

## НОВЫЕ АЛГОРИТМЫ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ЛЕДЯНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА НАДЕЖНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ СУДОВ ВО ЛЬДАХ

ст. науч. сотр В.Е. ФЕДЯКОВ, зав. лаб. С.В. ФРОЛОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: fedyakov@aari.nw.ru, svf@aari.ru

*В статье дано описание новых алгоритмов статистического моделирования вероятностных изменений показателей трудности плавания судов во льдах. Первый алгоритм используется при оперативной разработке навигационных рекомендаций и основан на расчете наиболее вероятных изменений затрат времени и средних скоростей движения при заданных характеристиках ледовых условий плавания. Второй алгоритм предназначен для расчета распределения характеристик трудности плавания при изучении климатической изменчивости состояния ледяного покрова на действующих либо перспективных трассах плавания в условиях ограниченного объема фактической информации.*

*Ключевые слова:* ледовые условия плавания, эксплуатационные характеристики, климатическая изменчивость, статистическое моделирование, метод Монте-Карло.

В начале 1980-х гг. в ААНИИ был разработан эмпирико-статистический метод количественной оценки трудности плавания во льдах, на основе которого была создана эмпирическая модель движения судна во льдах [Бузиев, 1982].

Ледовые условия в районе движения в модели трансформируются в условия плавания с учетом выявленных общих закономерностей, связанных с избирательным характером движения судна во льдах. Модель ориентирована на оценку средних показателей трудности плавания. С одной стороны, такой подход методологически оправдан и позволяет решать достаточно широкий круг задач как в оперативном плане при обеспечении судоходства, так и при изучении условий плавания на действующих и перспективных трассах. С другой – находится в некотором противоречии с весьма мозаичной картиной изменчивости характеристик ледяного покрова. Поэтому представляется перспективным использование полученных закономерностей для расчета возможных изменений показателей трудности плавания с помощью статистического моделирования.

Введение нового блока «Статистика» расширяет возможности модели, так как позволяет перейти на более качественную, вероятностную оценку риска движения судов во льдах, а также получать вероятностную картину распределения показателей трудности плавания в зависимости от возможных статистически значимых изменений отдельных характеристик ледяного покрова. Усовершенствованная таким образом модель позволяет производить расчет наиболее вероятных диапазонов изменений затрат времени и средних скоростей движения, когда ледовые условия плавания заданы (алгоритм 1), а также – расчет распределения характеристик трудности плавания при изучении климатической изменчивости состояния ледяного покрова в условиях ограниченного объема фактической информации (алгоритм 2).

### Алгоритм 1. Расчет наиболее вероятных диапазонов изменений затрат времени и средних скоростей движения при заданных ледовых условиях плавания

Для реализации алгоритма разработаны:

- программа, позволяющая формировать блок «Статистик», описывающий закономерности изменений ледовых условий плавания;
- программа статистического моделирования, которая преобразовывает файл исходных данных по установленным закономерностям;
- создан дополнительный модуль, позволяющий накапливать полученные результаты, сохранять и преобразовывать их в виде, удобном для дальнейшего анализа.

Схема взаимодействия программных блоков модели представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема расчета показателей трудности плавания судов во льдах.

*Программа* формирующая блок «Статистик» оформлена в виде электронного блокнота с возможностью «постраничного» просмотра и внесения необходимой корректуры, который состоит из четырех отдельных страниц со статистическими характеристиками параметров ледяного покрова.

*Страница 1* – протяженность однородных ледовых зон, которая задается путем выбора закона распределения – усеченного нормального или дискретного.

*Страница 2* – общая и частные сплоченности льда представляются в виде таблицы, где для основных градаций сплоченности прописаны их вероятностные изменения. При наличии двух и более возрастов вероятная сплоченность определяется для каждого возраста льда отдельно.

