wave and ice conditions with an arbitrary time step, is a synthesis of formal statistical modeling and physically-sound approaches. To solve the second problem, a specific algorithm for estimation the operational availability of each platform cargo terminal by natural conditions has been also developed. Its basic peculiarity is that the availability of each cargo terminal influenced by the values of al environmental parameters (wind speed, wind direction, wave height, ice data etc.) obtained as the output signal of the implemented stochastic weather generator. A final decision about the availability status of each terminal or platform handling equipment is made based on the formalized and verified rules and criteria.

Keywords: marine transport system, cargo operations, weather window, data correlation, simulation, stochastic weather generator, availability of cargo terminal.

For citation:

Zaykin, Dmitry A., Aleksandr G. Topaj, and Andrey V. Kosorotov. “Modeling of cargo operation ability on Prirazlomnaya platform according to the weather conditions.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.1 (2018): 62–77. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-62-77.

УДК 629.5:004.94**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ГРУЗОВЫХ ОПЕРАЦИЙ
НА ПЛАТФОРМЕ «ПРИРАЗЛОМНАЯ» ПО ПОГОДНЫМ УСЛОВИЯМ****Д. А. Зайкин¹, А. Г. Топаж², А. В. Косоротов²**¹ — ООО «Газпром нефть шельф», Санкт-Петербург, Российская Федерация² — ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Принципиальной особенностью морской ледовой стационарной платформы «Приразломная» как элемента транспортной системы является его сложная и неоднородная структура, состоящая из средств грузообработки различного вида, характеризующихся своим расположением, ограничениями по доступности и регламентами работы в зависимости от складывающейся окружающей обстановки и типа обслуживаемых судов. Поэтому традиционный метод моделирования единых «окон погоды» для всего транспортного узла в данном случае оказывается неприемлемым. Описанный в статье альтернативный расширенный подход предполагает решение двух взаимосвязанных задач: информационное обеспечение данными о параметрах окружающей среды и формализация погодно-ориентированных критериев доступности работы конкретного судна у конкретного причального устройства. Для решения первой задачи был

создан оригинальный алгоритм динамического моделирования погодных условий. Он представляет собой стохастический генератор виртуальных «сценариев» погоды как реализаций многомерного случайного процесса, качественные свойства и количественные характеристики которого идентифицируются по данным фактических наблюдений. Внутренняя логика реализованного погодного генератора, позволяющего с произвольным временным шагом порождать набор из 17 характеристик метеорологической, ветро-волновой и ледовой обстановки, представляет собой синтез формального статистического моделирования и физически обоснованных подходов. Для решения второй задачи был разработан формализованный алгоритм определения доступности каждого грузового терминала платформы по природным условиям. Особенностью алгоритма является то, что доступность каждого грузового терминала зависит от совместных значений всех природных параметров (скорость ветра, направление ветра, высота волн, толщина льда и т. п.), получаемых как выходной сигнал созданного стохастического погодного генератора. На основании выработанных правил и критериев принимается решение о состоянии доступности каждого конкретного терминала или средства грузообработки платформы.

Ключевые слова: морская транспортная система, грузовые операции, окно погоды, корреляция данных, имитационное моделирование, стохастический генератор погоды, доступность грузового терминала.

Для цитирования:

Зайкин Д. А. Моделирование возможности проведения грузовых операций на платформе «Приразломная» по погодным условиям / Д. А. Зайкин, А. Г. Топаж, А. В. Косоротов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 62–77. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-62-77.

Введение (Introduction)

Для поиска наилучших конфигураций морских транспортных систем (МТС), а также с целью определения возможностей существующего флота и инфраструктуры используются различные способы численного анализа и моделирования. Все они обладают разной степенью детализации, однако при этом всегда присутствует расчет основных составляющих рейса, таких как длительность перехода судна и время выполнения различных операций в целевом порту. Традиционная морская транспортная система в большинстве случаев предполагает линейную транспортировку грузов на большие расстояния и, таким образом, основная часть времени рейса уходит на переход. В этих условиях суммарная длительность технологических и грузовых операций в портах оказывает незначительное влияние на эффективность МТС и может быть рассчитана приблизительно. Однако при рассмотрении МТС, работающих на морском шельфе, ситуация меняется. Транспортировка осуществляется на короткие расстояния, а отгрузка в условиях открытого моря требует гораздо больших временных затрат, чем в условиях порта. Таким образом, при моделировании работы МТС на шельфе необходимо детально учитывать все важные особенности проведения грузовых операций на объектах нефтегазовой инфраструктуры (например, на нефтяных платформах).

На сегодняшний день наиболее актуальным инструментом анализа МТС для обеспечения освоения месторождений нефти и газа, который позволяет воспроизвести их работу с высокой степенью точности, является стохастическое динамическое имитационное моделирование. Этот инструмент использован во многих исследовательских работах, тематика которых связана как с флотом обеспечения [1] – [4], так и со смежными задачами морского судоходства [5].

Морская ледостойкая стационарная платформа (МЛСП) «Приразломная» представляет собой нетипичную шельфовую платформу: отгрузка нефти на танкера осуществляется непосредственно с её терминалов, в то время как на стандартных добычных объектах — со специализированных выносных устройств. Данное обстоятельство еще более усложняет работу МТС: длительность отгрузки танкеров и судов обеспечения, вынужденных конкурировать между собой, в большой степени зависит от текущих ледовых и ветро-волновых условий.

Принимая во внимание вышеуказанные обстоятельства, можно заключить, что подробное моделирование доступности терминалов в сочетании со стохастическим исследованием особенностей погодных условий является необходимым при рассмотрении соответствующей транспортно-технологической системы. Так, при тактическом планировании операций или исследовании

эффективности системы снабжения и вывоза нефти с МЛСП «Приразломная» методами имитационного моделирования принципиальным фактором выступает учет так называемых *окон погоды* (точнее говоря, *окон непогоды*) — периодов времени, в которых сочетание характеристик внешней среды приводит к невозможности осуществления погрузочно-разгрузочных операций на грузовых терминалах. Даже предварительный статистический анализ фактически проведенных операций за период функционирования платформы в 2013 – 2016 гг. показывает, что постоянные случаи наступления негативных внешних условий выступают основным фактором, ограничивающим скорость выполнения операций снабжения и/или отгрузки, что приводит к существенному падению интегральной эффективности транспортной системы в целом.

