

УДК 551.326.12.+551.326.03 (268.45)

Метод долгосрочного прогноза распределения молодых и однолетних льдов в осенне-зимний период в юго-восточной части Баренцева моря с заблаговременностью 30–45 суток

А.Б. Тюряков, Л.П. Мочнова

*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
г. Санкт-Петербург, Россия
tyuryakov@aari.ru*

Метод основан на естественных природных взаимосвязях и преемственности в развитии ледовых условий в юго-восточной части Баренцева моря в осенне-зимний период. В методе применены разработанные авторами критерии типизации ледовых условий в юго-восточной части Баренцева моря по пяти типам (экстремально легкий, легкий, средний, тяжелый и экстремально тяжелый), каждый из которых характеризуется определенным распределением молодых и однолетних льдов. Метод построен на использовании ряда метеорологических и ледовых показателей: площади льдов в юго-восточной части Баренцева моря за предшествующие месяцы, температуры воздуха на полярных станциях, направлений и интенсивности воздушных переносов в центральном районе юго-восточной части Баренцева моря, также за предшествующие прогностическому периоду месяцы. Каждый из показателей доступен и может быть надежно определен по данным ФГБУ «ААНИИ», полярных станций или по данным ИСЗ.

Оценка качества методики проведена по результатам испытаний на независимом материале в период с декабря 2013 г. по апрель 2017 г. Средняя за 4-летний период испытаний оправдываемость долгосрочных прогнозов распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря в осенне-зимний период составила 82 % при климатической обеспеченности 61 % и эффективности 21 %.

Ключевые слова: долгосрочный прогноз, юго-восточная часть Баренцева моря, распределение молодых и однолетних льдов, типы ледовых условий, критерии типизации, прогностические предикторы, оправдываемость прогнозов

A method for long-range forecasting of young and first-year ice distribution in the southeastern Barents Sea in autumn-winter with a lead time of 30-45 days

A.B. Tyuryakov, L.P. Mochnova

*Arctic and Antarctic Research Institute, Saint-Petersburg, Russia
tyuryakov@aari.ru*

A method is based on the natural correlations and continuity in the development of ice conditions in the southeastern Barents Sea during the autumn-winter period. The authors elaborated the criteria that allow dividing the southeastern Barents Sea ice conditions into five types (extremely light, light, medium, severe and extremely severe), each characterized by the certain distribution of young and first-year ice. The method takes

into account a number of meteorological and ice parameters: the sea ice extent in the southeastern Barents Sea in previous months, air temperature at the polar stations, the direction and intensity of atmospheric circulation in the central part of the southeastern Barents Sea in previous months. All parameters are available and can be reliably determined using data of AARI, polar stations and satellite imagery.

The method quality is assessed during the test period from December 2013 to April 2017, the test forecasts are based on independent data. The average 4-year accuracy of long-range forecasts of young and first-year ice in the southeastern Barents Sea in autumn-winter amounted to 82%. Taking into account that the climatic probability is equal to 61%, the method efficiency amounted to 21%.

Keywords: long-range forecast, southeastern Barents Sea, young and first-year ice, types of ice conditions, typification criteria, predictors, forecast accuracy

Введение

Актуальность разработки метода определяется необходимостью информационного ледового обеспечения хозяйственных работ и плаваний в осенне-зимний период в юго-восточной части Баренцева моря.

В настоящее время отсутствует долгосрочный метод прогноза, который позволял бы с заблаговременностью 1 месяц и более предвидеть особенности ледовых условий такого важного района, как юго-восточная часть Баренцева моря. Важность этой акватории определяется, прежде всего, активной хозяйственной деятельностью, которая ведется здесь в течение последних лет. Экономически эффективные и экологически безопасные морские операции в арктических акваториях возможны только при соответствующем уровне специализированного ледового и гидрометеорологического обеспечения.

1. Метод долгосрочного прогноза распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря в осенне-зимний период заблаговременностью 30–45 суток. Основные положения

В процессе работы по созданию метода прогноза вся акватория юго-восточной части Баренцева моря была разбита на равновеликие квадраты сеточной области размером примерно 28×28 км (15 мин по широте \times 45 мин по долготе). Таких квадратов получилось 230.

На рис. 1 представлена сеточная область, внутри каждого квадрата которой с фактических ледовых карт снималась и заносилась в специальные промежуточные таблицы информация о наличии льда того или иного возраста и о преобладании льда той или иной возрастной градации за каждую декаду осенне-зимнего периода (ноябрь – апрель).

