

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОРСКОЙ ПОГОДЫ КАК ВХОДНОГО СИГНАЛА ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ

*Р.И. Май, О.В. Таровик, А.Г. Топаж**

ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,
Россия, 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44; *alex.topaj@gmail.com

Реферат. В статье рассматриваются вопросы обеспечения имитационных моделей транспортных, технических или экологических систем в Арктике входными данными о метеорологической и ледовой обстановке. В качестве источника альтернативных сценариев виртуальной погоды для конкретной географической точки предлагается использовать стохастический генератор погодных реализаций. Описаны основные принципы реализованного оригинального генератора, основанные на рассмотрении морской погоды как многомерного дискретного случайного процесса и использовании элементов физически-обоснованных моделей. Изложена структура базы данных с пространственной привязкой для климатических параметров ветра, волнения и ледовых условий и методика оперативного взаимодействия с ней имитационных моделей из различных предметных областей. Дан краткий обзор существующих и перспективных подходов к информационному обеспечению предметно-ориентированных имитационных моделей с учетом временной нестационарности и пространственного распределения условий окружающей среды.

Ключевые слова. Генератор погоды, случайный процесс, формирующий фильтр, корреляция, имитационные модели, нестационарность.

MARITIME WEATHER AS AN INPUT DATA OF SIMULATION MODELS OF TRANSPORTATION AND ECOLOGICAL SYSTEMS IN ARCTIC REGIONS

*R.I. May, O.V. Tarovik, A.G. Topaj**

Krylov State Research Centre,
44, Moskow sh., 196158, Saint-Petersburg, Russia; *alex.topaj@gmail.com

Abstract. The article describes the problems of information support of simulation models of technical objects as well as ecological systems by input data on the meteorological and ice conditions. The original one-site stochastic weather generator is proposed as a source of alternative virtual weather scenarios for a specific geographic location. The main principles of the implemented generation

algorithm are based on consideration of the sea weather as a multidimensional discrete random process as well as using elements of mechanistic, physically grounded models. The structure of a spatially-referenced relational database for climatic parameters of wind, waves and ice conditions is also described. Simulation model from different subject areas interacts with the database during model running in order to get the operative information about the environment variables for current model time. A brief review of existing and prospective approaches to information support of subject-oriented simulation models taking into account temporal nonstationarity and spatial distribution of environmental conditions is also presented.

Keywords. Weather generator, random process, forming filter, correlation, simulation model, nonstationarity.

Введение

Важной составляющей имитационных моделей природных систем или технических объектов, функционирующих под воздействием нестационарных условий окружающей среды, выступает описание погоды, то есть временного хода отслеживаемых метеопараметров. Динамика погодных условий определяет текущую благоприятность или неблагоприятность функционирования модельных объектов. Например, она служит одним из принципиальных входных сигналов для алгоритма моделирования поведения движущихся агентов (судов) во времени и в пространстве. Для адекватного моделирования грузовых операций судов в портах, в море или у конкретных терминалов требуется введение в рассмотрение «окон погоды» – допустимых регламентами интервалов значений метеохарактеристик для осуществления различных операций. Здесь необходимо описание динамики погоды в одной конкретной точке, но при повышенных требованиях как к количеству отслеживаемых параметров, так и к уровню их временного разрешения.

Тем более определяющее влияние оказывает динамика метеорологической и ледовой обстановки в конкретной точке или в масштабе рассматриваемого региона при модельном исследовании экологических процессов, например в задачах оценки последствий промышленных загрязнений, аварийных разливов нефти (Становой и др., 2007; Овсиенко и др., 2011) и т.п.

При решении перечисленных задач неизбежно встает вопрос о «моделировании погоды». Более того, поскольку для получения представительных статистических оценок параметров моделируемых систем используется стохастический компьютерный эксперимент с повторностями, необходимо иметь возможность «прогона» модели не с одним, а с множеством альтернативных сценариев развития погодных условий в течение выбранного временного интервала моделирования.

Существует несколько принципиальных подходов к «моделированию погоды» в имитационном эксперименте:

1) Использование временных рядов фактических наблюдений, т.е. прогон модели по сценариям, соответствующим predetermined наборам архив-

ных натуральных данных, или по искусственным сценариям, полученным «склеиванием» характерных периодов из разных лет (например, произвольное перемешивание месячных интервалов (Maisiuk, Gribkovskaia, 2014)). При таком подходе остается вопрос о корректности искусственного «сшивания» фрагментов натурной динамики метеопказателей и степени статистической вариабельности получаемых результатов моделирования. Другим существенным ограничением является недостаток фактических измерений с достаточным уровнем детализации.

2) Применение физически-обоснованных глобальных и региональных моделей, в которых динамика природных условий описывается как результат реального физического движения воздушных масс, взаимодействия атмосферы, океана и ледяного покрова с учетом всех причинно-следственных взаимосвязей и физических процессов. Однако использование таких моделей требует привлечения огромного количества вычислительных ресурсов (Nikishova et al., 2017), 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.

К настоящему времени накоплен значительный опыт использования виртуальных погодных сценариев, порожденных стохастическим генератором погоды, в различных моделях и приложениях экологической направленности, например, в моделях продукционного процесса сельскохозяйственных растений (Semenov et al., 1998; Топаж, 1992). Подобные сценарии содержат суточные данные о таких влияющих характеристиках как температура, осадки, солнечное сияние, скорость ветра и т.д. Для имитационной модели арктической транспортной системы или процесса распространения пятна загрязнения требуется гораздо более детальное описание динамики развития метеорологической обстановки. Во-первых, при этом может потребоваться учет большего числа метеопараметров, по крайней мере, наряду со скоростью ветра первостепенное значение приобретает задание его направления. Во-вторых, соответствующие модели могут потребовать гораздо большего временного разрешения (например, не суточных, а часовых данных). И, наконец, помимо стандартных метеорологических характеристик в рассмотрение необходимо вводить параметры ледовой обстановки.