В случае создания имитационной модели большой транспортной системы со многими портами обслуживания основное внимание, как правило, уделяется вопросам создания логистической сети, диспетчеризации движения транспортных средств, маршрутизации и т. д. При этом для описания влияния внешних условий на интенсивность и возможность осуществления грузовых операций в терминальных точках транспортной цепи используется упрощенный подход. Он сводится к описанию доступности порта/терминала в виде единственной переменной логического типа, а смена периодов открытости и закрытости порта моделируется как простейший случайный процесс с двумя возможными состояниями. Однако если как в рассматриваемом случае ставится задача детального исследования транспортно-технологической системы одного конкретного порта или платформы такой упрощенный подход оказывается неприменимым. Это обуславливается несколькими соображениями, которые указываются далее на примере МЛСП.

В центре концептуальной модели транспортной системы в данном случае находится единственный транспортный узел. Однако сам этот узел имеет сложную и неоднородную структуру, состоящую из нескольких погрузочно-отгрузочных терминалов разного типа (комплексы устройств прямой отгрузки нефти (КУПОН), грузовые причалы судов снабжения, вертолетная площадка), снабженных разнообразным грузовым оборудованием. Регламенты работы каждого терминала в зависимости от складывающейся внешней обстановки также различны (например, местоположение КУПОН явно определяет допустимые углы направления ветра для осуществления работ на нем). Более того, они также могут быть прописаны отдельно для каждого типа обслуживающего или обслуживаемого транспортного средства (суда снабжения, танкеры, вертолеты и т. д.). Кроме того, существуют достаточно сложные логические взаимосвязи и ограничения, обуславливающие возможность одновременного использования нескольких терминалов или транспортных средств в зависимости от параметров внешней погодной и ледовой обстановки. Таким образом, никакого единого или общего для всех грузовых терминалов и судов *окна погоды* в данном случае выделено быть не может.

Кроме того, наступление *локального окна непогоды* для обработки конкретного судна у конкретного терминала может быть обусловлено как отдельным, так и совокупным влиянием нескольких метеорологических факторов. На практике прекращение грузовых операций бывает связано с сильным морским волнением, наличием ветров большой силы и таких направлений, которые не позволяют производить удержание танкеров в необходимом швартовном положении у КУПОН или судов снабжения у причальных площадок даже с использованием системы динамического позиционирования, сносом судов за счет поверхностных течений различной природы, а также условиями недостаточной видимости, низких температур или критическими ледовыми условиями (дрейф ледовых полей). Дополнительно закрытие платформы для вертолетных рейсов также может быть вызвано низкой облачностью. Понимание сравнительной важности и частоты воздействия каждого из указанных факторов, приводящих к необходимости откладывания или прерывания грузовых операций, несет важную информацию о том, какие первоочередные меры технического характера следует предпринять для смягчения их негативного влияния.

Все ранее изложенное доказывает необходимость задействования для целей анализа абсолютно «честного» блока описания внешних условий, т. е. моделирования виртуальных или прогнозирования актуальных значений всех интересующих элементов окружающей среды в явном

виде. Именно с учетом ориентации на эти конкретные значения в каждый момент модельного времени в комплексной имитационной модели или реального времени в модуле оперативного мониторинга и планирования должно приниматься решение о состоянии доступности каждого конкретного терминала или средства грузообработки.

Таким образом, задача описания локальных *окон погоды* для операций грузообработки у стационарной морской платформы предполагает решение двух взаимосвязанных задач: информационное обеспечение данными о параметрах окружающей среды и формализация критериев доступности работы конкретного судна у конкретного терминала в зависимости от создавшейся или возникшей обстановки. Далее в статье приводится последовательное рассмотрение данных вопросов на примере модели транспортно-технологической системы платформы «Приразломная» [6].

Методы и материалы (Methods and Materials)

В случае, когда речь идет об оперативном планировании и управлении движением и грузообработкой судов у МЛСП, источником метеорологической информации в системе принятия решений должны служить результаты фактических наблюдений и краткосрочные прогнозы погодной и ледовой обстановки в точке расположения платформы. Инструментом получения соответствующих данных могут являться различные источники и средства оперативного мониторинга, объединенные с алгоритмами краткосрочного прогноза в рамках специализированной системы управления ледовой обстановкой. В свою очередь, описание погоды в имитационном эксперименте предполагает использование не реальных, а виртуальных наборов значений погодных параметров, но при этом предъявляются повышенные требования к объему и разрешению соответствующих выборок (временной горизонт моделирования может составлять несколько десятков лет). Существуют следующие способы достижения данной цели.

1-й способ. Использование временных рядов фактических наблюдений, т. е. прогон модели по predetermined наборам архивных натурных данных или по искусственным «сценариям», полученным «склеиванием» характерных периодов из разных лет (например, произвольное перемешивание месячных интервалов [1]). При таком подходе остается вопрос о корректности искусственного «сшивания» фрагментов натурной динамики метеопоказателей и степени статистической вариабельности получаемых результатов моделирования. Другим существенным ограничением часто является отсутствие фактических измерений с достаточным уровнем детализации.

2-й способ. Применение физически обоснованных моделей глобальной циркуляции, в которых динамика природы описывается как результат реального физического движения воздушных масс, взаимодействия атмосферы, океана и ледового покрова с учетом всех причинно-следственных взаимосвязей. Однако использование таких моделей требует привлечения огромного количества вычислительных ресурсов [7], что невозможно в прикладных имитационных моделях, где погода является не основным объектом исследования, а лишь одним из влияющих на модель факторов.

3-й способ. Создание формальных статистических моделей природных условий («генераторов погоды»), в которых последовательные значения вектора используемых в модели метеохарактеристик рассматриваются как реализация дискретного случайного процесса, свойства которого идентифицируются по имеющимся фактическим наблюдениям. В этом случае для генерации произвольного числа синтетических «сценариев» используется стандартный метод Монте-Карло, а статистические характеристики описываемых природных показателей удовлетворяют выявленным натурным закономерностям.

Именно последний подход, т. е. создание специфического динамического генератора погодных реализаций (морской погоды) был использован в комплексной имитационной модели МТТС платформы «Приразломная» [8] – [10]. Сводные данные по источникам, используемым для создания и параметрической идентификации стохастического генератора погодных условий в районе МЛСП приведены в табл. 1.