В качестве исходного материала использовались карты ледовых авиационных разведок с 1964 по 1988 г., а также комплексные ледовые карты, построенные на основе спутниковых снимков, за период 1989–2011 гг. Привлекались также данные полярных станций (п/ст).

Если информация о ледовой обстановке в юго-восточной части Баренцева моря, получаемая с карт ледовых авиационных разведок, носила

эпизодический характер, то информация о распределении льдов, полученная с комплексных ледовых карт, являлась и является по настоящее время наиболее полной. Такие карты составлялись и составляются каждые 5–6 дней на протяжении всего годового цикла начиная с 1989 года.

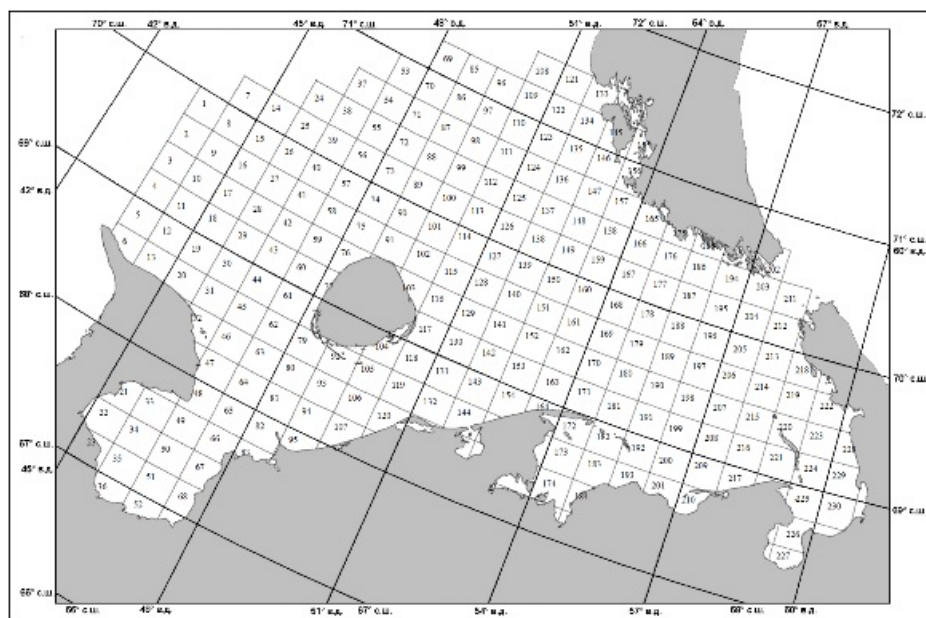


Рис. 1. Сеточная область юго-восточной части Баренцева моря.
Fig. 1. Grid net of the south-eastern Barents Sea.

В табл. 1 представлено количество проанализированных ледовых карт с декадной дискретностью с октября по апрель за период 1964–2011 гг.

Таблица 1. Количество проанализированных ледовых карт с декадной дискретностью за период с 1964 по 2011 г. с информацией о ледовых условиях в квадратах сеточной области юго-восточной части Баренцева моря
Table 1. Quantity of analyzed ice charts with 10-day discreteness for the period from 1964 to 2011 with ice information in the cells of the grid net of the south-eastern Barents Sea

Месяц	Октябрь			Ноябрь			Декабрь			Январь			Февраль			Март			Апрель		
Декада	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
К-во карт	34	40	50	42	44	43	45	51	50	47	56	49	42	62	45	47	63	48	41	54	44

Статистическая обработка полученной информации и ее анализ по каждому квадрату сеточной области за указанный ряд лет позволили получить такие важные характеристики, как вероятность наличия льда

различного возраста в каждом из 230 квадратов сеточной области в октябре – августе с декадной дискретностью и вероятность преобладания льда того или иного возраста, также для каждого из квадратов сеточной области за этот период.

Такие таблицы были составлены для каждого из 230 квадратов сеточной области, покрывающей акваторию юго-восточной части Баренцева моря.

Был проведен анализ полученных результатов по каждому из квадратов с декадной дискретностью. Выявлены годы с максимальными и минимальными вероятностями наличия льда того или иного возраста за каждую декаду по каждому из квадратов сеточной области в течение всего осенне-зимнего периода.

Основной метода долгосрочного прогноза распределения молодых и однолетних льдов [1] в юго-восточной части Баренцева моря является метод типизации как один из наиболее эффективных способов описания значительной сезонной и межгодовой изменчивости распределения ледяного покрова.

Была выполнена типизация ледовых условий по характеру их сезонных изменений.

Выделение групп (типов) осуществлялось с использованием значений площади льда в юго-восточной части Баренцева моря, являющихся интегральными показателями ледовых условий.