Методы и материалы

Одноточечный генератор погодной и ледовой обстановки

В целом ряде моделей морских транспортных систем используется упрощенный подход для описания влияния внешних условий на интенсивность и возможность осуществления грузовых операций в порту. Он сводится к описанию доступности порта/терминала в виде единственной переменной логического типа («окна погоды»), а смена периодов открытости и закрытости порта моделируется как простейший скалярный процесс с двумя состояниями (Таровик и др., 2017а; Топаж и др., 2015а). Однако, такой подход оказывается неприменим, если рассматриваемый транспортный узел имеет сложную структуру и состоит из нескольких погрузочно-отгрузочных терминалов разного типа, снабженных разным грузовым оборудованием и имеющих различные регламенты работы. В этом случае единственным адекватным представлением внешних условий является задание, то есть моделирование всех влияющих факторов окружающей среды в явном виде. Иными словами – использование одноточечного генератора погоды в порту. В частности, различные модификации подобного генератора различной степени полноты использовались авторами доклада при выполнении работ по детальному анализу транспортно-технологической системы морской стационарной ледовой платформы «Приразломная» по заказу компании «Газпром Нефть Шельф» (Таровик и др., 2017б) и определении максимальной пропускной способности морского нефтяного перевалочного терминала в Мурманске по заказу компании «РПК Норд». Созданный для целей данных исследований оригинальный одноточечный генератор синтетических погодных реализаций морской погоды позволяет получать в режиме модельного времени ряды имитируемых погодных параметров (до 17-ти различных показателей метеорологической, ветро-волновой и ледовой обстановки) с настраиваемым временным разрешением (от одного часа до 24 часов). Ниже кратко перечислены основные подходы, использованные в логике реализованных алгоритмов стохастического моделирования.

Вопросом первостепенной важности при стохастическом моделировании произвольных случайных процессов является обеспечение его корреляционных свойств, то есть поддержка наблюдаемой на практике статистической связности результатов наблюдений в соседних временных точках. Для решения этой задачи мы использовали методологию формирующих фильтров первого порядка, то есть стандартный алгоритм моделирования автокорреляционного дискретного случайного процесса. В приложении к построению генератора погоды этот метод был впервые изложен в работе (Richardson, Wright, 1984) для случая многомерного процесса, компоненты которого представляют собой величины различной физической природы. Основное уравнение метода описывает рекуррентный алгоритм последовательного пересчета.

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}_k + \mathbf{B} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_k, \quad (1)$$

где \mathbf{x}_{k+1} , \mathbf{x}_k – вектор приведенных (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, \mathbf{A} и \mathbf{B} – постоянные матрицы фильтра. Можно показать (Richardson, Wright, 1984), что для адекватного отражения корреляционных свойств порождаемого случайного процесса матрицы \mathbf{A} и \mathbf{B} должны вычисляться по формулам:

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{M}_0^{-1} \\ \mathbf{B} \cdot \mathbf{B}^T &= \mathbf{M}_0 - \mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{M}_0^{-1} \cdot \mathbf{M}_1^T \end{aligned} \quad (2)$$

где \mathbf{M}_0 , \mathbf{M}_1 – матрицы кросскорреляции (зависимость между различными параметрами в один и тот же момент времени) и автокорреляции (зависимость между различными параметрами, взятыми со сдвигом на один шаг). В реализованном нами решении в точности такой подход используется для генерации статистически связанных скалярных величин различной физической 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

$$x_{k+1} = \rho \cdot x_k + \sqrt{1 - \rho^2} \cdot \varepsilon_k \quad (3)$$

где ρ – коэффициент автокорреляции. Подобным способом в описываемом генераторе моделируются характеристики ледового режима в периоды присутствия льда – сплоченность, толщина и характерный размер ледового поля. Наконец, особый интерес представляет случай, когда необходимо сгенерировать единственную независимую характеристику, которая характеризуется величиной и направлением, то есть эвклидов или физический вектор (например, скорость ветра). Принципиальное отличие этого случая от аффинного (логического) вектора (1) заключается в том, что физический вектор представляет собой объективно неделимую сущность, обладающую несколькими степенями свободы, то есть допускающую произвольное описание несколькими (для плоского вектора – двумя) числами в различных системах координат (например, две проекции в декартовой системе или угол и радиус в полярной). При этом выбор соответствующей формы представления меняет физический смысл компонентов корреляционной матрицы, который зачастую оказывается размытым (трудно понять значимость коэффициента корреляции проекции вектора по одной оси с проекцией на другую ось на предыдущем шаге). В этих условиях желательным представляется использовать в алгоритме моделирования некие инвариантные (не зависящие от выбора системы координат) показатели автокорреляции векторной величины. Например, в качестве таких показателей могут быть выбраны так называемые коллинеарный и ортогональный коэффициенты корреляции (Иванов, 2004). В еще более

упрощенном варианте в качестве данного инвариантного показателя можно использовать единую скалярную величину – обобщенный коэффициент автокорреляции для случайной векторной величины α_w . Тогда основное уравнение формирующего фильтра первого порядка также можно записать в следующем виде:

$$\mathbf{w}_{k+1} = \alpha_w \cdot \mathbf{w}_k + \sqrt{1 - \alpha_w^2} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_k, \quad (4)$$

где \mathbf{w}_{k+1} и \mathbf{w}_k – приведенные вектора направления-скорости ветра на двух последовательных шагах, $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ – случайный вектор, подчиняющийся двумерному нормальному закону распределения с нулевым средним единичной дисперсией. Параметр формирующего фильтра α_w может быть вычислен по формуле

$$\alpha_w = \frac{M\left(\left(\overline{\mathbf{W}}_{k+1} - M(\overline{\mathbf{W}})\right) * \left(\overline{\mathbf{W}}_k - M(\overline{\mathbf{W}})\right)\right)}{M\left(\left(\overline{\mathbf{W}}_k - M(\overline{\mathbf{W}})\right)^2\right)} \quad (5)$$

где $\overline{\mathbf{W}}$ – размерный вектор фактической скорости, M – оператор взятия математического ожидания (в случае эмпирической выборки – усреднение по всем наблюдениям), а звездочка обозначает скалярное произведение векторов. Можно показать, что такая формализация инвариантного показателя корреляции векторов совпадает с предложенной в работе (Шишков, 1958), где она вычисляется через определители тензоров взаимной дисперсии и автодисперсий, при условии сравнительной малости внедиагональных элементов соответствующих матриц.