*Страница 3* – нарушения сплошности ледяного (НСЛ). Модель позволяет учитывать эту немаловажную для судоходства характеристику ледяного покрова на вероятностном уровне, не прибегая к искусственным приемам их описания. Возможные изменения горизонтальных размеров ледовых образований (форм льда) заданы в виде трех таблиц – дифференцированно по типу распределения НСЛ (типы «А», «В» и «D») [Frolov, Klyachkin, 1999].

*Страница 4* – толщина льда (в зависимости от возраста), торосистость и сжатия. В модели апробируются два варианта расчета толщины льда.

В первом варианте считается, что средняя *толщина* льда имеет равномерное распределение на интервале, равном:

$$\pm P_i \cdot H_n, \quad (1)$$

где  $P_i$  – коэффициент (вероятное отклонение, заданное в пределах от 0 до 1),  $H_n$  – заданная средняя толщина льда. Например, если  $H_n = 150$  см,  $P_i = 0,1$ , то, соответственно, при моделировании условий плавания будут использоваться толщины в интервале от 135 до 165 см.

Во втором варианте средние толщины льда имеют усеченное нормальное распределение на интервале, равном:

$$\pm K_i \cdot \sigma, \quad (2)$$

где  $K_i$  – коэффициент,  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение. Целесообразно оба коэффициента ( $P_i, K_i$ ) задавать отдельно для каждой из основных возрастных градаций ледяного покрова.

Возможные изменения *торосистости* льда представлены в табличном виде наподобие таблицы изменчивости сплоченности. Максимальная амплитуда этой характеристики задана в интервале  $\pm 1,5$  балла.

В модели выбор варианта счета регламентируется заданной *вероятностью сжатия*, которая распространяется только на расчет при условии движения судна в сплоченных льдах.

Для летнего периода дополнительно задается разрушенность ледяного покрова. В этом случае используется максимальная толщина льда на конец периода его нарастания.

Программа «Моделирование ледовых условий плавания» предусматривает чтение исходного файла данных, чтение разработанного для этой трассы файла статистик, задание числа «испытаний» и блок трансформации ледовых условий по заданным статистическим законам распределения (метод Монте-Карло [Соболь, 1968]).

В программе «Расчет показателей трудности плавания» задается тип судна (каравана судов) и время (месяц), к которому относятся данные ледовые условия. Вывод итоговых результатов оформлен в виде электронной таблицы MS Excel, что упрощает их дальнейший анализ.

Для иллюстрации работы всего комплекса описанных выше программ рассмотрим конкретный пример. Для этого задаются ледовые условия, которые реально могут иметь место на трассах СМП в весенний период навигации (табл. 1).

Таблица 1

**Пример распределения характеристик ледяного покрова на маршруте движения**

L, мили	К	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	Φ <sub>1</sub>	Φ <sub>2</sub>	Φ <sub>3</sub>	Φ <sub>4</sub>	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>	H <sub>4</sub>	Т, баллы
		Баллы								Сантиметры				
20	0													
120	2	6	3-4			2	3			150	80			2
100	3	1	3	6		3	4	4		160	80	60		2-3
50	1	8				2				100				3
40	4	0-1	4-5	2	3	5	4	3	3	350	140	60	30	2-3
40	3	4-5	1-2	3		4	2	3		140	60	30		2
40	3	2-3	1-2	3		2	3	4		130	65	25		3
40	1	8				4				50				0
12	2	6	3-4			3	2			160	80			2
10	3	1	3	6		3	3	4		150	85	70		2-3
5	1	8				2				100				3
4	4	0-1	4-5	2	3	5	4	3	3	350	140	50	30	2-3
4	3	4-5	1-2	3		4	2	3		160	50	30		2-3
4	3	2-3	1-2	3		2	3	3		140	60	30		3
4	1	8				4				50				0
12	2	6-7	3-4			0				150	80			2

Примечание: L – протяженности участков плавания; К – количество возрастных градаций льда (0 – чисто); C<sub>i</sub> – частная сплоченность; Φ<sub>i</sub> – формы льда (0 – припай, 1 – обширные поля, 2 – поля, 3 – поля и обломки, 4 – обломки и битый лед, 5 – крупно-мелкобитый лед; H<sub>i</sub> – толщина льда, Т – торосистость.