Таблица 1
Сводные данные по источникам, используемым для создания стохастического генератора погодных условий в районе МЛСП

№ п/п.	Параметр	Источник										Отчет ААНИИ для Севмор-НИИ для «Гринпис»	Отчет ААНИИ для Севмор-НИИ для «Гринпис»	Сайт YR.no	Справочник РМРС (ветер и волны)	Программа wxTide	Данные измерений на МСП	Сайт gp5.ru (о. Вандей)	Сайт Meteo.ru (м. Болванский ГМО им. Федорова)	Сайт World-Weather-online.com	Параметр
1	Температура воздуха	С 01.07.2008 г.	1966 – 2014 гг.	2008 – 2016 гг.	30.04.2013 – 09.06.2015 гг.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2	Направление ветра	С 01.07.2008 г.	1966 – 2014 гг.	2008 – 2016 гг.	30.04.2013 – 09.06.2015 гг.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3	Скорость ветра	С 01.07.2008 г.	1966 – 2014 гг.	2008 – 2016 гг.	30.04.2013 – 09.06.2015 гг.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4	Порывы ветра	–	1977 – 2014 гг.	2008 – 2016 гг.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
5	Облачность	С 01.07.2008 г.	1966 – 2014 гг.	2008 – 2016 гг.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
6	Высота облаков	–	1966 – 2014 гг.	2008 – 2016 гг.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
7	Видимость	С 01.07.2008 г.	1966 – 2014 гг.	2008 – 2016 гг.	30.04.2013 – 09.06.2015 гг.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
8	Высота волны (Hs)	С 19.04.2016 г.	–	–	30.04.2013 – 30.10.2014 гг.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
9	Высота зыби	С 19.04.2016 г.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
10	Направление зыби	С 19.04.2016 г.	–	–	30.04.2013 – 30.10.2014 гг.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
11	Направление течения	–	–	–	30.04.2013 – 30.10.2014 гг.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
12	Скорость течения	–	–	–	30.04.2013 – 30.10.2014 гг.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
13	Время высокой/низкой воды	С 19.04.2016 г.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
14	Направление дрейфа льда	–	–	–	30.04.2013 – 09.06.2015 гг.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
15	Скорость дрейфа льда	–	–	–	30.04.2013 – 09.06.2015 гг.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
16	Сплоченность льда	–	–	–	30.04.2013 – 09.06.2015 гг.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
17	Толщина льда	–	–	–	30.04.2013 – 09.06.2015 гг.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Примечание. Словом «Статистика» обозначены источники, содержащие не временные ряды параметров, а различные обработанные статистические материалы.

Вопросом первостепенной важности в статистическом моделировании является обеспечение корреляционных свойств моделируемых случайных процессов. Для решения этой задачи в предлагаемом исследовании использована методология формирующих фильтров первого порядка. Применительно к моделированию погоды этот метод был впервые изложен в [11] для случая многомерного процесса, компоненты которого представляют собой величины различной физической природы (логический, или аффинный вектор). Основное уравнение метода описывает рекуррентный алгоритм последовательного пересчета:

$$x_{k+1} = Ax_k + B\varepsilon_k, \quad (1)$$

где x_{k+1} , x_k — вектор центрированных и нормированных значений отслеживаемых характеристик на двух соседних шагах алгоритма; ε_k — вектор, составленный из независимых, нормально распределенных величин с нулевым средним и единичной дисперсией; A и B — постоянные матрицы фильтра.

Можно показать [11], что для адекватного отражения корреляционных свойств порождаемого случайного процесса матрицы A и B должны вычисляться по формулам:

$$A = M_1 \cdot M_0^{-1}; \quad B \cdot B^T = M_0 - M_1 \cdot M_0^{-1} \cdot M_1^T,$$

где M_0 , M_1 — матрицы кросс- и автокорреляции соответственно.

Такой подход используется для генерации статистически связанных скалярных величин различной природы: температуры и облачности. При этом матрицы формирующего фильтра вычисляются отдельно для каждого календарного месяца.

Для одномерного случайного процесса, т. е. для генерации временного ряда единственной независимой случайной величины x , формула (1) вырождается к виду

$$x_{k+1} = \rho \cdot x_k + \sqrt{1 - \rho^2} \cdot \varepsilon_k, \quad (2)$$

где ρ — коэффициент автокорреляции.

Подобным способом в описываемом генераторе моделируются характеристики ледового режима в периоды присутствия льда: сплоченность, толщина и характерный размер ледового поля.

Особый интерес представляет собой случай, когда необходимо сгенерировать единственную независимую характеристику (например, скорость ветра), которая характеризуется величиной и направлением (физический, или евклидов вектор). Тогда основное уравнение формирующего фильтра первого порядка можно записать в виде

$$w_{k+1} = \alpha_w \cdot w_k + \sqrt{1 - \alpha_w^2} \cdot \varepsilon_k, \quad (3)$$

где w_{k+1} и w_k — приведенные вектора направления/скорости ветра на двух последовательных шагах; ε_k — случайный вектор, подчиняющийся двумерному нормальному закону распределения с нулевым средним единичной дисперсией.

Скалярный параметр формирующего фильтра α_w имеет смысл коэффициента автокорреляции для случайной векторной величины и может быть определен в виде

$$\alpha_w = M \left(\left(\hat{W}_{k+1} - M(\hat{W}) \right) \cdot \left(\hat{W}_k - M(\hat{W}) \right) \right) / M \left(\left(\hat{W}_k - M(\hat{W}) \right)^2 \right), \quad (4)$$

где $\hat{W}$ — размерный вектор фактической скорости; M — оператор взятия математического ожидания (в случае эмпирической выборки — усреднение по всем наблюдениям), а оператор умножения обозначает скалярное произведение векторов.

Формирующий фильтр служит для получения центрированных и нормированных значений моделируемых метеохарактеристик. Алгоритм их пересчета в размерные величины определяется соображениями о вероятностном законе распределения соответствующего параметра. Перечень способов расчета результирующих значений различных природных параметров приведен в табл. 2.

Таблица 2

Методы вычисления размерных значений природных параметров

№ п/п.	Параметр	Закон	Способ пересчета
1	Температура в °С	Нормальный	Умножение на текущую величину стандартного отклонения и добавка средней величины, вычисляемой с учетом годового и суточного хода температур
2	Облачность в %	Нормальный	Умножение на текущую величину среднеквадратичного отклонения и добавка текущей средней величины. Отсечение нефизических значений
3	Сила ветра (направление в град. и скорость в м/с)	Эмпирическое табличное распределение (румб/интервал скоростей)	Нахождение ячейки таблицы эмпирического распределения обращением величины кумулятивной функции распределения для сгенерированной величины и выбор случайного значения внутри элементарного интервала
4	Сплоченность льда в %	Эмпирическое распределение	Нахождение интервала эмпирической гистограммы по вычисленным квантилям распределения [12]
5	Толщина льда в м	Гамма-распределение	Метод Йонка [13]
6	Характерный размер ледового поля	Эмпирическое распределение (гистограмма)	Нахождение интервала эмпирической гистограммы обращением величины кумулятивной функции распределения для сгенерированной величины и выбор случайного значения внутри интервала

Для моделирования автокоррелированных временных рядов величин, имеющих дискретный характер значений или приводимых к такому виду для удобства использования в модели, используется механизм дискретных марковских цепей с конечным числом состояний и статичными, или зависящими от времени года, матрицами перехода между состояниями. В описываемом генераторе таким способом моделируются градация условий горизонтальной видимости, а также факт наличия льда.

