

## **МЕТОД ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ В ТАТАРСКОМ ПРОЛИВЕ, ОХОТСКОМ И БЕРИНГОВОМ МОРЯХ, ОСНОВАННЫЙ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

### **Введение**

В соответствии с Планом испытания и внедрения новых и усовершенствованных методов (технологий) гидрометеорологических прогнозов на 2017 г. в ФГБУ «Гидрометцентр России» были проведены оперативные испытания нового метода долгосрочного прогноза ледовых условий. В рамках развития данной технологии ранее были испытаны методы прогноза ледовых условий в Баренцевом, Белом, Азовском и Каспийском морях, Финском заливе. ЦМКП в 2011 и 2014 гг. одобрила результаты испытаний и рекомендовала включить данные методы в практику составления ледовых прогнозов в качестве основных. В 2017 году на обсуждение Центральной методической комиссии по прогнозам (ЦМКП) Росгидромета был вынесен последний фрагмент данной технологии – метод прогноза ряда ледовых характеристик на дальневосточных морях. Метод также был рекомендован для включения в практику составления ледовых прогнозов в качестве основного.

В качестве зависимых рядов данных для получения расчетных уравнений использовались наиболее полные ряды наблюдений за ледовыми характеристиками (различные по длине для разных ледовых характеристик: от 50 до 100 лет) до ледового сезона 2009/2010 гг. В качестве независимого ряда данных, принятого к испытаниям, использовались данные семи ледовых сезонов: с 2009/2010 по 2015/2016 гг.

В отделе морских прогнозов Гидрометцентра России составляется долгосрочный прогноз ледовых условий на российских морях на предстоящую зиму. Прогнозируется ряд характеристик по пунктам неарктических морей (в том числе Охотского моря, Татарского пролива, Берингова моря): сумма градусодней мороза (СГДМ); первое появление льда (ПП); максимальная за ледовый сезон средняя месячная ледовитость моря (МЛ); максимальная за

ледовый сезон толщина припайного льда (МТ); дата окончательного очищения моря ото льда (ОО); продолжительность ледового периода (ЛП).

Долгосрочный прогноз ледовых характеристик ежегодно в начале октября публикуется в бюллетене «Долгосрочный прогноз ледовых условий на неарктических морях на предстоящий ледовый сезон», который рассылается пользователям.

## 1. Используемые данные наблюдений

Информационной основой испытываемого метода долгосрочного прогноза ледовых условий на дальневосточных морях являются данные электронного архива метеорологической и ледовой информации, формируемого в лаборатории ледовых прогнозов Гидрометцентра России (табл. 1).

**Таблица 1.** Данные о периодах наблюдений за метеорологическими и ледовыми характеристиками, использованными при разработке метода прогноза

Море	Район моря или пункт наблюдений	Характеристика	Период наблюдений, годы	Число лет в периоде наблюдений	Пропуски данных в используемых периодах, %
Берингово море	Эгвекиноот	СГДМ	1937–2016	80	6
		ЛФ	1927–2016	90	22
		ТЛ	1936–2016	81	19
	Анадырь	СГДМ	1899–2016	118	8
		ЛФ	1926–2016	91	25
		ТЛ	1963–2016	54	24
	Петропавловск-Камчатский	СГДМ	1930–2016	87	0
	Петропавловский маяк	ЛФ	1910–2016	107	19
Все море	Л	1960–2016	57	0	
Охотское море	Магадан	СГДМ	1932–2016	85	0
		ЛФ	1929–2016	88	3
	Охотск	СГДМ	1926–2016	91	0
		ЛФ	1927–2016	90	2
	Аян	ТЛ	1934–2016	83	10
Все море	Л	1950–2016	67	1	
Японское море	Советская гавань	СГДМ	1911–2016	106	2
		ЛФ	1925–2016	92	3
		ТЛ	1929–2016	88	14
	Татарский пролив	Л	1951–2016	66	0
Среднее				87	8

*Примечание.* СГДМ – сумма градусодней мороза, ЛФ – ледовые фазы, ТЛ – толщина припайного льда, Л – ледовитость.