Формирующий фильтр служит для получения на очередном временном шаге генератора приведенных, то есть центрированных и нормированных значений моделируемых метеохарактеристик. Алгоритм их пересчета в реальные размерные величины определяется соображениями о вероятностном законе распределения соответствующего параметра. Перечень принятых допущений и вытекающих из них способов расчета финишных значений различных характеристик погоды и ледовой обстановки приведен в табл. 1.

Для моделирования автокоррелированных временных рядов величин, имеющих дискретный характер значений или приводимых к этому представлению для удобства использования в модели, используется механизм дискретных марковских цепей с конечным числом состояний и статичными или зависящими от времени матрицами перехода между состояниями (Голубятников, 2004). В частности, в описываемом генераторе так моделируется градация условий горизонтальной видимости (описывается четырьмя характерными состояниями: «менее 100 м», «от 100 м до 1 км», «1-2 км», «свыше 2 км»), а также факт наличия льда, где матрица вероятностей перехода определяется отдельно для каждого календарного месяца. Кроме прочего, данный подход позволяет неявно описать вероятностное распределение сроков начала и конца ледового периода.

Таблица 1. Методы вычисления размерных непрерывных характеристик из приведенных значений

№	Характеристика	Закон распределения	Способ пересчета
1	Температура (°С)	Нормальный	Умножение на текущую величину среднеквадратичного отклонения и добавка средней величины, вычисляемой с учетом годового и суточного хода
2	Облачность (%)	Нормальный	Умножение на текущую величину среднеквадратичного отклонения и добавка текущей средней величины. Отсечение нефизичных значений
3	Сила ветра (направление в градусах и скорость в м/с)	Эмпирическое двумерное 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 (Рожков, Смоляницкий, 2007).
5	Толщина льда (м)	Гамма-распределение	Метод Йонка (Ермаков, Михайлов, 1982)
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

Помимо стандартных метеорологических параметров важным влияющим фактором в моделях морской логистики часто выступают характеристики поверхностного слоя воды – показатели течения и волнения. Они непосредственно связаны с текущими атмосферными явлениями, и для их моделирования логично применять методы расчета, имеющие пусть очень простое, но физическое обоснование.

Так, вектор поверхностного течения в описываемом генераторе морской погоды вычисляется как суперпозиция приливной и ветровой составляющей

$$V_{flow} = V_{tide} + \alpha_{flow} \cdot W_{45}, \quad (6)$$

где V_{flow} – вектор суммарного течения, V_{tide} – вектор приливной составляющей течения, W_{45} – вектор, полученный отклонением вправо на 45 градусов ранее сгенерированного на этом же шаге вектора скорости ветра W (тем самым в модели приближенно описывается влияние силы Кориолиса, приводящее к известному эффекту «спирали Экмана»), α_{flow} – постоянный коэффициент, значение которого принято равным 0.03, что соответствует приводимым в литературе оценкам (Ботук, 1949).

В свою очередь, абсолютная величина скорости приливной составляющей течения вычисляется по основной формуле предвычисления прилива. Предвычисление проводится по гармоническим постоянным 8 основных волн при-

лива M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, взятых из расчета приливной модели Arctic Ocean Tidal Inverse Model (Padman, Erofeeva, 2004).

Практически аналогично рассчитывается вектор скорости дрейфа льда, то есть он определяется через добавку «разворота», обусловленного ветровой составляющей, к некоторой доле поверхностного течения

$$\mathbf{V}_{ice} = \alpha_{ice}^v \cdot \mathbf{V}_{flow} + \alpha_{ice}^w \cdot \mathbf{W}_{28}, \quad (7)$$

Параметры α_{ice}^v , α_{ice}^w приняты равными 0.9 и 0.02 соответственно, что соответствует экспертным оценкам и косвенным данным, найденным в литературных источниках (Leppäranta, 2011).

Эффективная высота ветрового волнения моделируется с помощью упрощенной методики (Coastal Engineering Manual, 2002) и основывается на следующих допущениях. Истинная значительная высота волнения H_{sig} определяется как:

$$H_{sig} = \begin{cases} \min(h_{max}, h_{dist}, h_{time}), & \text{при отсутствии льда} \\ 0, & \text{при наличии льда} \end{cases} \quad (8)$$

где h_{dist} – высота волнения, ограниченная *дистанцией* разгона L :

$$h_{dist} = \frac{0.0413 \cdot u_f^2}{g} \cdot \left(\frac{L \cdot g}{u_f^2} \right)^{0.5}, \quad (9)$$

g – ускорение свободного падения (9.81 м/с²); L – характерная дистанция разгона (м), приблизительно оцениваемая, исходя из направления ветра и географического положения точки интереса относительно контура ближайшей береговой линии; u_f^2 – условная скорость ветра на границе раздела, которая связана с ранее вычисленной «эталонной» скоростью ветра соотношением $u_f^2 = C_D \cdot W^2$; C_D – коэффициент аэродинамического сопротивления вычисляемый по эмпирической формуле $C_D = 0.001 \cdot (1.1 + 0.035 \cdot W)$; h_{time} – высота волнения, ограниченная *временем* разгона T_R :

$$h_{time} = \frac{0.00299 \cdot u_f^2}{g} \cdot \left(\frac{T_R \cdot g}{u_f} \right)^{0.75}, \quad T_R = 3600 \cdot \left(3 + \sum_{i=1}^{N_M} 3 \cdot \frac{W_k \cdot W_{k-i}}{W_k^2} \right) \quad (10)$$

N_M – число предыдущих шагов генератора, до того момента, пока разница между «историческими» и «текущим» направлениями ветра не превышает 45° (таким образом, мы считаем, что вклад каждого предыдущего вектора скорости \mathbf{W}_{k-1} в общее время разгона определяется относительной проекцией этого вектора на текущее направление); $h_{max} = 21.15 \cdot u_f^2$ – максимально возможная высота волнения (высота полностью сформировавшейся волны).