Таблица 2

## Итоговая расчетная таблица распределения характеристик трудности плавания

Леодокал «Арктика» (апрель)																	
Распределение протяженности пути по интервалам скорости движения																	
Скорость	>15	14-15	13-14	12-13	11-12	10-11	9-10	8-9	7-8	6-7	5-6	4-5	3-4	2-3	1-2	0,5-1	<0,5
$L_p$ , мили	69,5	36,7	53,5	81,1	71,5	45,5	59,9	43,7	25,5	14,0	3,9	0,1	0	0	0	0	0
$L/L_p$ , %	13,8	7,3	10,6	16,1	14,2	9,0	11,9	8,6	5,0	2,8	0,8	0	0	0	0	0	0
Min, мили	49,6	0	3,4	21,5	7,1	0	4,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Max, мили	104,0	95,2	129,3	164,6	142,5	123,4	133,6	109,3	85,7	50,6	24,3	9,8	9,6	0	0	0	0
$n$ , %	100	99	100	100	100	99,6	100	99,6	95,8	91,0	49,2	2,2	0,8	0	0	0	0
Протяженность трассы $L = 505$ миль, число испытаний = 500																	
Распределение средних скоростей движения																	
$V_{ср.}$	10,5	10,7	10,9	11,1	11,3	11,5	11,7										
$N$	2	38	118	196	123	21	2										
$n$ , %	0,4	7,6	23,6	39,2	24,6	4,2	0,4										
$P$ , % удары	3	2	1	1	1	1	1										
Караван а/л «Арктика» + «СА-15» (апрель)																	
Распределение протяженности пути по интервалам скорости движения																	
Скорость	>15	14-15	13-14	12-13	11-12	10-11	9-10	8-9	7-8	6-7	5-6	4-5	3-4	2-3	1-2	0,5-1	<0,5
$L_p$ , мили	20,0	6,7	42,8	36,3	48,9	67,8	56,4	37,4	94,2	58,2	18,5	9,7	7,3	0,7	0	0	0
$L/L_p$ , %	4,0	1,3	8,5	7,2	9,7	13,4	11,2	7,4	18,6	11,5	3,7	1,9	1,5	0,1	0	0	0
Min, мили	20,0	0	7,0	0	0	10,6	0	0	31,1	0	0	0	0	0	0	0	0
Max, мили	20,0	38,8	81,0	83,7	116,4	134,0	126,2	96,7	167,9	132,8	71,4	50,6	32,9	17,2	9,6	0	0
$n$ , %	100	55,4	100	98,8	99,6	100	99,8	98,2	100	99,8	87,8	71,8	65,8	11,4	0,8	0	0
Протяженность трассы $L = 505$ миль, число испытаний = 500																	
Распределение средних скоростей движения																	
$V_{ср.}$	8,1	8,3	8,5	8,7	8,9	9,1	9,3										
$N$	11	42	132	201	87	25	2										
$n$ , %	2,2	8,4	26,4	40,2	17,4	5,0	0,4										

Ледовые условия, представленные в табл. 1, были записаны в файл исходных данных. Далее, используя «Статистики», были смоделированы файлы для числа повторений 500, по которым выполнялся расчет для каравана в составе а/л «Арктика» и транспортного судно типа СА-15.

Результаты расчетов приведены в табл. 2. В верхней части таблицы располагаются расчетные данные для автономного движения ледокола, ниже – для каравана.