Помимо стандартных метеорологических параметров, важными факторами в моделях морской логистики выступают течение и волнение. Они непосредственно связаны с текущими природными явлениями, поэтому для их моделирования логично применение методов расчета, имеющих хоть и очень простое, но физическое обоснование. Так, вектор поверхностного течения в описываемом генераторе вычисляется как суперпозиция приливной и ветровой составляющих в рамках простейшей линейной регрессионной модели с добавочным стохастическим компонентом:

$$V_{flow} = V_{tide} + \alpha_{flow} \cdot W + \beta_{flow} \cdot \varepsilon_{flow}$$

где V_{flow} — вектор суммарного течения; V_{tide} — вектор приливной составляющей течения, абсолютная величина которой вычисляется по основной формуле предвычисления прилива из модели АОТИМ [14]; W — ранее сгенерированный на этом же шаге вектор скорости ветра; ε_{flow} — случайный вектор, подчиняющийся нормальному закону распределения с нулевым средним и единичной дисперсией; α_{flow} , β_{flow} — постоянные параметры.

Аналогично рассчитывается вектор скорости дрейфа льда как добавка «разворота», обусловленного ветровой составляющей к предопределенной доле поверхностного течения. Морское волнение моделируется только как ветровое, поскольку в большинстве случаев влиянием зыби можно пренебречь. Для этого используется упрощенная методика [15], согласно которой истинная значительная высота волнения H_{sig} (моделируется только для безледового периода) определяется в виде

$$H_{sig} = \min \{h_{max}, h_{dist}, h_{time}\}, \quad (5)$$

где h_{dist} — высота волнения, ограниченная дистанцией разгона; h_{time} — высота волнения, ограниченная временем разгона; h_{max} — максимально возможная высота волнения (высота полностью сформировавшейся волны).

По величине сгенерированной облачности определяется значение нижней границы облаков, которая может являться ограничивающим фактором для операций вертолетного сопровождения МЛСП. Кроме того, дополнительным лимитирующим фактором здесь также выступает горизонтальная видимость. В реализованном имитационном алгоритме стохастического моделирования эта величина описывается в виде дискретной переменной с состояниями, соответствующими предопределенным граничным значениям, зафиксированным в различных регламентах работы МТТС — от нуля (видимость более 2 км) до трех (видимость менее 100 м). Для моделирования такого процесса совершенно естественно использовать классический подход, основанный на применении дискретных марковских цепей. В рассматриваемом случае эта цепь будет иметь четыре состояния, а параметры матрицы переходов между ними могут быть идентифицированы по данным фактических измерений.

На рис. 1 показана общая процедура генерации всех отслеживаемых метеопараметров в реализованном алгоритме имитационного динамического моделирования внешних условий с учетом причинно-следственных связей между порождаемыми элементами. Таким образом, внутренняя логика алгоритма погодного генератора представляет собой синтез статистического моделирования и физически-обоснованных подходов.

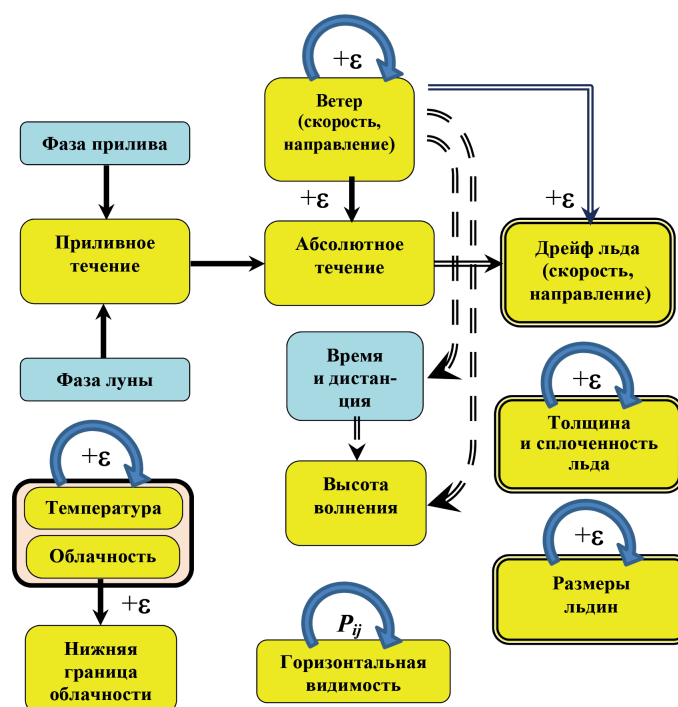


Рис. 1. Последовательность моделирования характеристик в реализованном генераторе характеристик окружающей среды

Для проведения имитационного эксперимента по моделированию жизненного цикла морской транспортно-технологической системы МЛСП «Приразломная» был разработан формализованный алгоритм определения доступности каждого грузового терминала МЛСП по природным условиям. Особенностью данного алгоритма является то, что доступность каждого грузового терминала не определяется пороговым значением только одного природного параметра (скорость ветра, направление ветра, высота волн и т. п.), а зависит от значений всех параметров. При этом моделирование природных условий производится при помощи созданного стохастического погодного генератора, описанного ранее. Генератор выдает значения 17 природных динамических

параметров, номенклатура которых приведена в табл. 1. Очевидно, что число возможных сочетаний этих параметров практически не ограничено, поэтому для создания алгоритма определения доступности терминалов был использован не полный перебор возможных сочетаний параметров, а упрощенный экспертный подход, ориентированный на ключевые параметры и их пороговые совместные значения. Основными источниками данных для создания алгоритма доступности терминалов являются:

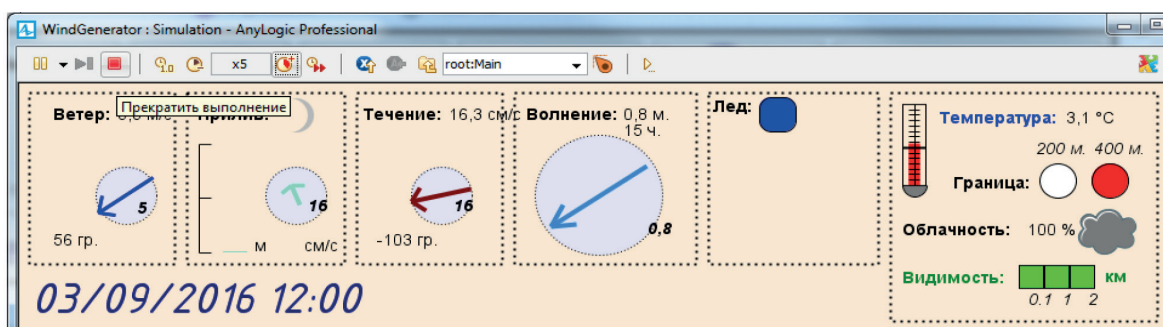
- регламенты выполнения грузовых операций на МЛСП;
- обработанные статистические данные реальных грузовых операций на МЛСП;
- результаты моделирования работы судов при различных погодных и ледовых условиях в навигационном тренажере ФГУП «Крыловский государственный научный центр»;
- экспертные оценки и комментарии капитанов судов, выполняющих грузовые операции на МЛСП.