При разработке метода прогноза использовались:

– данные наблюдений за среднемесячной температурой воздуха у поверхности Земли на метеорологических станциях, характеризующей термическое состояние воздушных масс:

причерноморской (Ростов-на-Дону), сибирской (Иркутск), берингоморской (о. Беринга), воздушной массы Охотского моря (Александров-Сахалинский);

– данные наблюдений за приземным давлением в пунктах, расположенных в районах центров действия атмосферы (ЦДА): алеутского минимума (о. Беринга), сибирского максимума (Иркутск), исландского минимума (Рейкьявик) и азорского максимума (Понта-Делгада);

– таблицы дат наступления ледовых фаз, продолжительности ледовых периодов и толщин припайного льда, составленные по данным наблюдений морских гидрометеорологических станций (ГМС); информация о рядах наблюдений приведена в табл. 1;

– таблицы ледовитости дальневосточных морей; информация о рядах наблюдений приведена в табл. 1.

Длина рядов данных о параметрах всех центров действия атмосферы и термическом состоянии воздушных масс составляет 120 лет, за исключением алеутского минимума, для которого удалось найти данные лишь с 1910 года (длина ряда составляет 107 лет).

В рядах метеорологических и ледовых характеристик, информация о которых приводится в табл. 1, имеются пропуски. При разработке метода принимались во внимание только те ряды, для которых количество пропусков не превышает 25 % ряда.

## **2. Технология долгосрочного прогноза**

Испытанный метод является физико-статистическим методом, опирающимся на предположение о преемственности и цикличности процессов, происходящих в природе [1, 2]. Ледовые процессы на всех морях связаны со спецификой макроциркуляционных атмосферных процессов [3], которые, в свою очередь, зависят от состояния центров действия атмосферы в месяцы, предшествующие ледовому сезону [4, 6–8].

В основу методики прогноза заложено предположение о том, что на будущую суровость зимы и значения ледовых характеристик в любом порту европейской части России влияют состояние, интенсивность и взаимодействие крупных термобарических атмосферных структур; положение пункта прогноза относительно центров этих структур; наличие накладывающихся друг на друга циклов, определяемых внешним (космическим) воздействием.

Общие принципы составления долгосрочного прогноза для неарктических морей подробно изложены в ряде источников [5, 9–14]. Технология прогноза представляет собой ансамблевый метод, включающий три компонента для расчета ледовых параметров.

1. Расчет по уравнениям множественной корреляции на основе использования поля приземной температуры воздуха над евроатлантическим сектором.

2. Расчет по уравнениям множественной корреляции на основе использования характеристик поля приземного давления над евроатлантическим сектором.

3. Разложение кривых хода межгодовой изменчивости ледовых параметров на гармонические составляющие с последующей экстраполяцией их сумм на предстоящий ледовый сезон.

В окончательном прогнозе ледовых характеристик учитывается вклад каждого из трех компонентов. Величина этого вклада в общий результат пропорциональна обеспеченности расчета в рамках каждого компонента. При разработке метода прогноза для дальневосточных морей исследовалась связь характеристик ледового режима этих морей с параметрами атмосферных процессов:

– среднемесячными значениями приземной температуры воздуха, характеризующими причерноморскую, сибирскую, берингоморскую воздушные массы и воздушную массу Охотского моря, а также разностями этой температуры на фиксированных створах  $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$ ,  $\Delta T_3$  (см. табл. 2);

– среднемесячными значениями приземного давления в центрах действия атмосферы и разностями этих значений на фиксированных створах  $\Delta P_1$ ,  $\Delta P_2$ ,  $\Delta P_3$  (см. табл. 2).

