

## ИНФОРМАЦИОННОЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ АРКТИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ<sup>1</sup>

А.Г. Топаж, Р.И. Май, В.М. Смоляницкий, О.В. Таровик (Санкт-Петербург)

### Введение

Важной составляющей имитационных моделей морских транспортных систем [1,5] является описание динамики природных условий. Потребность в описании метеорологической и ледовой обстановки возникает по двум направлениям. Во-первых, в регионах движения судов, где природные условия существенным образом влияют на скорость судна, расходы топлива и траекторию перемещения (такая метеорологическая информация должна быть представлена как во времени, так и в пространстве). Во-вторых, для адекватного моделирования грузовых операций судов в портах, в море или у конкретных терминалов, когда необходимо моделирование динамики погоды в конкретной точке, но с повышенными требованиями как к количеству отслеживаемых параметров, так и к уровню их временного разрешения. Существует несколько подходов к моделированию погоды в имитационном эксперименте.

1. Использование временных рядов фактических наблюдений, т.е. прогон модели по имеющимся наборам архивных натуральных данных или по искусственным сценариям, полученным «склеиванием» характерных периодов из разных лет (например, произвольное перемешивание месячных интервалов [2]). При таком подходе остается вопрос о корректности искусственного «сшивания» фрагментов натурной динамики метеопказателей и степени статистической вариабельности получаемых результатов моделирования. Другим существенным ограничением часто является отсутствие фактических измерений с достаточным уровнем детализации.

2. Применение физически-обоснованных моделей глобальной циркуляции, в которых динамика изменения 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 [3], что невозможно в прикладных имитационных моделях, где погода является не основным объектом исследования, а лишь одним из влияющих факторов.

3. 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. Основные требования, определяющие сходство виртуальной и натурной погоды, связаны с временной и пространственной корреляцией как одного (автокорреляция), так и нескольких (кросс-корреляция) моделируемых параметров.

В статье приводится перечень решений по использованию как одноточечных, так и пространственно-распределенных «генераторов погоды».

### Одноточечный генератор погодной и ледовой обстановки в порту

В ряде транспортных моделей описание влияния внешних условий на грузовые операции в порту или у терминала производится с помощью единственной переменной булевого типа: «порт открыт», «порт закрыт» [4, 5]. Однако этот подход оказывается

<sup>1</sup> Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 17-79-20162).

неприменим, если рассматриваемый транспортный узел имеет сложную структуру и состоит из нескольких погрузочно-отгрузочных терминалов, имеющих различные природные ограничения [6]. В этом случае необходимо моделирование всех влияющих факторов окружающей среды в явном виде.

Вопросом первостепенной важности является обеспечение корреляционных свойств моделируемых погодных процессов. Для решения этой задачи мы использовали методологию формирующих фильтров первого порядка. Применительно к моделированию погоды этот метод был впервые изложен в [7] для случая многомерного процесса, компоненты которого представляют собой величины различной физической природы (логический или аффинный вектор). Основное уравнение метода описывает рекуррентный алгоритм последовательного пересчета:

$$x_{(k+1)} = A \cdot x_k + B \cdot \varepsilon_k \quad (1)$$

где  $x_{k+1}$ ,  $x_k$  – вектор центрированных и нормированных значений отслеживаемых характеристик на двух соседних шагах алгоритма,  $\varepsilon_k$  – вектор, составленный из независимых, нормально распределенных величин с нулевым средним и единичной дисперсией,  $A$  и  $B$  – постоянные матрицы фильтра. Можно показать [7], 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, то есть 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  $\rho$  – 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,  $\varepsilon_k$  – случайный вектор, подчиняющийся двумерному нормальному закону распределения с нулевым средним и единичной дисперсией. Скалярный параметр формирующего фильтра имеет смысл коэффициента автокорреляции для случайной векторной величины и может быть определен как:

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

где  $\widehat{W}$  – размерный вектор фактической скорости,  $M$  – оператор взятия математического ожидания (в случае эмпирической выборки – усреднение по всем наблюдениям), а звездочка 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 таблице.

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 моделируется градация условий горизонтальной видимости, а также факт наличия льда.

Помимо стандартных метеорологических параметров, важными влияющими факторами в моделях морской логистики выступают течение и волнение. Они непосредственно связаны с текущими природными явлениями, поэтому для их моделирования логично применять методы расчета, имеющие пусть очень простое, но физическое обоснование. Так, вектор поверхностного течения в описываемом генераторе вычисляется как суперпозиция приливной и ветровой составляющих, где абсолютная скорость приливной составляющей течения вычисляется по основной формуле предвычисления прилива из модели АОТИМ [10]. Аналогично рассчитывается вектор скорости дрейфа льда как добавка «разворота», обусловленного ветровой составляющей, к предопределенной доле поверхностного течения.