Описание результатов формализации критериев доступности КУПОН и кранов МЛСП по погодным условиям приведено далее.

Результаты (Results)

Алгоритм стохастического генератора погодных и ледовых условий окружающей среды в районе МЛСП «Приразломная» и его визуальное представление в виде информационной погодной панели могут быть интегрированы в состав любой имитационной модели (рис. 2) и запускаться, в том числе, в режиме моделирования «в будущем времени», что позволяет эмулировать наличие краткосрочных прогнозов погоды стопроцентной оправдываемости, используемых в оперативном планировании.

а)



б)

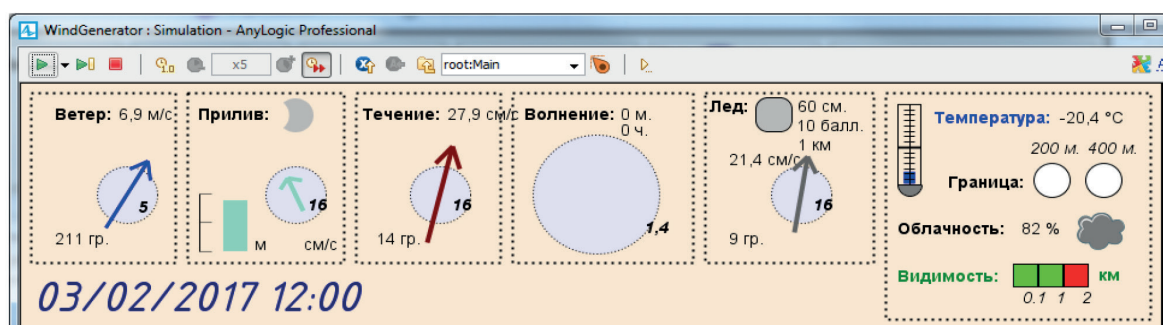


Рис. 2. Внешний вид панели мониторинга условий окружающей среды для условий чистой воды (а) и ледового периода (б)

Генерация значений всех отслеживаемых параметров внешних условий на текущий момент модельного времени (периодичность обновления принята равной 1 ч, однако этот параметр дискретности является одним из настроечных параметров генератора погоды и может быть сконфигурирован произвольным образом, не нарушая работоспособность алгоритма).

Для проверки адекватности спроектированного и реализованного стохастического динамического генератора условий окружающей среды был проведен ряд верификационных тестов, в которых сравнивались разнообразные статистики, вычисленные, с одной стороны, по фактическим реализациям погодных условий, взятых из различных источников, а с другой стороны — по синтетическим «сценариям» виртуальной сгенерированной погоды. Сравнению подвергались как простые статистики (первые моменты распределений, гистограммы и т. д.), так и более сложные показатели (порядковые статистики, вероятности критических выбросов, характерные длины серий квазипостоянства элементов, показатели авто- и кросскорреляции). Большинство тестов демонстрируют высокую степень адекватности реализованного алгоритма, т. е. допустимость и потенциальную полезность его использования в комплексной имитационной модели МЛСП, предназначенной для анализа и оптимизации режимов ее функционирования.

В разработанном с использованием стохастического генератора погодных и ледовых условий окружающей среды алгоритме определения доступности грузовых терминалов МЛСП учтены все четыре моделируемых грузовых терминала: юго-восточный КУПОН, северо-западный КУПОН, восточный и западный грузовые краны.

На рис. 3 и 4 в качестве примера показаны алгоритмы определения доступности юго-восточного КУПОН и восточного крана соответственно. Доступность терминала моделируется по принципу светофора (этот принцип переносится далее и в имитационную модель):

- «зеленый» — разрешены подход, швартовка и грузовые операции;
- «желтый» — разрешены только грузовые операции;
- «красный» — все запрещено.

Алгоритмы определения доступности северо-западного КУПОН и западного крана выполнены аналогично с учетом своих допустимых секторов направлений внешних воздействий ветра, волнения, течения и льда.

Условные обозначения параметров природных условий показаны в табл. 3. Символы на блок-схемах имеют следующие обозначения:

- && — логический оператор «И»;
- || — логический оператор «ИЛИ»;
- ! — логический оператор «НЕ».

Таблица 3

**Принятые обозначения в блок-схемах доступности КУПОН и кранов
по природным параметрам**

Описание параметра	Условное обозначение
Направление ветра, град.	НВ
Скорость ветра, м/с	V_w
Направление волнения, град.	$H_{\text{волн}}$
Высота волны $h_{3\%}$, м	$h_{3\%}$
Направление течения, град.	H_t
Скорость течения, м/с	V_c
Индикатор наличия льда (есть / нет)	Ice _i
Приведенная толщина льда, м	h_{ice}
Сплоченность льда, баллы	Спл _{ice}
Направление дрейфа льда, град.	НД _{ice}
Скорость дрейфа льда, м/с	V_i
Сжатие льда, баллы	Сж _Н
Дальность видимости, м	ДВ
Высота нижнего края облачности, м	$H_{\text{обл}}$
Температура воздуха, °С	t
Наличие ледового менеджмента (true / false)	Ice_Men