Таким образом, внутренняя логика алгоритма погодного генератора представляет собой синтез формального статистического моделирования (получение реализаций погоды как многомерного дискретного случайного процесса с заданными авто- и кросскорреляционными свойствами методами формирующих фильтров и марковских цепей) и физически-обоснованные подходов.

Описанный алгоритм стохастического моделирования позволяет моделировать и визуализировать в режиме оперативной анимации множество характеристик окружающей среды непосредственно в ходе исполнения имитационной модели (рис. 1).

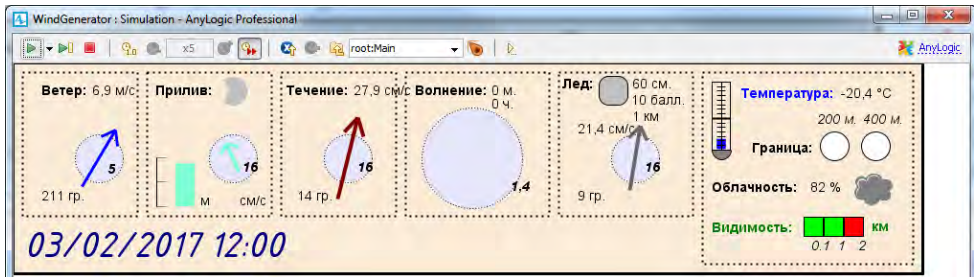


Рисунок 1. Внешний вид панели мониторинга условий окружающей среды для ледового периода

Следует также отметить, что логика стохастического алгоритма позволяет запускать генератор погоды в режиме моделирования «в будущем времени». Это позволяет эмулировать в имитационной модели наличие гипотетических краткосрочных прогнозов погоды стопроцентной оправданности и их использование для эмуляции в соответствующей модели процедуры оперативного планирования технологических или природоохранных мероприятий.

Предложенная и реализованная в виде автономного модуля динамической имитационной модели методика стохастического моделирования погодных и ледовых условий была верифицирована и апробирована в нескольких работах прикладного характера для конкретных географических точек российского арктического шельфа (Приразломненское месторождение, Штокманское месторождение, рейд Мурманска). При этом проверка соответствия синтетических сценариев погоды характеру реального климата проводилось двухэтапно. На первом уровне (априорная верификация) сравнивались значения модельных и фактических статистических характеристик погоды, не использованных явно для идентификации параметров генератора (частоты попадания значений метеозаписей в крайние квантили распределения, порядковые статистики и пр.). На втором уровне (апостериорная верификация) сравнивались эмпирические распределения длительностей «окон погоды» конкретных терминалов, порождаемые имитационной моделью и полученные обработкой фактических данных, взятых из журналов судовых операций. В обоих случаях наблюдалось удовлетворительное согласие результатов стохастического моделирования и данных реальных наблюдений.

Моделирование ветро-волновых и ледовых условий в пространственном разрешении

В ходе исполнения модели транспортной системы сведения об условиях внешней среды в пространственном (географическом) разрезе используются для решения задач разного уровня управления (Топаж и др., 2015б). Во-первых, они играют важную роль в задаче тактического планирования перевозок, а конкретно – при определении оптимальных маршрутов для запланированных рейсов. Действительно, обход участков мирового океана с неблагоприятными текущими или прогнозными условиями ветра и волнения имеет смысл даже для мощных современных судов. В целом ряде работ (Веремей, Сотникова, 2016; James, 1957) показано, что маршруты их движения, оптимизированные с точки зрения критериев времени пути и расхода топлива, для конкретного прогноза погоды могут довольно сильно отличаться от прямолинейных (ортодромии). Тем более сказанное актуально для движения судов в ледовых условиях, где прокладка маршрута с максимальным использованием прогноза образования крупных устойчивых полыней, промоин и участков чистой воды или мелкобитого льда является принципиальным аспектом ледовой навигации. Во-вторых, непосредственно в ходе имитации перемещения модельного образа судна как агента по траектории выбранного маршрута его актуальные параметры движения (максимально возможная и экономичная скорость, расход топлива и т.д.) определяются как функция текущих условий окружающей среды.

Важно отметить, что в задачах тактического планирования и маршрутизации часто имеет смысл ориентироваться на усредненные или характерные значения параметров метеорологической и ледовой обстановки. В то же время, при имитации движения модельных судов на вход модели скорее должны поступать аналоги текущих значений, характеризующиеся высокой степенью вариабельности и стохастичности, свойственной реальной погоде. Однако в любом случае соответствующие климатические или погодные параметры должны иметь пространственную или географическую привязку.

В текущей версии разработанного в Крыловском Научном Центре комплекса программных решений для имитационного моделирования морских транспортных систем используется следующая структура информационного обеспечения модели пространственно-распределенными параметрами внешней среды:

- Технология доступа к географически-привязанной информации о ветро-волновых и ледовых условиях основана на общих принципах работы с Географическими Информационными Системами и реляционными базами данных. При этом все таблицы атрибутивной информации (климат, волновые условия, ледовые условия и т.д.) сведены в единую структуру, хотя для каждого информационного домена используется свой принцип выделения характерных географических регионов. Так, области условно-постоянных климатических параметров для условий ветра и волнения представляют собой крупные характерные зоны мирового

океана, соответствующие устоявшемуся разделению, принятому, например, в справочнике Государственного Регистра Судоходства «Ветер и волны в океанах и морях» (Ветер и волны..., 1974). Напротив, геоинформационная привязка данных о ледовых условиях организована по принципу регулярной широтно-долготной сетки. Все пространство арктической зоны России (с 60° с.ш. по 83° с.ш. и с 10° в.д. по 18° з.д.) разбито на элементарные ячейки со стороной 0.25 градуса, к каждой из которых привязываются все характерные параметры. Хотя при таком подходе ячейки, расположенные ближе к полюсу, имеют меньший размер, но регулярность разбиения сеточной области по широте-долготе позволяет однозначно определить текущую рабочую ячейку по ее единственному целочисленному ключевому идентификатору при сквозной нумерации. Это обеспечивает быстрое и эффективное получения сведений из базы данных по текущим координатам при работе имитационной модели.