### Методы вычисления размерных значений природных параметров

№	Параметр	Закон	Способ пересчета
1.	Температура	Нормальный	Умножение на текущую величину стандартного отклонения и добавка средней величины, вычисляемой с учетом годового и суточного хода температур
2.	Облачность	Нормальный	Умножение на текущую величину среднеквадратичного отклонения и добавка текущей средней величины. Отсечение нефизичных значений
3.	Сила ветра (направление и скорость)	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	Эмпирическое распределение	Нахождение интервала эмпирической гистограммы по вычисленным квантилям распределения [8].
5.	Толщина льда	Гамма-распределение	Метод Йонка [9]
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

Морское волнение моделируется только как ветровое, поскольку в большинстве случаев влиянием зыби можно пренебречь. Для этого используется упрощенная методика [11], согласно которой истинная значительная высота волнения  $H_{sig}$  (моделируется только для безледового периода) определяется как:

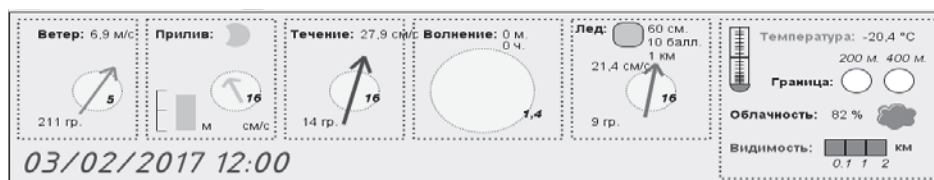
$$H_{sig} = \min\{h_{max}, h_{dis}, h_{time}\}, \quad (5)$$

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).

Таким образом, внутренняя логика алгоритма погодного генератора представляет собой синтез статистического моделирования и физически-обоснованных подходов. Алгоритм может быть интегрирован в состав любой имитационной модели (рисунок) и запускаться, в том числе, в режиме моделирования «в будущем времени», что позволяет эмулировать наличие краткосрочных прогнозов погоды стопроцентной оправдываемости, которые могут использоваться в оперативном планировании.

### Моделирование ветроволновых и ледовых условий в морях

Используемый нами подход к информационному обеспечению имитационной модели пространственно-распределенными природными параметрами базируется на общих принципах работы с ГИС и реляционными базами данных. В текущей версии программного решения [5] для моделирования морских транспортных систем (МТС) законы распределения параметров ветроволновых условий описываются для крупных характерных зон Мирового океана на основе данных [12], а ледовые условия представлены с помощью регулярной широтно-долготной сетки с шагом 0.25 градуса. Параметры ледовой обстановки описываются множеством скалярных величин, таких как общая сплоченность и сплоченности льда для старшей, средней и младшей возрастных градаций, толщины льда для тех же градаций, торосистость, заснеженность, разрушенность, характерный размер льдин. Эти величины, имеющие как пространственную, так и временную привязку (внутрисезонная и межсезонная вариабельность ледовых условий) используются в явном виде для решения задачи оптимальной маршрутизации судов во льдах с учетом ледокольного сопровождения. Для этого используется оригинальный алгоритм оптимизации на двухслойном ориентированном графе [13].



Внешний вид панели динамики условий окружающей среды

При имитации перемещения судна в ходе эксперимента с имитационной моделью производится стохастическое моделирование текущих значений природных показателей на основе законов их распределения, описание которых содержится в базе погодных данных. При этом особую важность имеют два требования: а) эффективность взаимодействия имитационной модели и базы данных; б) обеспечение логической связности получаемых результатов. Первое требование имеет скорее технический характер и заключается в том, что поскольку объем информации, хранящейся в базе климатических характеристик, достаточно велик, то количество обращений к базе должно быть сведено к минимуму. Для этого в программном решении используется оригинальный алгоритм двухуровневого кэширования оперативной информации. Второе означает, что алгоритм стохастического моделирования должен поддерживать временные и пространственные связи внутри порождаемых им сценариев развития модельной погоды. В текущей версии комплексной имитационной модели [5] генерация погодных характеристик сводится к элементарным вычислительным

процедурам. Для ветра и волнения они заключаются в стохастическом моделировании методом Монте-Карло нескольких случайных величин, заданных эмпирическими функциями совместного распределения в табличной форме. Генерация набора показателей ледовой обстановки состоит в простом выборе случайного числа из характерного диапазона значений (например, толщина льда в рамках заданной возрастной градации). Подобный алгоритм не поддерживает автокорреляционные и лишь в минимальной степени отражает кросс корреляционные свойства погоды.