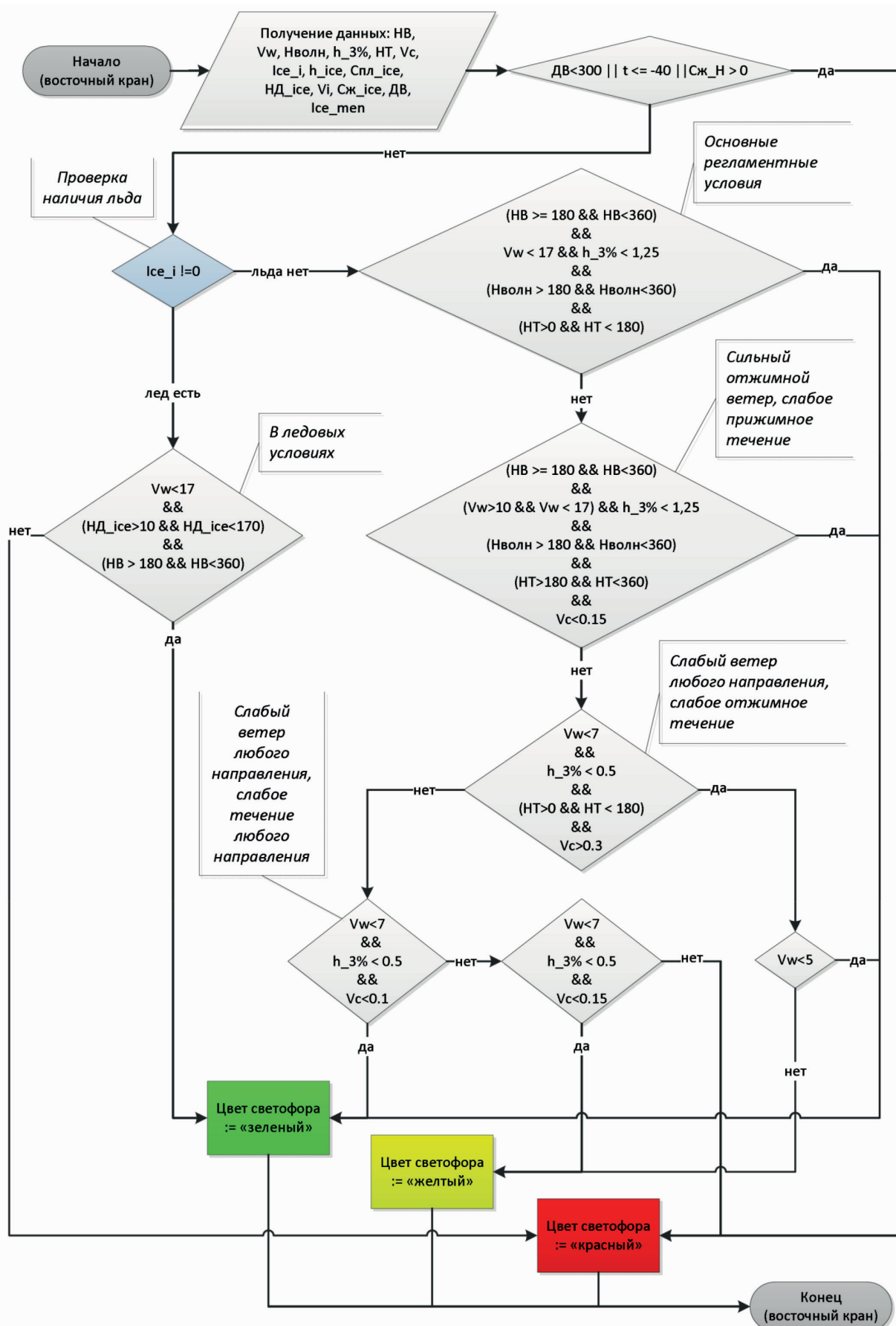


Рис. 4. Алгоритм определения доступности восточного крана по погодным параметрам

Расчетные значения всех принятых ограничений по ветру, волнению, видимости, ледовых условий и другим параметрам приведены непосредственно на схемах рис. 3 и 4. Необходимо отметить, что при разработке алгоритмов определения доступности терминалов принимались проектные характеристики технических средств, обеспечивающих выполнение грузовых операций. Например, как видно из рис. 3, допустимый сектор работы КУПОН принимается равным 130° летом и 110° зимой (без учета ледового менеджмента). При этом необходимо добавить некоторые комментарии о состоянии сектора доступности КУПОН на период 2015 – 2017 гг. Из-за несовершенства используемого швартовного оборудования, фактическое значение сектора доступности КУПОН до лета 2017 г. составляло $90^\circ (\pm 45^\circ \text{ от оси КУПОН})$, что было обусловлено конструктивными особенностями швартовной лебёдки. В 2017 г., после модернизации лебёдки, в ходе которой был доработан ролик для укладки на барабан лебёдки швартовного каната, этот сектор был расширен до 130° . Новое значение сектора безопасной работы танкера у КУПОН было согласовано со службами ООО «Газпром нефть шельф», с капитанами судов и МЛСП, после чего оно было включено в документы, регламентирующие безопасность МЛСП.

Созданный алгоритм явился основой для программного комплекса по определению доступности грузовых терминалов МЛСП. Внешний вид панели нового программного комплекса представлен на рис. 5. Разработанный программный комплекс был протестирован и апробирован непосредственно на МЛСП «Приразломная» в марте 2017 г. По результатам тестирования программного комплекса были подготовлены предложения по его доработке и практическому использованию в работе компании ООО «Газпром нефть шельф».