Ледовые условия анализировались в осенне-зимний период, или период нарастания ледяного покрова (ноябрь – апрель).

В качестве показателя периода нарастания ледяного покрова выбраны среднемесячные значения площади льда за ноябрь – апрель. При делении на группы в качестве критериев были приняты доли стандартного отклонения (σ) площади, занятой льдом (L), за выбранный период. Значение $1,2\sigma$ принято как критерий крупной положительной или отрицательной аномалии [3]. L_{cp} – средняя многолетняя ледовитость за месяц.

В результате выделено 5 групп:

- 1 – экстремально легкая ($L \leq L_{cp} - 1,2\sigma$);
- 2 – легкая ($L_{cp} - 1,2\sigma < L < L_{cp} - 0,4\sigma$);
- 3 – средняя ($L_{cp} - 0,4\sigma \leq L \leq L_{cp} + 0,4\sigma$);
- 4 – тяжелая ($L_{cp} + 0,4\sigma < L < L_{cp} + 1,2\sigma$);
- 5 – экстремально тяжелая ($L \geq L_{cp} + 1,2\sigma$).

Анализировались данные среднемесячной ледовитости юго-восточной части Баренцева моря с 1928 по 1988 г. и среднедекадные значения площади, занятой льдом, с 1989 по 2011 год.

Принадлежность осенне-зимнего периода конкретного года к той или иной группе определялась по совокупности отнесения к той ли иной группе каждого из пяти месяцев, составляющих осенне-зимний период.

Распределение значений ледовитости по выделенным группам за весь рассмотренный ряд лет и их повторяемость в осенне-зимний период представлено в табл. 2.

Таблица 2. Распределение значений ледовитости юго-восточной части Баренцева моря по выделенным группам и их повторяемость за осенне-зимний период

Table 2. Distribution of the ice cover extent values in the south-eastern Barents Sea by the revealed groups and their frequency of occurrence in autumn-winter period

Группа	Градации, доли σ	Повторяемость группы, %	Значение ледовитости по месяцам, %					
			XI	XII	I	II	III	IV
I	$L \leq L_{cp} - 1,2\sigma$	14	0	≤ 10	≤ 28	≤ 41	≤ 45	≤ 42
II	$L_{cp} - 1,2\sigma < L < L_{cp} - 0,4\sigma$	8	0,1–3	11–20	29–39	40–53	46–58	43–56
III	$L_{cp} - 0,4\sigma \leq L \leq L_{cp} + 0,4\sigma$	47	4–10	21–30	40–50	54–65	59–71	57–72
IV	$L_{cp} + 0,4\sigma < L < L_{cp} + 1,2\sigma$	10	11–18	31–41	51–61	66–78	72–84	73–87
V	$L \geq L_{cp} + 1,2\sigma$	21	≥ 19	≥ 42	≥ 62	> 78	> 84	≥ 88

Ледообразование в юго-восточной части Баренцева моря начинается, как правило, в конце октября всегда в отсутствии остаточных льдов. В ноябре наблюдаются исключительно молодые и начальные виды льдов. Однолетние льды в этой части Баренцева моря в среднем появляются в январе. В «тяжелые» годы это происходит уже в декабре, а в «легкие» – в феврале. Своего максимального развития ледяной покров в юго-восточной части Баренцева моря достигает в апреле. А в мае уже отчетливо начинает проявляться процесс таяния и разрушения ледяного покрова.

Особенности развития ледовых процессов при различных типах ледовых условий, как показал анализ, достаточно отчетливо проявляются и в распределении молодых и однолетних льдов на акватории юго-восточной части Баренцева моря в осенне-зимний период.

В результате анализа для осенне-зимнего периода было определено типовое распределение молодых и однолетних льдов, характерное для каждой из выделенных групп (типов ледовых условий).

Карты с типовым распределением молодых и однолетних льдов, характерным для каждой из выделенных групп, построены для декабря – апреля с месячной дискретностью (на середину месяца). Было построено 25 таких карт.

Таким образом, спрогнозировав с помощью определенных признаков тип ледовых условий (группу, к которой относится рассматриваемый месяц рассматриваемого года), можно получить в картированном виде

прогностическое распределение молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря для этого временного интервала.

Инерционность процесса изменения ледовых условий в юго-восточной части Баренцева моря в течение годового цикла выражена значительно слабее, чем в других районах моря. Однако это свойство проявляется достаточно отчетливо от месяца к месяцу на протяжении осенне-зимнего периода.