Корреляционный анализ осуществлялся по данным девяти месяцев, предшествующих ледовому сезону (с января по сентябрь включительно). Ограничение набора предикторов данными за сентябрь было определено тем, что результаты прогноза публикуются в бюллетене в начале октября. По результатам анализа были выбраны наиболее значимые предикторы, которые и вошли в уравнения.

Набор предикторов, использованный для ледового прогноза в дальневосточных морях, отличается от предикторов, выбранных ранее для европейских морей [11–13]. В расчет добавлены данные о давлении в районе о. Беринга (характеризующем состояние алеутского минимума) и температуре в районе о. Беринга и Александра-Сахалинского, характеризующей термическое состояние Берингоморской воздушной массы и воздушной массы Охотского моря. Выбор именно этих ГМС определяется в значительной мере длиной имеющихся рядов наблюдений, которая по условию разработки прогноза должна составлять не менее 100 лет. Таких рядов в районе дальневосточных морей крайне мало.

Уравнения для всех пунктов имеют аналогичный вид, отличаясь весовыми коэффициентами. Число весовых коэффициентов, отличных от нуля, в каждом уравнении не превышает 20 % ряда рассчитываемой ледовой характеристики. Линейное корреляционное уравнение имеет вид:

$$y = A_i (B_1 x_1 + B_2 x_2 + \dots + B_n x_n) + C_i, \quad (1)$$

где  $B_1, B_2, \dots, B_n$  – весовые коэффициенты;  $A_i$  и  $C_i$ , – коэффициенты в линейном уравнении для  $i$ -го элемента ледового режима (номер года, сумма градусодней мороза, дата начала ледообразования, максимальная за ледовый сезон ледовитость моря, максимальная за ледовый сезон толщина льда, дата очищения моря ото льда).

В табл. 2 приведены предикторы ( $x$ ) для расчета ледовых характеристик по полям приземной температуры и приземного давления.

**Таблица 2.** Предикторы ( $x$ ), характеризующие поля приземной температуры (ППТ) и приземного давления (ППД) в уравнениях расчета ледовых характеристик для дальневосточных морей

Объект ППТ	$x$ для ППТ	Объект ППД	$x$ для ППД
Номер года	$N_G$	Номер года	$N_G$
Причерноморская воздушная масса	$T_P$	Исландский минимум	$P_i$
Сибирская воздушная масса	$T_{Ир}$	Сибирский максимум	$P_c$
Берингоморская воздушная масса	$T_B$	Азорский максимум	$P_{аз}$
Воздушная масса Охотского моря	$T_{АСх}$	Алеутский минимум	$P_{ал}$
Зональный градиент температуры ( $\Delta T_1$ )	$T_{Ир} - T_{АСх}$	Зональный градиент давления ( $\Delta P_1$ )	$P_c - P_i$
Зональный градиент температуры ( $\Delta T_2$ )	$T_{Ир} - (T_{АСх} + T_B)/2$	Зональный градиент давления ( $\Delta P_2$ )	$P_i - P_{ал}$
Меридиональный градиент температуры ( $\Delta T_3$ )	$T_{АСх} - T_B$	Меридиональный градиент давления ( $\Delta P_3$ )	$P_{аз} - P_i$

*Примечание.* Предикторы:

- среднемесячная приземная температура воздуха в пункте, характеризующем теплозапас воздушной массы:  $T_P$  – в Ростове-на-Дону,  $T_{Ир}$  – в Иркутске,  $T_B$  – на о. Беринга,  $T_{АСх}$  – в Александрове Сахалинском;
- приземное давление в районе соответствующего центра действия атмосферы:  $P_i$  – в Рейкьявике,  $P_c$  – в Иркутске,  $P_{аз}$  – в Понта-Делгада,  $P_{ал}$  – на о. Беринга.