- Составной ключ информационной записи о наборе характерных значений параметров содержит сведения как о географической привязке (идентификатор полигона для ветро-волновых условий и номера строки/столбца ячейки сетки для ледовых условий), так и о дополнительных ключевых характеристиках, описывающих временную изменчивость. Таким образом, в базе данных хранится характерная картина ледовой обстановки, отражающая как внутрисезонную так и межсезонную вариабельность возможных условий. Соответствующие данные подготовлены специалистами Арктического и антарктического института на основе анализа множественных источников экспедиционных наблюдений и ледовых карт методом выделения представительных годов-аналогов, отвечающих соответствующим квантилям эмпирических распределений.
- В качестве параметров, описывающих характерные ветроволновые условия конкретной пространственно-временной локализации, в модели движения используются два взаимосвязанных показателя – скорость ветра и значительная высота волнения. Статистическое распределение ветровой составляющей дается в форме частотной таблицы повторяемости выделенных интервалов скорости по направлениям (восемь основных румбов). В свою очередь, для описания распределения значительной высоты волнения используется аналогичная таблица частот в зависимости от интервалов скорости ветра. Таким образом, теоретические распределения вероятностей и для вектора скорости и для пары значений «сила ветра – высота волнения» описываются в виде двумерных гистограмм.

Как было отмечено выше, при решении задач тактического планирования, например, ледового рутинга судов, хранящиеся в базе данных усредненные характеристики могут быть использованы напрямую. Их совокупное влияние на движение моделируемого судна может быть выражено в терминах интегрального показателя – его максимально достижимой скорости в каждой географической ячейке. А оптимальный маршрут перемещения в полученном

поле с точки зрения произвольного выбранного критерия и с учетом возможного привлечения ледокола может быть получен с помощью оригинального метода оптимизации на «двухслойной» пространственной сетке (Топаж и др., 2015б). Пример подобного оптимального маршрута приведен на рис. 2, где наглядно демонстрируется стремление модельного судна максимально использовать участки акватории с наиболее благоприятной ледовой обстановкой.

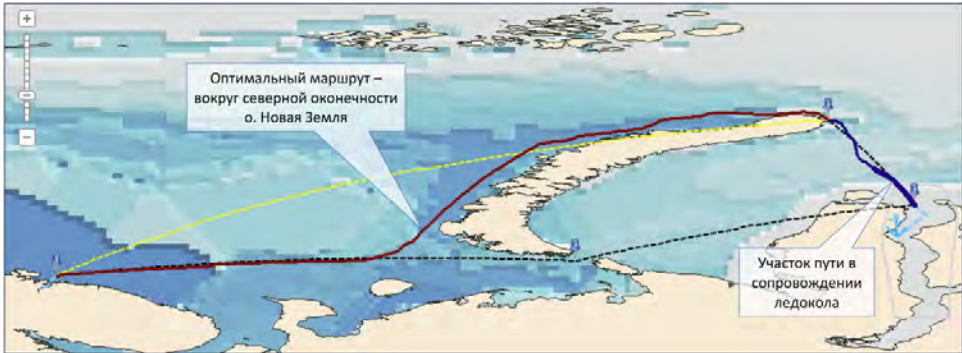


Рисунок 2. Использование данных о характерных параметрах ледовой обстановки (тяжелые ледовые условия, май) для определения оптимального маршрута

Напротив, при имитации перемещения судна в динамически изменяющейся окружающей среде, усредненные климатические параметры должны использоваться в качестве неких опорных величин в процедуре стохастического моделирования текущих значений соответствующих элементов. При этом особую важность имеют два соображения: обеспечение логической связности получаемых результатов и эффективность взаимодействия имитационной модели и базы данных. Первое означает, что алгоритм стохастического моделирования должен поддерживать временные и пространственные связи внутри порождаемых им сценариев развития модельной погоды. Иными словами, два последовательных (с небольшим временным интервалом между ними) запроса текущей погоды в двух близкорасположенных точках должны давать близкие результаты. Второе требование имеет скорее технический характер и заключается в следующем. Так как объем информации, хранящейся в базе климатических характеристик, достаточно велик, то соображения быстродействия и минимизации вычислительных ресурсов требуют свести к минимуму количество обращений к базе данных (разовых SQL-запросов). Это означает, что если запись для конкретного кортежа ключевых характеристик (регион, месяц, тяжесть условий) была единожды прочитана, то ее необходимо запомнить, и в момент, когда эта же информация потребуется, например, в ходе расчета параметров движения другого судна, она не должна заново запрашиваться из внешнего хранилища (базы данных). То же верно и для динамических значений актуальных погодных параметров, сгенерированных согласно этим статистическим показателям. Для обеспечения эффективности поддержки имитационной модели метеорологическими данными в описываемом решении используется схема «двойного кэширования» оперативной информации. Реализованный алгоритм обладает высокой вычис-

лительной эффективностью, так как с одной стороны не требует выделения неоправданно больших ресурсов оперативной памяти (система «помнит» только данные для «нужных» регионов – тех, где реально осуществляется движение судов), а, с другой стороны, обеспечивает обращение к вычислительным процедурам стохастического генератора погоды и запросы к внешней базе данных климатических параметров лишь тогда, когда это действительно необходимо.