Словосочетание «достаточно отчетливо» подразумевает, что в большинстве случаев тип ледовых условий в осенне-зимний период от месяца к месяцу либо сохраняется, либо переходит в смежный тип. Это наглядно демонстрирует табл. 3, из которой также следует, что имеют место исключения (случаи с существенным нарушением инерционности процесса), когда тип ледовых условий от месяца к месяцу меняется более чем на одну градацию. На их долю приходится менее 10 % случаев. Нет смысла рассматривать каждый из них, объясняя причины, к этому приведшие, поскольку их не так много, а по большому счету всего одна, но очень значимая и объясняющая резкое изменение типа ледовых условий в юго-восточной части Баренцева моря от одного месяца к другому – это кардинальное изменение направления воздушных переносов и сохранение их продолжительной однонаправленности.

Таблица 3. Вероятность сохранения типов ледовых условий в юго-восточной части Баренцева моря от месяца к месяцу на протяжении всего периода существования ледяного покрова при различных типах синоптических процессов

Table 3. Probability of ice conditions type preservation in the south-eastern Barents Sea from month to month during the entire ice season at various types of synoptic processes

Характеристика типа синоптических процессов	Зимний тип					Переход от зимнего типа к летнему	Летний тип	
	XI–XII	XII–I	I–II	II–III	III–IV		IV–V	V–VI
От месяца к месяцу	XI–XII	XII–I	I–II	II–III	III–IV	IV–V	V–VI	VI–VII
Вероятность сохранения типа ледовых условий, %	61	67	71	68	62	51	69	65
Вероятность перехода типа ледовых условий в смежный, %	30	29	25	27	31	25	26	29
Вероятность изменения типа ледовых условий более чем на одну градацию, %	9	4	4	5	7	24	5	6

Рассмотрим в качестве примера лишь один случай: декабрь и январь 1999/2000 гг., аргументированно подтверждающий сказанное. Ледовые условия декабря 1999 г. в юго-восточной части Баренцева моря характеризовались как легкие (IV тип ледовых условий). Льдом было покрыто лишь 19 % площади этой части Баренцева моря. При этом в течение практически всего декабря над указанной акваторией преобладали достаточно интенсивные воздушные переносы южной четверти. Они препятствовали активному ледообразованию в указанной акватории не только благодаря своему динамическому воздействию, но и по причине положительной аномалии температуры воздуха в районе, обусловленной ими.

Лишь в самом конце месяца синоптическая ситуация существенно изменилась. Воздушные переносы над этой частью акватории Баренцева моря перешли к северо-восточным. Они приобрели устойчивый продолжительный характер. Это привело к формированию крупной отрицательной аномалии температуры воздуха над акваторией и, как следствие, к резкой активизации процессов ледообразования в течение января 2000 г. В результате тип ледовых условий января уже характеризовался как тяжелый (II тип ледовых условий), а средняя месячная ледовитость января составила 61 %. Инерционность ледовых процессов от месяца к месяцу в юго-восточной части Баренцева моря в данном конкретном случае была нарушена по очевидной причине, и легкий IV тип ледовых условий в декабре сменил тяжелый II тип в январе.

Таким образом, важнейшими факторами, определяющими формирование ледовых условий в юго-восточной части Баренцева моря, являются атмосферные процессы. Направление и интенсивность воздушных переносов в осенне-зимний период обуславливают характер динамических процессов в ледяном покрове, а аномалии температуры воздуха характеризуют интенсивность нарастания льда. В апреле-мае происходит перестройка синоптических процессов с зимнего типа на летний тип. Именно в этот период времени и большей частью по этой причине инерционность изменения ледовых условий от месяца к месяцу сводится к минимуму, а иногда нарушается вовсе. Это наглядно подтверждает табл. 3, в которой представлены вероятности сохранения типов ледовых условий в юго-восточной части Баренцева моря от месяца к месяцу на протяжении всего периода существования ледяного покрова при различных типах синоптических процессов.

Действительно, от апреля к маю в период перестройки синоптических процессов с зимнего типа на летний существенно уменьшается вероятность сохранения типа ледовых условий и резко увеличивается вероятность изменения типа ледовых условий более чем на одну градацию, т. е. возрастает вероятность смены знака аномалии ледовитости от апреля к маю. Однако на протяжении всего осенне-зимнего периода при зимнем типе синоптических процессов инерционность изменений типа ледовых условий от месяца к месяцу выражена отчетливо.

В качестве предикторов, характеризующих атмосферные и ледовые процессы в юго-восточной части Баренцева моря в период нарастания ледяного покрова, приняты следующие параметры:

1. Ледовитость юго-восточной части Баренцева моря за предшествующие месяцы.
2. Температура воздуха на п/ст Малые Кармакулы.
3. Направление и интенсивность воздушных переносов в центральном районе юго-восточной части Баренцева моря.
4. Температура воздуха в Баренцбурге.