Для третьего компонента прогноза было сделано предположение, что в пределах обширных территорий планетарного масштаба изменчивость природных явлений должна быть подвержена влиянию тех же циклов (являющиеся вероятно результатом внешнего гравитационного воздействия), параметры которых были использованы ранее для прогноза ледовых условий в европейских морях России. Периоды циклов определялись по ряду приземной температуры воздуха в Санкт-Петербурге, для которого имеется наибольшее число наблюдений. Разложению на гармоники подвергался 200-летний ряд отклонений СГДМ от генерального тренда (с ледового сезона 1805/1806 гг. по сезон 2004/2005 гг.) При этом генеральный тренд также описывался длиннопериодной гармоникой, наиболее близко

соответствующей полиномиальному тренду 2-го порядка [11, 13]. После 2005 года прошло более 10 лет, и мы имеем возможность оценить устойчивость работы гармоник. В табл. 3 приведены параметры для 31 гармоник, сумма которых аппроксимирует СГДМ в Санкт-Петербурге, а также коэффициенты корреляции ( $r$ ) для ряда, оканчивающегося в 2005 году, и для ряда, оканчивающегося в 2016 году. Для первого ряда средний коэффициент корреляции равен 0,14, суммарный – 0,80, для второго ряда средний коэффициент корреляции равен 0,13, суммарный – 0,78. Анализ табл. 3 свидетельствует о низкой устойчивости гармоник с малыми значениями частных коэффициентов корреляции (до 0,1 включительно), в то время как более значимые гармоники в целом сохранили свои позиции.

**Таблица 3.** Периоды гармоник ( $\Delta t$ ) и коэффициенты корреляции ( $r$ ) для гармоник

№ гармоники	$\Delta t$ , годы	$r$ на 2005 г.	$r$ на 2016 г.	№ гармоники	$\Delta t$ , годы	$r$ на 2005 г.	$r$ на 2016 г.
1 (ген. тренд)	1008,80	0,40	0,44	16	5,30	0,13	0,13
				17	5,05	0,16	0,14
2	173,93	0,07	0,08	18	4,92	0,14	0,15
3	84,07	0,12	0,11	19	4,66	0,10	0,10
4	25,47	0,10	0,07	20	4,37	0,13	0,12
5	21,74	0,18	0,18	21	4,23	0,10	0,10
6	18,14	0,10	0,05	22	3,94	0,18	0,18
7	13,56	0,10	0,10	23	3,38	0,13	0,14
8	12,67	0,11	0,10	24	3,08	0,17	0,17
9	11,21	0,14	0,14	25	2,83	0,14	0,15
10	9,78	0,17	0,13	26	2,69	0,10	0,10
11	9,27	0,18	0,16	27	2,59	0,12	0,12
12	7,84	0,20	0,21	28	2,40	0,17	0,18
13	7,57	0,05	0,05	29	2,34	0,12	0,12
14	6,48	0,07	0,11	30	2,26	0,24	0,22
15	5,65	0,10	0,07	31	2,03	0,18	0,18
<b>Суммарный коэффициент корреляции <math>r</math></b>						<b>0,80</b>	<b>0,78</b>

В [13] было показано, что для европейских морей коэффициенты корреляции между рядами значений, рассчитанных по суммам гармоник, и соответствующими рядами фактических значений (для разных ледовых характеристик и пунктов) варьируют от 0,6 до 0,8. Было также обращено внимание на близость периодов отдельных найденных гармоник с периодами колебания гравитационных воздействий (орбитальных периодов) Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна, а также с основными циклами солнечной активности.

В [14] показано, что коэффициенты корреляции между рядами значений, рассчитанных по суммам гармоник, и соответствующими рядами фактических значений для разных ледовых характеристик и пунктов Татарского пролива, Берингова и Охотского морей варьируют от 0,5 до 0,8. Эти значения близки к данным для европейских морей, что свидетельствует о возможности применения единых гармоник для европейских и азиатских морей.

В табл. 5 и 6 приведены результаты расчетов ледовых характеристик по зависимому ряду и независимому 7-летнему ряду (с ледового сезона 2009/2010 гг. по сезон 2015/2016 гг.) для дальневосточных морей.