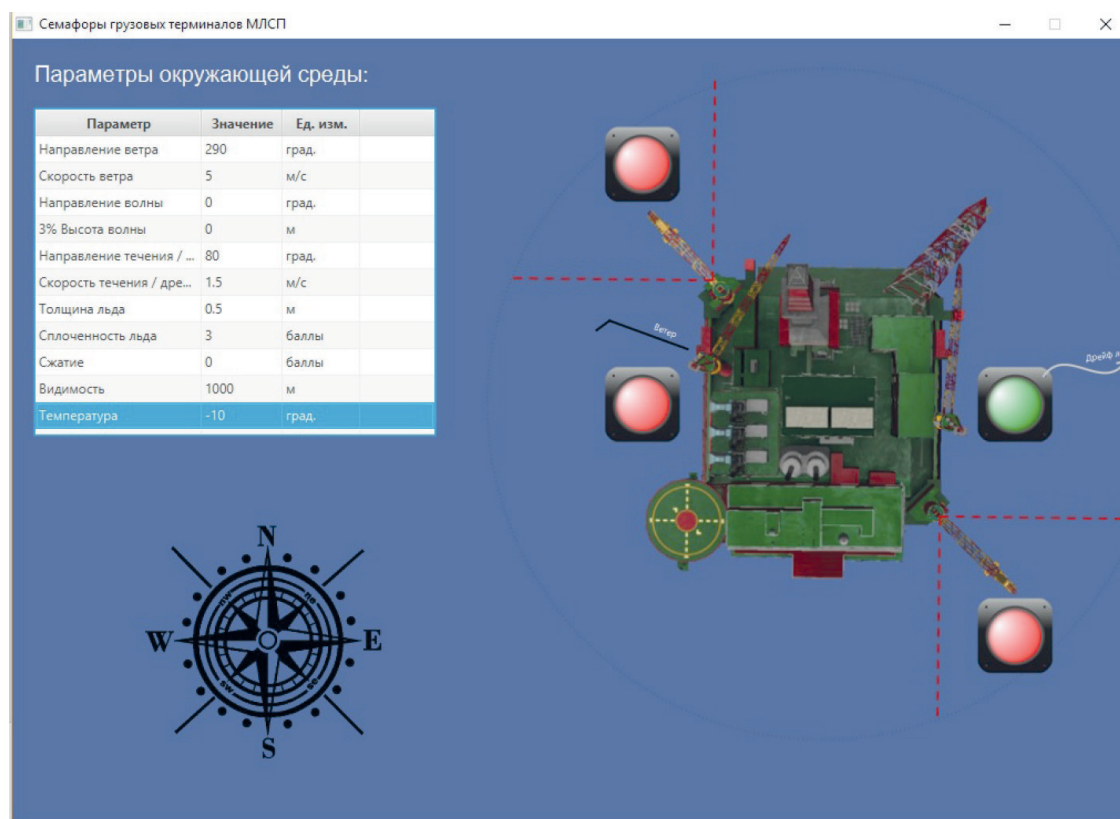


Рис. 5. Внешний вид панели программного комплекса по определению доступности грузовых терминалов МЛСП

Заключение (Conclusion)

Результаты исследования работы транспортной системы обеспечения МЛСП «Приразломная» показали, что эффективность работы системы в значительной степени зависит от скорости выполнения операций снабжения и / или отгрузки нефти. Основным фактором, ограничивающим

скорость выполнения таких операций, выступают постоянные случаи наступления негативных внешних условий.

При этом, когда ставится задача детального исследования транспортно-технологической системы одной конкретной платформы, неприменимым оказывается упрощенный подход, который сводится к описанию доступности порта / терминала в виде единственной переменной логического типа, а смена периодов открытости и закрытости порта моделируется как простейший случайный процесс с двумя возможными состояниями.

Для решения подобной задачи был создан блок описания внешних условий, позволяющий моделировать виртуальные или прогнозировать актуальные значения всех интересующих элементов окружающей среды в явном виде. Именно ориентируясь на эти конкретные значения в каждый момент модельного времени в комплексной имитационной модели или реального времени в модуле оперативного мониторинга и планирования, должно приниматься решение о состоянии доступности каждого конкретного терминала или средства грузообработки платформы.

Таким образом, поставленная задача описания локальных «окон погоды» для операций грузообработки у МЛСП «Приразломная» предполагала, как отмечалось ранее, решение двух взаимосвязанных задач: информационное обеспечение данными о параметрах окружающей среды и формализация критериев доступности работы конкретного судна у конкретного терминала в зависимости от складывающейся обстановки.

С целью проведения имитационного эксперимента по моделированию жизненного цикла МЛСП «Приразломная» был разработан формализованный алгоритм определения доступности каждого грузового терминала МЛСП по природным условиям. Особенностью данного алгоритма явилось то, что доступность каждого грузового терминала не определяется пороговым значением только одного природного параметра (скорость ветра, направление ветра, высота волн и т. п.), а зависит от совместных значений всех параметров. При этом моделирование природных условий производится при помощи созданного стохастического погодного генератора, который выдает значения семнадцати природных динамических параметров. Созданный алгоритм послужил основой для программного комплекса по определению доступности грузовых терминалов МЛСП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Maisiuk Y.* Fleet Sizing for Offshore Supply Vessels with Stochastic Sailing and Service Times / Y. Maisiuk, I. Gribkovskaia // *Procedia Computer Science*. — 2014. — Vol. 31. — Pp. 939–948. DOI: 10.1016/j.procs.2014.05.346.
2. *Milaković A. S.* Optimization of OSV Fleet for an Offshore Oil and Gas Field in the Russian Arctic / A. S. Milaković, M. Ulstein, A. Bambulyak, S. Ehlers // *ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. — American Society of Mechanical Engineers, 2015. — Pp. V008T07A005–V008T07A005. DOI:10.1115/OMAE2015-41366.
3. *Eskandari H.* A simulation-based multi-objective optimization study of the fleet sizing problem in the offshore industry / H. Eskandari, E. Mahmoodi // *Maritime Economics & Logistics*. — 2016. — Vol. 18. — Is. 4. — Pp. 436–457. DOI:10.1057/mel.2015.21.
4. *Малыханов А. А.* Имитационное моделирование логистики снабжения арктических буровых платформ / А. А. Малыханов, В. Е. Черненко // *Имитационное моделирование. Теория и практика. Седьмая все-российская науч.-практ. конф.: тр. конференции в 2 т.* — Т. 2. — М.: Ин-т проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2015. — С. 210–213.
5. *Vanek O.* Agent-based model of maritime traffic in piracy-affected waters / O. Vanek, M. Jakob, O. Hrstka, M. Pechoucek // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. — 2013. — Vol. 36. — Pp. 157–176. DOI: 10.1016/j.trc.2013.08.009.
6. *Зайкин Д. А.* Комплексная имитационная модель морской транспортно-технологической системы платформы «Приразломная» / Д. А. Зайкин, А. А. Кондратенко, А. Б. Крестьянцев, О. В. Таровик, А. Г. Топаж // *Арктика: экология и экономика*. — 2017. — № 3 (23). — С. 86–102. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-3-86-102.

7. Nikishova A. Uncertainty quantification and sensitivity analysis applied to the wind wave model SWAN / A. Nikishova, A. Kalyuzhnaya, A. Boukhanovsky, A. Hoekstra // *Environmental Modelling and Software*. — 2017. — Vol. 95. — Pp. 344–357. DOI: 10.1016/j.envsoft.2017.06.030.
8. Кондратенко А. А. Моделирование систем арктического морского транспорта: основы междисциплинарного подхода и опыт практических работ / А. А. Кондратенко, А. Б. Крестьянцев, О. В. Таровик, А. Г. Топаж // *Арктика: экология и экономика*. — 2017. — № 1 (25). — С. 86–101.
9. Топаж А. Г. Программный комплекс имитационного моделирования для проектирования и анализа морских транспортных систем / А. Г. Топаж, О. В. Таровик, А. В. Косоротов, А. А. Бахарев // *Труды третьей международной науч.-практ. конф. «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» – «ИКМ МТМТС 2015»*. — СПб.: АО «Центр технологии судостроения и судоремонта», 2015. — С. 143–147.
10. Зайкин Д. А. Использование имитационного моделирования для анализа морской транспортно-технологической системы платформы «Приразломная» / Д. А. Зайкин, А. Б. Крестьянцев, О. В. Таровик, А. Г. Топаж // *Транспорт Российской Федерации*. — 2017. — № 1 (68). — С. 44–48.
11. Richardson C. W. WGEN: A model for generating daily weather variables / C. W. Richardson, D. A. Wright. — U. S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1984. — 83 p.
12. Рожков В. А. Многомерный статистический анализ полей общей сплоченности морского льда северной полярной области / В. А. Рожков, В. М. Смоляницкий // *Известия Русского географического общества*. — 2007. — Т. 139. — № 3. — С. 22–31.
13. Ермаков С. М. Статистическое моделирование / С. М. Ермаков, Г. А. Михайлов. — 2-е изд. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 1982. — 296 с.
14. Padman L. A barotropic inverse tidal model for the Arctic Ocean / L. Padman, S. Erofeeva // *Geophysical Research Letters*. — 2004. — Vol. 31. — Is. 2. — DOI: 10.1029/2003GL019003.
15. Coastal Engineering Manual (CEM), Engineer Manual 1110-2-1100. — U.S. Army Corps of Engineers, 2002, Washington, D.C. (6 volumes).