В комментариях к перечисленным параметрам необходимо добавить, что

1) п/ст Малые Кармакулы выбрана как наиболее репрезентативная из давно действующих станций в юго-восточной части Баренцева моря. Использовались среднемесячные значения температуры воздуха на этой станции 1922–2011 гг.;

2) направление воздушных переносов определяется как преобладающее в области радиусом 30 миль с центром в точке $70^{\circ} 00' \text{ с. ш.}, 51^{\circ} 30' \text{ в. д.}$, а их интенсивность – как изобарический градиент в пределах той же области. Использовались среднемесячные карты приземного давления 1937–2011 гг.;

3) температура воздуха в Баренцбурге достаточно хорошо коррелирует с температурой воды в слое 0–50 м на гидрологическом разрезе № 9 (станции 1–5) в западной части Баренцева моря и косвенным образом характеризует поток тепла, поступающий в юго-восточную часть Баренцева моря с запада. Использовались среднемесячные значения температуры воздуха на этой метеостанции с 1932 по 2011 г., за исключением 1941–1946 и 1991 гг.;

4) они перечислены в порядке значимости, которая оценена специальным исследованием, результаты которого приводятся в табл. 4.

Таблица 4. Значимость фактических предикторов при определении прогностического типа ледовых условий в юго-восточной части Баренцева моря
Table 4. Contribution of actual predictors at defining the type of ice conditions in the south-eastern Barents Sea

Наименование предиктора	Значимость предиктора, %
Ледовитость юго-восточной части Баренцева моря за предшествующие месяцы	58
Температура воздуха на п/ст Малые Кармакулы	19
Направление и интенсивность воздушных переносов в центральном районе юго-восточной части Баренцева моря (область радиусом 30 миль с центром в точке $70^{\circ} 00' \text{ с. ш.}, 51^{\circ} 30' \text{ в. д.}$)	16
Температура воздуха в Баренцбурге	7

Значимость предикторов подразумевает вероятность точного определения прогностического типа ледовых условий по фактическим значениям предикторов за предшествующий месяц или месяцы. Чем выше вероятность определения прогностического типа ледовых условий по фактическим значениям конкретного предиктора, тем выше его значимость. Так, например, в 58 % случаев (за рассмотренный 84-летний ряд лет) по фактической ледовитости юго-восточной части Баренцева моря за предшествующий месяц можно уверенно судить о типе ледовых условий в этой части Баренцева моря в месяце последующем, а в 19 % случаев тип ледовых условий в следующем месяце четко определяется по фактическим средним месячным температурам воздуха на п/ст Малые Кармакулы за предшествующие месяцы. Поэтому ледовитость юго-восточной части Баренцева моря за предшествующие месяцы является самым значимым из четырех выявленных предикторов при определении прогностического типа ледовых условий, а температура воздуха на п/ст Малые Кармакулы является вторым по значимости предиктором, занимая вторую строчку в табл. 4.

Анализ каждого из предикторов позволил получить численные значения ледовитости и параметров атмосферы, характерных для каждой из выделенных в процессе типизации ледовых условий пяти групп.

Определенные сочетания численных значений этих параметров являются признаками, по которым, используя только фактические данные, можно достаточно надежно спрогнозировать тип ледовых условий на декабрь – апрель, тем самым получив типовое прогностическое распределение молодых и однолетних льдов для осенне-зимнего периода с месячной дискретностью (на середину месяца).

Таким образом, основной задачей пользователя при составлении прогноза распределения льдов в юго-восточной части Баренцева моря является идентифицировать, к какой группе (к какому типу ледовых условий) относится рассматриваемый месяц рассматриваемого года с помощью табл. 3, 5–7.

Определив группу (т. е. тип ледовых условий), остается выбрать для предоставления потребителю нужный набор типовых карт.

Блок-схема составления прогноза распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря в осенне-зимний период с заблаговременностью 30–45 суток представлена на рис. 2.

Прогноз распределения молодых и однолетних льдов в осенне-зимний период в юго-восточной части Баренцева моря делится на:

– декабрьский, составляемый 1 декабря на декабрь и январь (на середину месяца) и уточняемый 15 декабря на январь (также на середину месяца);

– январский, составляемый 1 января на январь и февраль (на середину месяца) и уточняемый 15 января на февраль (также на середину месяца);

– февральский, который составляется 25 февраля на март и апрель (на середину месяца) и уточняется 15 марта на апрель (также на середину месяца).



Рис. 2. Блок-схема составления долгосрочного прогноза распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря в осенне-зимний период.