**Таблица 5.** Результаты расчета ледовых характеристик по зависимому (З) и независимому (Н) рядам для Берингова моря

Характеристика	Пункт, район моря	ОБ метода, %	ОБ климатическая, %	ЭФ (З), %	ЭФ (Н), %
СГДМ	Э	88	67	21	71
	АН	79	67	12	71
	ПК	89	66	23	57
ПП	Э	94	75	19	14
	АН	91	76	15	29
	ПМ	83	69	14	14
ОО	Э	97	68	29	71
	А	98	70	28	57
	ПМ	90	73	17	14
ЛП	Э	93	69	24	57
	АН	93	77	16	71
	ПМ	89	74	15	0
МТ	Э	93	66	27	57
	АН	91	65	26	29
МЛ	БМ	98	70	28	0
<b>Среднее</b>		<b>91</b>	<b>70</b>	<b>21</b>	<b>40</b>

*Примечание.* ОБ – обеспеченность, ЭФ - эффективность; Э – Эгвекинот, АН – Анадырь, ПК – Петропавловск Камчатский, ПМ – Петропавловский маяк, БМ – Берингово море.

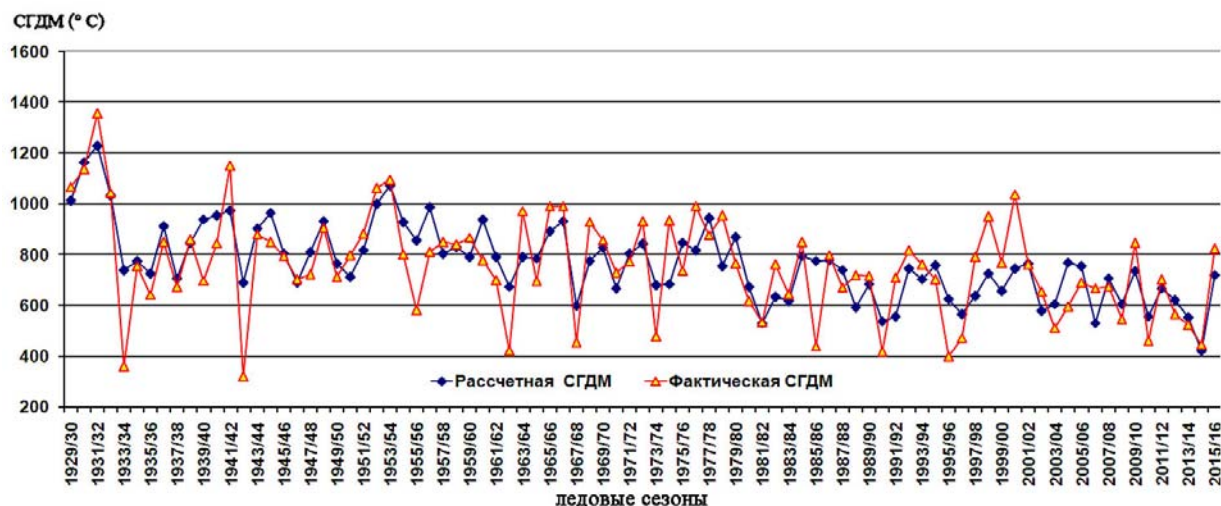
123

**Таблица 6.** Результаты расчета ледовых характеристик по зависимому (З) и независимому (Н) рядам для Охотского моря и Татарского пролива