REFERENCES

1. Maisiuk, Yauhen, and Irina Gribkovskaia. “Fleet sizing for offshore supply vessels with stochastic sailing and service times.” *Procedia Computer Science* 31 (2014): 939–948. DOI: 10.1016/j.procs.2014.05.346.
2. Milaković, Aleksandar-Saša, Mads Ulstein, Alexei Bambulyak and Sören Ehlers. “Optimization of OSV Fleet for an Offshore Oil and Gas Field in the Russian Arctic.” *ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. American Society of Mechanical Engineers, 2015.
3. Eskandari, Hamidreza, and Ehsan Mahmoodi. “A simulation-based multi-objective optimization study of the fleet sizing problem in the offshore industry.” *Maritime Economics & Logistics* 18.4 (2016): 436–457. DOI:10.1057/mel.2015.21.
4. Malykhanov, A.A., and V.E. Chernenko. “Imitatsionnoe modelirovanie logistiki snabzheniya arkticheskikh burovykh platform.” *Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika Sed'maya vse-rossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, trudy konferentsii v 2 tomakh*. Vol. 2. M.: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, 2015: 210–213.
5. Vaněk, Ondřej, M. Jakob, O. Hrstka, and M. Pechoucek. “Agent-based model of maritime traffic in piracy-affected waters.” *Transportation research part C: emerging technologies* 36 (2013): 157–176. DOI: 10.1016/j.trc.2013.08.009.
6. Zaykin, Dmitry Arcadieievich, Aleksandr Alekseevich Kondratenko, Andrey Borisovich Krestyantsev, Oleg Vladimirovich Tarovik, and Aleksandr Grigor'evich Topaj. “Comprehensive Simulation Model of Marine Transport and Support System for “Prirazlomnaya” Platform.” *Arctic: Ecology and Economy* 3(23) (2017): 86–102. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-3-86-102.
7. Nikishova, Anna, A. Kalyuzhnaya, A. Boukhanovsky, and A. Hoekstra. “Uncertainty quantification and sensitivity analysis applied to the wind wave model SWAN.” *Environmental Modelling & Software* 95 (2017): 344–357. DOI: 10.1016/j.envsoft.2017.06.030.
8. Kondratenko, Aleksandr Alekseevich, Andrey Borisovich Krestyantsev, Oleg Vladimirovich Tarovik, and Aleksandr Grigor'evich Topaj. “Arctic Marine Transport System Simulation: Multidisciplinary Approach Fundamentals and Practical Experience.” *Arctic: Ecology and Economy* 1(25) (2017): 86–101.

9. Topazh, A.G., O.V. Tarovik, A.V. Kosorotov, and A.A. Bakharev. "Programmnyi kompleks imitatsionnogo modelirovaniya dlya proektirovaniya i analiza morskikh transportnykh system." *Trudy tret'ei mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Imitatsionnoe i kompleksnoe modelirovanie morskoi tekhniki i morskikh transportnykh sistem» - «IKM MTMTS 2015»*. SPb.: AO «Tsentr tekhnologii sudostroeniya i sudoremonta», 2015: 143–147.

10. Zaykin, D.A., A.B. Krestyantsev, O.V. Tarovik, and A.G. Topazh. "Application of simulation modelling for analysis of maritime transport and technology system of the Prirazlomnaya platform." *Transport of Russian Federation* 1(68) (2017): 44–48.

11. Richardson, Clarence W., and David A. Wright. *WGEN: A model for generating daily weather variables*. U. S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1984.

12. Rozhkov, V.A., and V.M. Smolyanitskiy. "Multivariate statistical analysis of the sea ice compaction fields of the Northern Polar region." *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva* 139.3 (2007): 22–31.

13. Ermakov, S.M., and G.A. Mikhailov. *Statisticheskoe modelirovanie*. 2nd ed. M.: FIZMATLIT, 1982.

14. Padman, L., and S. Erofeeva. "A barotropic inverse tidal model for the Arctic Ocean." *Geophysical Research Letters* 31.2 (2004). DOI: 10.1029/2003GL019003.

15. *Coastal Engineering Manual (CEM), Engineer Manual 1110-2-1100*. U.S. Army Corps of Engineers, 2002, Washington, D.C.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зайкин Дмитрий Аркадьевич —
заместитель начальника Управления —
начальник отдела эксплуатации флота
ООО «Газпром нефть шельф»
197198, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
Зоологический переулок, д. 2–4, лит. Б
e-mail: Zaykin.DA@gazprom-neft.ru
Топаж Александр Григорьевич —
доктор технических наук, ведущий научный
сотрудник
ФГУП «Крыловский государственный
научный центр»
196158, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
Московское шоссе, 44
e-mail: Alex.Topaj@gmail.com
Косоротов Андрей Викторович —
Ведущий инженер
ФГУП «Крыловский государственный
научный центр»
196158, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
Московское шоссе, 44
e-mail: A_Kosorotov@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zaykin, Dmitry A. —
Deputy head of directorate –
chief of fleet operation department
LLC Gazprom Neft Shelf
2-4/B Zoologicheskii lane, St. Petersburg,
197198, Russian Federation
e-mail: Zaykin.DA@gazprom-neft.ru
Topaj, Aleksandr G. —
Dr. of Technical Sciences,
Leading Researcher
Krylov Shipbuilding Research Centre
44 Moskovskoe shosse Str., St. Petersburg,
196158, Russian Federation
e-mail: Alex.Topaj@gmail.com
Kosorotov, Andrey V. —
Leadind Engineer
Krylov Shipbuilding Research Centre
44 Moskovskoe shosse Str., St. Petersburg,
196158, Russian Federation
e-mail: A_Kosorotov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15 января 2018 г.
Received: January 15, 2018.