Fig. 2. Principal diagram of the long-range forecast of young and first year ice distribution in the south-eastern Barents Sea in autumn-winter period.

2. Технология составления долгосрочного прогноза распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря в осенне-зимний период заблаговременностью 30-45 суток

2.1. Порядок составления декабрьского прогноза распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря

1 декабря осуществляется сбор фактической информации, необходимой для составления прогноза типа ледовых условий на декабрь:

- средней за ноябрь ледовитости юго-восточной части Баренцева моря (L_{XI});

- суммы среднемесячных температур воздуха на п/ст Малые Кармакулы за октябрь-ноябрь ($\Sigma T_{a_{X-XI}} MK$);

- со среднемесячных карт приземного давления определяется направление и интенсивность воздушных переносов в октябре и ноябре в области радиусом 30 миль с центром в точке $70^{\circ} 00' \text{ с. ш.}, 51^{\circ} 30' \text{ в. д}$ ($BP_{X,XI}, \Delta P_{X,XI}$);

- суммы среднемесячных температур воздуха в Баренцбурге за октябрь-ноябрь ($\Sigma T_{a_{X-XI}} B$).

Затем, со значениями перечисленных предикторов входят в табл. 5 и по совокупности представленных в ней признаков определяют группу, к которой относятся ледовые условия декабря рассматриваемого года. Далее с учетом вероятностей сохранения прогнозируемого типа ледовых

условий от декабря к январю и его перехода в смежные типы (табл. 3) прогнозируется тип ледовых условий и января.

Таблица 5. Значения ледовитости юго-восточной части Баренцева моря и параметров атмосферы в осенне-зимний период, характерные для различных типов ледовых условий в декабре (декабрьский прогноз)

Table 5. Values of the ice cover extent in the south-eastern Barents Sea and atmospheric parameters in autumn-winter period typical for the various types of ice conditions in December (December forecast)

Группа	Предиктор			
	$L_{X,I}$, %	$\Sigma T_{a_{X-XI}}$ МК, °С	$ВП_{X,XI}$ °; $\Delta P_{X,XI}$, мбар	$\Sigma T_{a_{X-XI}}$ Б, °С
I	0	≥ -2	$190 < ВП_{X,XI} \leq 250$ при $\Delta P_{X,XI} > 3$	$> -1,0$
II	$0,1 \leq L_{X,I} \leq 3$	$-7 < \Sigma T_{a_{X-XI}} < -2$	–	$-8 < \Sigma T_{a_{X-XI}} \leq -2$
III	$4 \leq L_{X,I} \leq 10$	$-11 < \Sigma T_{a_{X-XI}} \leq -8$	–	–
IV	$11 \leq L_{X,I} \leq 19$	$-20 < \Sigma T_{a_{X-XI}} \leq -12$	–	$-26 \leq \Sigma T_{a_{X-XI}} \leq -18$
V	> 19	< -20	$300 \leq ВП_{X,XI} \leq 350$ при $\Delta P_{X,XI} \geq 3$ или: $80 \leq ВП_{X,XI} \leq 140$	< -26

Впоследствии отбираются и выдаются потребителю типовые прогностические карты с характерным для установленной группы распределением молодых и однолетних льдов, ожидаемым в юго-восточной части Баренцева моря в декабре и январе. Карты составлены на середину месяца.

15 декабря в рамках уточнения декабрьского прогноза производится уточнение прогнозируемого типа ледовых условий в юго-восточной части Баренцева моря на январь. При уточнении декабрьского прогноза типа ледовых условий на январь используются данные о фактической ледовитости юго-восточной части Баренцева моря на середину декабря (ее сравнение с нормой) и фоне температуры воздуха над акваторией этой части Баренцева моря в первой половине декабря (сравнение с нормой, выявление аномалий). Данные о фактической ледовитости юго-восточной части Баренцева моря на середину декабря получают с комплексных ледовых карт, построенных в ФГБУ «ААНИИ» по данным ИСЗ, а о фоне температуры воздуха в регионе – с синоптических карт, составляемых также в ААНИИ.

Типовая прогностическая карта с распределением молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря в январе, представляемая в рамках уточнения декабрьского прогноза, выдается потребителю 15 декабря с учетом корректировки прогнозируемого на декабрь типа ледовых условий, а также с учетом вероятностей сохранения прогнозируемого типа ледовых условий от декабря к январю и его перехода в смежные типы (табл. 3).

2.2. Порядок составления январского и февральского прогнозов распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря

Аналогичным образом составляются январский и февральский прогнозы распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря. Разница лишь в используемой при этих прогнозах информации и наборе признаков, позволяющих спрогнозировать тип ледовых условий, представленных в табл. 6 и 7 (для январского и февральского прогноза соответственно).