*Распределение протяженности пути по интервалам скорости движения:*

– скорость – интервалы скоростей движения в однородных ледовых зонах;

–  $L_i$  – средняя протяженность однородных ледовых зон;

–  $L_i/L$ , % – средняя протяженность однородных зон в процентах от общей протяженности трассы;

– Min, Max – минимальная и максимальная протяженность однородных участков с данным диапазоном скоростей;

–  $n$ , % – повторяемость диапазона скоростей в процентах от числа повторений.

*Распределение средних скоростей движения:*

–  $V_{cp}$  – средняя скорость движения по выбранной трассе;

–  $N$  – число случаев из общего числа повторений;

–  $n$ , % – число случаев, но в процентах от общего числа испытаний;

–  $P$  %, удары – среднее вероятное время работы набегами в процентах от суммарных затрат (рассчитывается только для автономного движения судов).

## **Алгоритм 2. Расчет распределения характеристик трудности плавания при изучении климатической изменчивости состояния ледяного покрова в условиях ограниченного объема фактической информации**

Основной задачей алгоритма является оценка климатической изменчивости трудности плавания судов во льдах с учетом «динамических» факторов, главные из которых – сжатия и нарушения сплошности ледяного покрова.

В модели учитываются сжатия интенсивностью 1 балл по следующим причинам. Во-первых, вероятность сжатий интенсивностью 0–1, 1 и 1–2 балла (среднее 1 балл) составляет более 80 % [Бузуев, Федяков, 1979]; во-вторых, как правило, при таких сжатиях современные транспортные суда ледового плавания и ледоколы продолжают сохранять устойчивое движение.

Основной причиной, вызывающей как сжатие, так и образование НСЛ, является неравномерность дрейфа ледяного покрова. Наибольший вклад в суммарный дрейф льда вносит ветер. Для учета ветровых потоков используются их укрупненные характеристики (типы) в зависимости от положения трассы по отношению к береговой черте. Обычно направление ветра дифференцируется на три типа: нажимной, отжимной и нейтральный [Бузуев и др., 1988].

Как показали исследования, сжатия в ледяном массиве могут проявляться при ветрах различных направлений, но вероятность их возникновения, продолжительность действия и интенсивность существенно различаются [Бузуев, Федяков, 1979; Bradford, 1972]. По данным [Воеводин, 1977], ось сжатия совпадает с направлением ветра с вероятностью 88 %, а наибольшие по протяженности и ширине каналы и разводья в массиве дрейфующих льдов образуются перпендикулярно генеральному направлению дрейфа [Горбунов, Лосев, 1975].

Для реализации алгоритма 2 были разработаны следующие программы.  
*Программа*, формирующая блок «Статистик» выполнена в виде двухстраничного электронного блокнота и позволяет задать необходимые характеристики для последующего моделирования ледовых условий на трасе плавания.

*Страница 1* содержит:

- название трассы, декаду и месяц (для идентификации файла статистик);
- распределение ветра по трем градациям – нажимной, отжимной и нейтральный;
- вероятность возникновения условий, предопределяющих сжатия льда для описанных выше направлений ветровых потоков;
- коэффициенты, учитывающие продолжительность действия сжатий;
- граничное значение протяженности трассы, где наиболее вероятно сохранение типа ветровых условий.

*Страница 2* содержит типы НСЛ, для которых заданы вероятность изменений форм льда и вероятность их реализации при отсутствии и наличии сжатий для ветров различных направлений.

*Программа формирования массива ледовых условий плавания* переработана с учетом необходимости ввода архива климатических характеристик условий плавания, что позволяет дополнять его новыми данными, а также редактировать.

*Программа «Моделирование ледовых условий плавания»* определяет тип ветра, наличие – отсутствие сжатий и тип НСЛ.

В программе *«Расчет показателей трудности плавания»* рассчитываются для каждого года – протяженность трассы; средние, максимальные и минимальные затраты времени и скорости движения, а также средняя протяженность трассы, затраты времени и скорость по всему ряду наблюдений.

Общая схема реализации алгоритма та же, что при алгоритме 1 (рис. 1).