В текущей версии комплексной имитационной модели генерация текущих погодных характеристик по климатическим параметрам конкретного пространственно-временного компартмента 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. А генерация набора показателей ледовой обстановки (толщины и сплоченности льдов различных возрастных категорий, заснеженность, торосистость и т.д.) состоит в простом выборе случайного числа из соответствующего характерного диапазона значений. Нетрудно заметить, что подобный алгоритм статистического моделирования погодных условий ни в коей мере не поддерживает автокорреляционные и лишь в минимальной степени кросскорреляционные свойства реальной погоды как случайного процесса. Иными словами, для конкретной географической точки погода в завтрашний день генерируется совершенно независимо от величины метеорологических характеристик, принятых для предыдущего дня. Аналогично, практически все показатели в текущий день моделируются независимо друг от друга (исключение составляет учет зависимости направления ветра и высоты волн от скорости ветра), а также без учета модельных значений аналогичных величин в соседних пространственных расположениях. Подобное упрощение может быть допустимо в задачах приблизительной оценки интегральных показателей функционирования имитируемых систем на длительных периодах расчета. Но для решения задач оперативного мониторинга и получения более адекватных оценок и потенциальных рисков в реальных условиях необходим переход к использованию полноценных «пространственно-временных» генераторов морской погоды.

Дискуссия

Важной особенностью характеристик ледяного покрова является их временная и пространственная связанность. Описанный в первой части статьи метод стохастического генератора необходимо адаптировать для моделирования временной изменчивости метеорологических и ледовых полей. Ниже кратко перечислены перспективные соображения о возможных методах и подходах, которые предполагается использовать в соответствующих исследованиях, проводимых совместно специалистами Крыловского научного центра и Арктического института.

При создании «пространственно-временного» генератора достаточно огра-

ничиться двумя метеорологическими полями – температура воздуха и атмосферное давление. Ветер и дрейф ледяного покрова, параметры волнения, можно рассчитать исходя из принятых геострофических соотношений, с заданием определенных корректирующих эмпирических коэффициентов, зависящих от географического положения и сезона.

Наиболее сложная задача – пространственно-временное моделирование полей характеристик ледяного покрова. Ледяной покров, в отличие от полей атмосферного давления и температуры воздуха, обладает разрывами и сложной пространственной структурой: для него характерно наличие кромки, границ между ледяными массивами различного генезиса, границ положения пространственно однородных ледовых зон. Очевидно, что эта сложная структура должна быть отражена в моделируемом случайном поле. Для этого необходимо определить географически привязанные статистические характеристики размеров пространственно однородных ледовых зон (такие оценки можно получить, например, проанализировав массив ледовых карт ААНИИ за последнее десятилетие). 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 генерируются параметры ледяного покрова, затем полученное случайное поле либо сглаживается фильтром, либо аппроксимируется двумерными полиномиальными функциями. Параметры сглаживающего фильтра и коэффициенты функций зависят от характеристик размеров ледовых зон. Другой способ – сначала внутри моделируемого поля по характеристикам размеров однородных зон выделяются подобласти, в которых по осредненным функциям распределений методом Монте-Карло генерируется общая для всей подобласти характеристика ледяного покрова. Возможна также комбинация указанных подходов и применение других методов моделирования случайных полей.

Наконец, современный уровень развития средств коммуникации и распределенных вычислительных ресурсов позволяют говорить о том, что уже в скором будущем можно будет отказаться от необходимости реализации генерации виртуальной погоды как входного сигнала в рамках самой предметно-ориентированной имитационной модели. Вместо этого все необходимые данные о пространственно-временном распределении влияющих метеорологических параметров будут получаться непосредственно в ходе исполнения модели путем запросов к специализированным облачным Интернет-сервисам, предоставляющим эти сведения как результаты расчета внешних глобальных и региональных моделей атмосферы, океана и ледяного покрова. Уже сейчас существуют модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), результаты которых предоставляются в режиме реального времени заинтересованным пользователям. Например, информация о состоянии атмосферы свободно распространяется в проектах GFS (Global Forecast System) <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs> и ECMF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts) <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/catalogue-ecmwf-real-time-products>;

информация о состоянии океана и ледяного покрова доступна на сайте проекта RTOFS (Real Time Ocean Forecast System) <http://polar.ncser.noaa.gov/global>. Эти сервисы активно используются в практической навигации. В свою очередь, для получения представительного набора альтернативных сценариев можно воспользоваться сервисами портала IPCC, где представлено множество результатов имитации по различным моделям с учетом возможных климатических изменений.

Безусловно, здесь предстоит решить еще целый ряд организационных и технических вопросов: необходимо качественно повысить эффективность получения данных; разработать унифицированные форматы передачи; количество предрасчитанных сценариев может быть велико, но оно все равно останется конечным, а при подключении имитационной модели как внешнего клиента к погодному сервису в режиме online необходимо обеспечить выделение ей отдельного экземпляра работающей МОЦАО порождающего новый уникальный сценарий и т.д. Все перечисленное, скорее всего, потребует значительных усилий и временных затрат. Поэтому разработка и использование пространственных стохастических генераторов виртуальных погодных и ледовых условий выглядит на настоящий момент более реалистичным подходом. Соответствующие алгоритмы, основанные на теории динамического моделирования случайных полей, в последнее время появляются в метеорологических приложениях (Peleg et al., 2017; Tsyruльников, Gayfulin, 2017). Представляется, что расширение этих подходов в том числе на модели ледовой обстановки в полярных регионах тоже является делом недалекого будущего.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 17-79-20162).

Список литературы

Ботук Б.О. 1949. Очистка бытовых сточных вод. – Москва-Ленинград, Изд-во министерства коммунального хозяйства РСФСР, 304 с.

Веремей Е.И., Сотникова М.В. 2016. Алгоритмы оптимизации маршрутов движения с учетом погодных условий. – *International Journal of Open Information Technologies*, т. 4, № 3, с. 55-61.

Ветер и волны в океанах и морях: справочные данные. Регистр СССР. 1974. – Л., Транспорт, 360 с.

Голубятников Л.Л. 2004. Стохастическое моделирование величин ежедневных осадков и среднесуточных температур. – *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 40, № 5, с. 665-677.

Ермаков С.М., Михайлов Г.А. 1982. Статистическое моделирование. – М., Наука, 2-е изд., доп., 296 с.