Таблица 6. Значения ледовитости юго-восточной части Баренцева моря и параметров атмосферы в осенне-зимний период, характерные для различных типов ледовых условий в январе (январский прогноз)

Table 6. Values of the ice cover extent in the south-eastern Barents Sea and atmospheric parameters in autumn-winter period typical for the various types of ice conditions in January (January forecast)

Группа	Предиктор			
	L_{XII} , %	ΣT_{aX-XII} , °C	$ВП_{X, XI, XII}$, °; $\Delta P_{X, XI, XII}$, мбар	ΣT_{aX-XII} Б, °C
I	≤ 16	> -10	$180 < ВП_{X, XI, XII} \leq 270$ при $\Delta P_{X, XI, XII} \geq 4$	> -7
II	$12 \leq L_{XII} \leq 24$	$-14 < \Sigma T_{aX-XII} \leq -10$	–	$-16 < \Sigma T_{aX-XII} \leq -8$
III	$12 \leq L_{XII} \leq 40$	$-18 < \Sigma T_{aX-XII} \leq -10$	–	–
IV	$25 \leq L_{XII} \leq 40$	$-32 < \Sigma T_{aX-XII} \leq -18$	–	$-42 \leq \Sigma T_{aX-XII} \leq -31$
V	≥ 40	< -32	$280 \leq ВП_{X, XI, XII} \leq 330$ при $\Delta P_{X, XI, XII} > 3$ или: $100 \leq ВП_{X, XI, XII} \leq 160$	< -42

Таблица 7. Значения ледовитости юго-восточной части Баренцева моря и параметров атмосферы в зимний период, характерные для различных типов ледовых условий в марте (февральский прогноз)

Table 7. Values of the ice cover extent in the south-eastern Barents Sea and atmospheric parameters in autumn-winter period typical for the various types of ice conditions in March (February forecast)

Группа	Предиктор		
	L_I , %	ΣT_{aX-XII} , °C; T_{aI} , °C	$ВП_{X, XII, I}$, ° румбы; ΔP_I , мбар
I	≤ 27	$T_{aI} > -10$	$200 \leq ВП_{X, XII, I} \leq 270$
II	$27 < L_I \leq 36$	$T_{aI} > -12$	$235 \leq ВП_I \leq 270$ при $\Delta P_I > 4$
III	$36 < L_I \leq 48$	–	–
IV	$48 < L_I \leq 60$	$T_{aI} < -20$	$130 \leq ВП_I \leq 175$
V	> 60	$\Sigma T_{aX-XII} \leq -30$; $T_{aI} < -15$	$30 \leq ВП_I \leq 100$

Так, при составлении прогноза типа ледовых условий на январь и февраль, 1 января осуществляется сбор необходимой для этого фактической информации:

- средней за декабрь прошедшего года ледовитости юго-восточной части Баренцева моря (L_{XII});
- суммы среднемесячных температур воздуха на п/ст Малые Кармакулы за октябрь – декабрь (ΣT_{aX-XII} МК);
- со среднемесячных карт приземного давления определяется направление и интенсивность воздушных переносов в октябре, ноябре и декабре в области радиусом 30 миль с центром в точке $70^{\circ} 00' \text{ с. ш.}, 51^{\circ} 30' \text{ в. д.}$ ($ВП_{X, XI, XII}$ и $\Delta P_{X, XI, XII}$);
- суммы среднемесячных температур воздуха в Баренцбурге за октябрь – декабрь (ΣT_{aX-XII} Б).

При составлении прогноза типа ледовых условий на март и апрель в третьей декаде февраля осуществляется сбор следующих необходимых фактических данных:

- средней за январь ледовитости юго-восточной части Баренцева моря (L_I);
- суммы среднемесячных температур воздуха за октябрь-декабрь и средней за январь температуры воздуха на п/ст Малые Кармакулы (ΣT_{aX-XII} и T_{aI} МК);
- направлений воздушных переносов в ноябре, декабре и январе, а также январской интенсивности воздушных переносов в области радиусом 30 миль с центром в точке $70^{\circ} 00' \text{ с. ш.}, 51^{\circ} 30' \text{ в. д.}$, определяемых со среднемесячных карт приземного давления ($ВП_{XI, XII, I}$ и ΔP_I). XI, XII, I

Впоследствии отбираются и выдаются потребителю типовые прогностические карты с характерным для установленной группы распределением молодых и однолетних льдов, ожидаемым в юго-восточной части Баренцева моря в январе и марте. Карты составлены на середину месяца.