Для проверки работы алгоритма 2 был выполнен тестовый расчет (табл. 3).

Таблица 3

Тестовый расчет климатических изменений условий плавания

Год	Ледокол «Ермак»							Караван л/к «Ермак» + д/э «Амгуема»						
	L, мили	T, сут.	T <sub>min</sub>	T <sub>max</sub>	V, узлы	V <sub>min</sub>	V <sub>max</sub>	L, мили	T, сут.	T <sub>min</sub>	T <sub>max</sub>	V, узлы	V <sub>min</sub>	V <sub>max</sub>
1979	527	2,8	2,6	2,9	7,8	7,6	8,4	527	4,6	4,1	4,8	4,8	4,6	5,3
1980	636	5,6	4,6	6,5	4,8	4,1	5,8	636	9,4	7,8	10,8	2,8	2,5	3,4
1981	573	5,1	3,7	5,8	4,8	4,1	6,4	573	9,0	6,3	10,6	2,7	2,3	3,8
1982	532	1,7	1,7	1,7	13,0	12,8	13,4	532	2,1	2,0	2,2	10,4	10,1	10,9
1983	558	4,5	4,0	4,7	5,2	4,9	5,8	558	7,8	6,9	8,4	3,0	2,8	3,4
1984	616	5,9	4,2	7,5	4,5	3,4	6,0	616	10,1	7,2	12,2	2,6	2,1	3,5
Среднее	574	4,2			6,7			574	7,2			4,4		

Полученные результаты тестирования разработанных алгоритмов для различных типов судов и ледоколов позволяют надеяться на перспективность выбранного направления при исследовании климатических изменений условий плавания, а также выборе оптимальных вариантов движения при планировании арктических морских транспортных операций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бузуев А.Я. Влияние природных условий на судоходство в замерзающих морях. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 200 с.
- Бузуев А.Я., Федяков В.Е. Вероятностная оценка повторяемости условий возникновения ветрового сжатия льда в зимний период // Труды ААНИИ. 1979. Т. 364. С. 70–74.
- Воеводин В.А. Особенности ветрового сжатия льда в Северном Ледовитом океане // Труды ААНИИ. 1977. Т. 354. С. 97–103.
- Горбунов Ю.А., Лосев С.М. Об исследовании разрывов в сплошном ледяном покрове по материалам радиолокационных съемок // Проблемы Арктики и Антарктики. 1975. № 46. С. 29–33.
- Соболь И.М. Метод Монте-Карло. М.: Наука, 1968. 64 с.
- Bradford J.D. Preliminary Report of the Observation Sea Ice Pressure and its Effect on Merchant Vessels under Icebreaker Escort // «Sea Ice», Proceedings of an International Conference, Reykjavik, Iceland, May 10–13, 1972. P. 241–245.
- Frolov S.V., Klyachkin S.V. The Influence Of Leads Orientation Relative To The General Ship (Icebreaker) Course Upon The Speed And Efficiency Of Ice Navigation // Proceedings of POAC'99, 15th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Condition, Helsinki, Finland, August 23–27. 1999. Espoo, 1999. Vol. 2. P. 561–567.

V.E.FEDYAKOV, S.V.FROLOV

### **THE NEW ALGORITHMS OF STATISTICAL MODELING TO DESCRIBE POSSIBLE CHANGES OF DIFFICULTIES APPEARED DURING THE ICE NAVIGATION ARE PRESENTED IN THE ARTICLE**

*One of them can be used to calculate the most possible and limits of the possible changes of time consumption and average ship speeds if some sea ice characteristics are determined. The second algorithm is developed to calculate distribution of parameters, characterized difficulties of ice navigation. This algorithm is used during the study of climate changeability of the ice cover along the present or perspective navigational routes if factual information is limited.*

*Key words:* conditions of ice navigation, exploitation parameters, climate changes, statistical modeling, Monte-Carlo method.