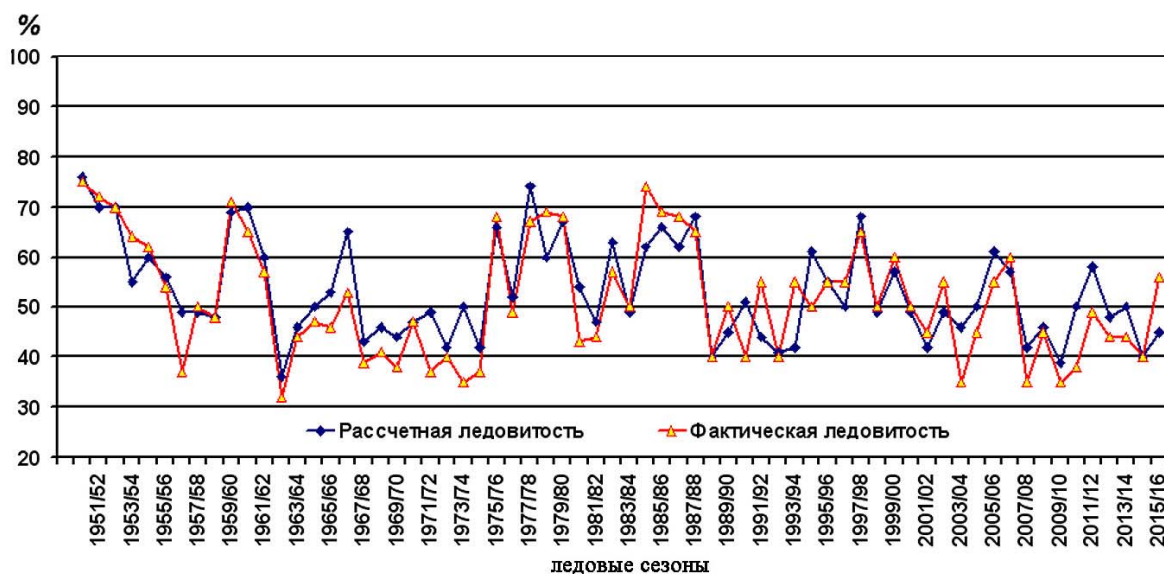
Характеристика	Пункт, район моря	ОБ метода, %	ОБ климатическая, %	ЭФ (З), %	ЭФ (Н), %
СГДМ	М	91	68	23	57
	О	86	69	17	71
	СГ	89	68	21	29
ПП	М	92	66	26	29
	О	92	79	13	0
	СГ	90	66	24	0
ОО	М	91	72	19	71
	О	89	58	31	71
	СГ	93	69	24	0
ЛП	М	94	72	22	43
	О	87	60	27	43
	СГ	91	65	26	0
МТ	АЯ	91	73	18	29
	СГ	92	75	17	0
МЛ	ОМ	97	66	31	43
	ТП	97	62	35	14
<b>Среднее</b>		<b>91</b>	<b>68</b>	<b>23</b>	<b>31</b>

*Примечание.* ОБ – обеспеченность, ЭФ - эффективность; М – Магадан, О – Охотск, АЯ – Аян, СГ – Советская гавань; ОМ – Охотское море, ТП – Татарский пролив.

Расчеты ледовых характеристик по зависимому и независимому рядам дали удовлетворительные результаты. Средняя эффективность метода по зависимому ряду по всем элементам ледового режима и пунктам составила 22 %, по независимому 7-летнему ряду – 35 %. На рис. 1 и 2 для примера представлены результаты расчета некоторых ледовых характеристик.



**Рис. 1.** Расчет СГДМ в Петропавловске-Камчатском по зависимому (1930–2009 гг.) и независимому (2010–2016 гг.) рядам.



**Рис. 2.** Расчет максимальной за ледовый сезон ледовитости Татарского пролива по зависимому (1951–2009 гг.) и независимому (2010–2016 гг.) рядам.

### Заключение

1. Расчет ледовых характеристик дальневосточных морей ансамблевым методом по зависимому и независимому рядам дали удовлетворительный результат.

2. Средняя для всех пунктов эффективность метода по зависимым рядам составляет для элементов ледового режима восточных морей:

- СГДМ – 20 % при обеспеченности 87 %;
- ПП – 19 % при обеспеченности 90 %;
- ОО – 25 % при обеспеченности 93 %;
- ЛП – 21 % при обеспеченности 91 %;
- МЛ – 31 % при обеспеченности 97 %;
- МТ – 23 % при обеспеченности 93 %.