Для решения задач оперативного мониторинга и получения более адекватных оценок навигационных качеств и рисков эксплуатации судов в реальных условиях необходим переход к использованию «пространственно-временных» генераторов морской погоды, которые могут быть построены на следующих принципах:

1. При создании «пространственно-временного» генератора погоды в регионе можно ограничиться двумя метеорологическими полями – температурой воздуха и атмосферным давлением. Ветер, дрейф ледяного покрова и параметры волнения можно рассчитать исходя из принятых геострофических соотношений, с заданием определенных корректирующих эмпирических коэффициентов, зависящих от географического положения и сезона.

2. Ледяной покров, в отличие от полей давления и температуры, обладает разрывами сплошности и сложной пространственной структурой. Для него характерно наличие границ между пространственно однородными ледяными массивами различного генезиса. Для отражения этой структуры в модели необходимо определить географически привязанные статистические характеристики размеров однородных ледовых зон (такие оценки можно получить, например, проанализировав массив ледовых карт). Далее в зависимости от подхода к моделированию связанных случайных полей можно реализовать один из следующих способов. Первый способ – сначала методом Монте-Карло для каждой ячейки сеточной области сгенерировать параметры ледяного покрова, затем полученное случайное поле либо сгладить фильтром, либо аппроксимировать двумерными полиномиальными функциями. Второй способ – сначала внутри моделируемого поля по характеристикам размеров однородных зон выделить подобласти, в которых затем по осредненным функциям распределений методом Монте-Карло сгенерировать общую для всей подобласти характеристику ледяного покрова. Возможна также комбинация указанных подходов.

### **Выводы**

Динамика природных условий, ввиду своей значимости, должна находить адекватное отражение в имитационных моделях МТС.

Формальные стохастические методы генерации характеристик окружающей среды имеют особую актуальность для МТС, поскольку их вычислительная сложность оказывается приемлемой, и они позволяют генерировать произвольное число погодных сценариев для получения статистически представительных результатов моделирования.

Построение «одноточечного» погодного генератора морской погоды имеет достаточное научно-методическое обеспечение, а создание пространственно-временного стохастического имитатора требует дополнительных исследований.

## Литература

1. **Vanek O. et al.** Agent-based model of maritime traffic in piracy-affected waters // *Transportation Research, Part C* 36, 2013. P. 157 – 176.
2. **Maisiuk I., Gribkovskaia I.** Fleet Sizing for Offshore Supply Vessels with Stochastic Sailing and Service Times // *Proceedings of ITQM-2014*. S. 1., 2014. P. 939 – 948.
3. **Nikishova A.V. et al.** Uncertainty quantification and sensitivity analysis applied to the wind wave model SWAN // *Environmental Modelling and Software*. 2017. Vol. 95. P. 344 – 357.
4. **Таровик О.В. и др.** Моделирование систем арктического морского транспорта: основы междисциплинарного подхода и опыт практических работ // *Арктика: экология и экономика*. 2017. № 1 (25). С. 86 – 101.
5. **Топаж А.Г. и др.** Программный комплекс имитационного моделирования для проектирования и анализа морских транспортных систем // *Труды конф. ИКМ МТМТС-2015*. СПб. С. 143 – 147.
6. **Таровик О. В. и др.** Комплексная имитационная модель морской транспортно-технологической системы платформы «Приразломная» // *Арктика: экология и экономика*. 2017. № 3 (27). С. 86 – 103.
7. **Richardson C.W., Wright D.A.** WGEN: A model for generating daily weather variables. US Dept. Agric., Agricultural Research Service. 1984. Publ. ARS-8.
8. **Рожков В.А., Смоляницкий В.М.** Многомерный статистический анализ полей общей сплоченности морского льда северной полярной области // *Изв. РГО*. 2007.139(3). С. 22 – 31.
9. **Ермаков С.М., Михайлов Г.А.** Статистическое моделирование. 2-е изд., М.: Наука, 1982.
10. **Padman L., Erofeeva S.** A barotropic inverse tidal model for the Arctic Ocean // *Geophysical Research Letters*. 2004. 31(2). L02303.
11. *Coastal Engineering Manual (CEM), Engineer Manual 1110-2-1100*. U.S. Army Corps of Engineers, 2002, Washington, D.C. (6 volumes).
12. *Ветер и волны в океанах и морях: справочные данные*. Регистр СССР. Л.: Транспорт, 1974. 360 с.
13. **Топаж А.Г. и др.** Иерархия уровней принятия решений в имитационном моделировании морских перевозок // *Сборник трудов конференции ИММОД-2015*. 2015. Т.2. С. 34 – 39.