Иванов Н.Е. 2004. О характеристиках корреляции скоростей ветра, морских течений и дрейфа льда. – Метеорология и гидрология, № 8, с. 61-72.

Овсиенко С.Н., Зацепа С.Н., Ивченко А.А. 2011. Математическое моделирование как элемент информационной поддержки принятия решения при выборе стратегии защиты морской среды от нефтяного загрязнения. – Труды ГОИН, Исследования морей и океанов, вып. 213. – М., Росгидромет, с. 396-406.

Рожков В.А., Смоляницкий В.М. 2007. Многомерный статистический анализ полей общей сплоченности морского льда северной полярной области. – Изв. РГО, т. 139, № 3, с. 22-31.

Становой В.В., Лавренов И.В., Неелов И.А. 2007. Система моделирования разливов нефти в ледовитых морях. – Проблемы Арктики и Антарктики, № 77, с. 7-16.

Таровик О.В., Топаж А.Г., Крестьянцев А.Б., Кондратенко А.А. 2017а. Моделирование систем арктического морского транспорта: основы междисциплинарного подхода и опыт практических работ. – Арктика: экология и экономика, № 1 (25), с. 86-101.

Таровик О.В., Топаж А.Г., Крестьянцев А.Б., Кондратенко А.А., Зайкин Д.А. 2017б. Комплексная имитационная модель морской транспортно-технологической системы платформы «Приразломная». – Арктика: экология и экономика, № 3 (27), с. 86-102.

Топаж А.Г. 1992. Моделирование суточных метеоданных как входного сигнала модели продукционного процесса. – В сб. науч. тр. «Почва и растение – процессы и модели». – СПб., АФИ, с. 79-86

Топаж А.Г., Таровик О.В., Косоротов А.В., Бахарев А.А. 2015а. Программный комплекс имитационного моделирования для проектирования и анализа морских транспортных систем. – В сб. трудов конференции: «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем – ИКМ МТМТС-2015». – Санкт-Петербург, с. 143-147.

Топаж А.Г., Бахарев А.А., Крестьянцев А.Б., Косоротов А.В., Таровик О.В. 2015б. Иерархия уровней принятия решений в имитационном моделировании морских перевозок. – В сб.: Имитационное моделирование. Теория и практика. Седьмая всероссийская научно-практическая конференция, труды конференции в 2-х томах /под общей редакцией С.Н. Васильева, Р.М. Юсупова. – Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, с. 34-39.

Шишков Ю. А. 1958. О нормальной линейной корреляции векторов. – Метеорология и гидрология, № 6, с. 55-58.

Coastal Engineering Manual (CEM). 2002. Engineer Manual 1110-2-1100. – U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. (6 volumes).

James R.W. 1957. Application of wave forecast to marine navigation. – Washington, D.C., US Navy Hydrographic Office, 78 p.

Leppäranta M. 2011. The drift of sea ice. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 350 p. Doi:10.1007/978-3-642-04683-4.

Maisiuk I., Gribkovskaia I. 2014. Fleet Sizing for Offshore Supply Vessels with Stochastic Sailing and Service Times. – 2nd International Conference on Information Technology and Quantitative Management (ITQM-2014), vol. 1, pp. 939-948.

Nikishova A.V., Kalyuzhnaya A.V., Boukhanovsky A.V., Khukstra A. 2017. Uncertainty quantification and sensitivity analysis applied to the wind wave model SWAN. – Environmental Modelling and Software, vol. 95, pp. 344-357.

Padman L., Erofeeva S.A. 2004. Barotropic inverse tidal model for the Arctic Ocean. – Geophysical Research Letters, vol. 31, No. 2, pp. 383-392, L02303. Doi:10.1029/2003GL019003.

Peleg N., Fatichi S., Paschalis A., Molnar P., Burlando P. 2017. An advanced stochastic weather generator for simulating 2-D high-resolution climate variables. – Journal of Advanced Modeling Earth System, vol. 9, pp. 1595-1627. Doi:10.1002/2016MS000854.

Richardson C.W., Wright D.A. 1984. WGEN: A model for generating daily weather variables. – US Dept. Agric., Agricultural Research Service, Publ. ARS-8.

Semenov M.A., Brooks R.J., Barrow E.M., Richardson C.W. 1998. Comparison of WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. – Climate Researches, vol. 10, pp. 95-107.

Tsyrlunikov M., Gayfulin D. 2017. A limited-area spatio-temporal stochastic pattern generator for simulation of uncertainties in ensemble applications. – Meteorologische Zeitschrift, vol. 26, No. 5, pp 549-566.

References

Botuk B.O. 1949. *Ochistka bytovykh stochnykh vod* [Wastewater treatment]. Moscow-Leningrad, 304 p.

Veremei E.I., Sotnikova M.V. 2016. Algoritmy optimizatsii marshrutov dvizheniia s uchetom pogodnykh uslovii [Algorithms for optimizing traffic routes taking into account weather conditions]. *International Journal of Open Information Technologies*, vol. 4, no. 3, pp. 55-61.

Veter i volny v okeanakh i moriakh: spravochnye dannye. Registr SSSR [Wind and waves in the oceans and seas: reference data. Register of the USSR]. 1974. Leningrad, 360 p.

Golubiatnikov L.L. 2004. Stokhasticheskoe modelirovanie velichin ezhednevnykh osadkov i srednesutochnykh temperature [Stochastic modeling of the values of daily precipitation and average daily temperatures]. *Izvestiia RAN. Fizika atmosfery i okeana – Proc. of RAS. Physics of atmosphere and ocean*, vol. 40, no. 5, pp. 665-677.

Ermakov S.M., Mikhailov G.A. 1982. *Statisticheskoe modelirovanie* [Statistical modeling]. Moscow, 296 p.

Ivanov N.E. 2004. O kharakteristikakh korreliatsii skorostei vetra, morskikh techenii i dreifa l'da [On the characteristics of the correlation of wind speeds, sea currents and ice drift]. *Meteorologiya i gidrologiya – Meteorology and hydrology*, no. 8, pp. 61-72.