3. Эффективность прогноза для восточных морей по независимому 7-летнему ряду составляет в среднем 35 %.

Поскольку единый принцип прогнозирования в настоящее время применяется для всех российских неарктических морей, было проведено аналогичное комплексное испытание методики для всех европейских и азиатских морей (Баренцево и Белое моря, Финский залив, Азовское море, Северный Каспий, Берингово и Охотское море, Татарский пролив).

Средняя эффективность расчетов по ряду до сезона 2009/2010 гг. включительно составила для всех этих морей 23 %. Средняя эффективность прогнозов по 7-летнему ряду составила 33 %.

Анализ базы предикторов, приведенных в [14], показал, что:

– наибольшее влияние на ледовые условия дальневосточных морей в предстоящую зиму оказывает состояние поля приземной температуры в мае – июле, поля приземного давления – в июле-августе;

– подтвердилось ожидаемое большое влияние на ледовые условия дальневосточных морей в предстоящую зиму летнего давления в районе Сибирского максимума, которое, однако, не превысило суммарного влияния Азорского максимума и Исландского минимума, что свидетельствует о действии дальних связей, а также о единстве термобарических процессов в планетарном масштабе;

– влияние давления в районе Алеутского минимума оказалось наименее существенным по сравнению с районами других центров действия атмосферы, зато очень высоким оказалось влияние температуры воздуха в этом районе.

### Список литературы

1. Абузяров З.К., Думанская И.О., Нестеров Е.С. Оперативное океанографическое обслуживание. – Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009. – 286 с.

2. Абузяров З.К., Кудрявая К.И., Серяков Е.И., Скриптунова Л.И. Морские прогнозы. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 320 с.

3. *Гудкович З.М., Кириллов А.А., Ковалев Е.Г. и др.* Основы методики долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 348 с.
4. *Думанская И.О.* Зависимость ледовитости Белого моря от макроциркуляционных атмосферных процессов // Труды Гидрометцентра России. – 2004. – Вып. 339. – С. 55–63.
5. *Думанская И.О.* Методика долгосрочного прогноза ледовых условий на европейских морях России // – Метеоспектр. – 2009. – № 4. – С. 88–96.
6. *Думанская И.О.* Оценка возможности использования вероятностных характеристик дрейфующего льда и численной модели перераспределения льда в Белом море для гидрометеорологического обеспечения морских транспортных операций в условиях климатических изменений // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2007. – № 77. – С. 128–142.
7. *Думанская И.О., Котилевская А.М.* Оценка возможности использования в современной практике ледового обслуживания мореплавания прогностических методик XX века на неарктических морях России // Труды Гидрометцентра России. – 2009. – Вып. 343. – С. 67–88.
8. *Думанская И.О.* Анализ влияния центров действия атмосферы на характер зим на морях европейской части России // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 345. – С. 56–82.
9. *Думанская И.О.* Метод долгосрочного прогноза ледовых условий на Белом и Азовском морях // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 345. – С. 83–104.
10. *Думанская И.О.* О методике долгосрочного прогноза ледовых условий на европейских морях России // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 11 – С. 64–76.
11. *Думанская И.О.* Метод долгосрочного прогноза ледовых условий на Белом и Азовском морях, основанный на использовании статистического моделирования // Информационный сборник № 40 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2013. – С. 41–63.
12. *Думанская И.О.* Метод долгосрочного прогноза ледовых условий в Баренцевом море, Финском заливе и в северной части Каспийского моря, основанный на использовании статистического моделирования// Информационный сборник № 42. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2015. – С.111-128.
13. *Думанская И.О.* Ледовые условия морей европейской части России. М.: ИГ-СОЦИН, 2014. – 605 с.
14. *Думанская И.О.* Методика долгосрочного прогноза ледовых условий дальневосточных морей // Труды Гидрометцентра России. – 2016. – Вып. 362. – С. 109–128.