Ovsienko S.N., Zatsepa S.N., Ivchenko A.A. 2011. Matematicheskoe modelirovanie kak element informatsionnoi podderzhki priniatiia resheniia pri vybore strategii zashchity morskoi sredy ot neftianogo zagriazneniia [Mathematical modeling as an element of information support for decision-making when choosing a strategy for protecting the marine environment from oil pollution]. *Trudy gosudarstvennogo okeanograficheskogo institute. Issledovaniya morej i okeanov – Proceedings of the State Oceanographic Institute. Studies of the Seas and Oceans*, vol. 213, pp. 396-406.

Rozhkov V.A., Smolianitskii V.M. 2007. Mnogomernyi statisticheskii analiz polei obshchei splochnosti morskogo l'da severnoi poliarnoi oblasti [Multidimensional statistical analysis of the fields of general sea ice cohesion in the northern polar region]. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva – News of the Russian Geographical Society*, vol. 139, no. 3, pp. 22-31.

Stanovoi V.V., Lavrenov I.V., Neelov I.A. 2007. Sistema modelirovaniia razlivov nefti v ledovitykh moriakh [The simulation system of oil spills in ice seas]. *Problemy Arktiki i Antarktiki – Problems of the Arctic and Antarctic*, no. 77, pp. 7-16.

Tarovik O.V., Topazh A.G., Krest'iantsev A.B., Kondratenko A.A. 2017a. Modelirovanie sistem arkticheskogo morskogo transporta: osnovy mezhdistsiplinarnogo podkhoda i opyt prakticheskikh rabot [Modeling of systems of the Arctic sea transport: bases of the interdisciplinary approach and experience of practical works]. *Arktika: ekologiya i ekonomika – Arctic: ecology and economy*, no. 1 (25), pp. 86-101.

Tarovik O.V., Topazh A.G., Krest'iantsev A.B., Kondratenko A.A., Zaikin D.A. 2017b. Kompleksnaia imitatsionnaia model' morskoi transportno-tekhnologicheskoi sistemy platformy «Prirazlomnaia» [Complex simulation model of the sea transport-technological system of the Prirazlomnaya platform]. *Arktika: ekologiya i ekonomika – Arctic: ecology and economy*, no. 3 (27), pp. 86-102.

Topazh A.G. 1992. Modelirovanie sutochnykh meteodannykh kak vkhodnogo signala modeli produktsionnogo protsessa [Modeling of daily meteodata as an input signal of crop model]. *V sb.: «Pochva i rastenie – protsessy i modeli»* [In: «Soil and plant – processes and models»]. Saint-Petersburg, pp. 79-86.

Topazh A.G., Tarovik O.V., Kosorotov A.V., Bakharev A.A. 2015a. Programmnyi kompleks imitatsionnogo modelirovaniia dlia proektirovaniia i analiza morskikh transportnykh sistem [The program complex of simulation for the design and analysis of marine transport systems] *V sb. trudov konferentsii «Imitatsionnoe i kompleksnoe modelirovanie morskoi tekhniki i morskikh transportnykh sistem – IKM MTMTS-2015»* [In Proc. of «Simulation and Complex Modeling of Marine Equipment and Marine Transport Systems – IKM MTMTS-2015»]. Saint-Petersburg, pp. 143-147.

Topazh A.G., Bakharev A.A., Krest'iantsev A.B., Kosorotov A.V., Tarovik O.V. 2015. Ierarkhiia urovnei priniatii reshenii v imitatsionnom modelirovanii morskikh perevozok [Hierarchy of decision-making levels in simulation modeling of sea transportation]. V sb.: *Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriia i praktika. Sed'maia vs Rossiiskaia nauchno-prakticheskaja konferentsiia* [In: Proc of VII conf. «Simulation Modeling: Theory and praxis». Institute of Control Science V.A. Trapeznikova RAS Publ., pp. 34-39.

Shishkov Iu.A. 1958. O normal'noi lineinoi korreliatsii vektorov [On normal linear correlation of vectors]. *Meteorologiya i gidrologiya – Meteorology and hydrology*, no. 6. pp. 55-58.

Coastal Engineering Manual (CEM). 2002. Engineer Manual 1110-2-1100. – U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. (6 volumes).

James R.W. 1957. Application of wave forecast to marine navigation. – Washington, D.C., US Navy Hydrographic Office, 78 p.

Leppäranta M. 2011. The drift of sea ice. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 350 p. Doi:10.1007/978-3-642-04683-4.

Maisiuk I., Gribkovskaia I. 2014. Fleet Sizing for Offshore Supply Vessels with Stochastic Sailing and Service Times. – 2nd International Conference on Information Technology and Quantitative Management (ITQM-2014), vol. 1, pp. 939-948.

Nikishova A.V., Kalyuzhnaya A.V., Boukhanovsky A.V., Khukstra A. 2017. Uncertainty quantification and sensitivity analysis applied to the wind wave model SWAN. – *Environmental Modelling and Software*, vol. 95, pp. 344-357.

Padman L., Erofeeva S.A. 2004. Barotropic inverse tidal model for the Arctic Ocean. – *Geophysical Research Letters*, vol. 31, No. 2, pp. 383-392, L02303. Doi:10.1029/2003GL019003.

Peleg N., Fatichi S., Paschalis A., Molnar P., Burlando P. 2017. An advanced stochastic weather generator for simulating 2-D high-resolution climate variables. – *Journal of Advanced Modeling Earth System*, vol. 9, pp. 1595-1627. Doi:10.1002/2016MS000854.

Richardson C.W., Wright D.A. 1984. WGEN: A model for generating daily weather variables. – US Dept. Agric., Agricultural Research Service, Publ. ARS-8.

Semenov M.A., Brooks R.J., Barrow E.M., Richardson C.W. 1998. Comparison of WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. – *Climate Researches*, vol. 10, pp. 95-107.

Tsyulnikov M., Gayfulin D. 2017. A limited-area spatio-temporal stochastic pattern generator for simulation of uncertainties in ensemble applications. – *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 26, No. 5, pp 549-566.