15 января в рамках уточнения январского прогноза производится уточнение прогнозируемого типа ледовых условий в юго-восточной части Баренцева моря на февраль, а 15 марта – в рамках уточнения февральского прогноза на апрель.

При уточнении январского прогноза типа ледовых условий на февраль используются данные о фактической ледовитости юго-восточной части Баренцева моря на середину января (ее сравнение с нормой) и фоне температуры воздуха над акваторией этой части Баренцева моря в первой половине января (сравнение с нормой, выявление аномалий). При уточнении февральского прогноза типа ледовых условий на апрель используются данные о фактической ледовитости юго-восточной части Баренцева моря на середину марта (ее сравнение с нормой) и фоне температуры воздуха над акваторией этой части Баренцева моря в первой половине марта (сравнение с нормой, выявление аномалий).

Типовая прогностическая карта с распределением молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря в феврале, представляемая в рамках уточнения январского прогноза, выдается потребителю 15 января с учетом корректировки прогнозируемого на январь типа ледовых условий, а также с учетом вероятностей сохранения прогнозируемого типа ледовых условий от января к февралю и его перехода в смежные типы (табл. 3), а типовая прогностическая карта с распределением молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря в апреле, представляемая в рамках уточнения февральского прогноза, выдается потребителю 15 марта также с учетом вероятностей сохранения прогнозируемого типа ледовых условий от марта к апрелю и его перехода в смежные типы.

В качестве примечания следует отметить, что при составлении январского прогноза экстремально легкие и экстремально тяжелые ледовые условия определяются легко и уверенно, а последние, кроме того, однозначно сохраняют величину аномалии на протяжении всего осенне-зимнего периода.

В случае, если по совокупности признаков идентифицируется пятая группа, то потребителю выдается набор прогностических карт распределения молодых и однолетних льдов, соответствующих экстремально тяжелому типу ледовых условий на весь период нарастания ледяного покрова, т. е. по апрель включительно.

Следует также отметить, что в диагностических признаках февральского прогноза полностью исключен даже минимум неопределенности, присущий январскому прогнозу, когда подчас бывает сложно отличить по представленным в табл. 6 признакам вторую и четвертую группу от третьей, то есть легкие и тяжелые условия от средних.

3. Оценка оправдываемости прогнозов типов ледовых условий и распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря в декабре – апреле

Основой прогноза распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря в осенне-зимний период является прогноз типа ледовых условий. Прогностическое распределение молодых и однолетних льдов жестко связано с прогнозом типа ледовых условий, поэтому выдаваемые потребителю прогностические карты распределения льдов и называются типовыми.

Оправдываемость прогнозов типов ледовых условий оценивалась согласно Наставлению [2]. При оценке прогноза типов ледовых условий в юго-восточной части Баренцева моря в осенне-зимний период с заблаговременностью 30–45 суток оценку 100 % получал прогноз, в котором верно был отражен тип ледовых условий по установленному критерию большую часть прогностического периода (не менее трех декад). Оценку

0 % получал прогноз, в котором неверно был предсказан тип ледовых условий для всего периода или для его большей части (не менее трех декад).

Обеспеченность метода прогноза площади, занятой льдом (типа ледовых условий) в юго-восточной части Баренцева моря для осенне-зимнего периода (на зависимом материале), приведена в табл. 8.

Следует отметить, что наибольшая обеспеченность отмечается для случаев с крупными аномалиями ледовых условий (I и V группы), что является важным моментом и свидетельствует о надежности метода.

Таблица 8. Обеспеченность (%) метода прогноза площади льда (типа ледовых условий) в юго-восточной части Баренцева моря в осенне-зимний период
Table 8. Probability (%) of the method of ice cover extent (ice conditions type) forecast in the south-eastern Barents Sea in autumn-winter period

Сроки составления прогноза	Период действия прогноза	Группа				
		I	II	III	IV	V
2 декабря	декабрь	100	94	90	91	100
15 декабря*	январь	98	90	86	88	96
2 января	январь	100	92	84	93	100
15 января*	февраль	98	89	80	91	98
25 февраля	март	100	93	87	96	100
15 марта*	апрель	97	88	79	90	94

Примечание. * По 15-м числам декабря, января и марта происходит уточнение прогноза типа ледовых условий на январь, февраль и апрель соответственно. The forecast of ice conditions type for January, February and April is set more precisely on the 15th of December, January and March respectively.

При оценке оправдываемости прогноза распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря рассматривалось совпадение прогностического и фактического наличия молодого и однолетнего льда, а также чистой воды в каждом из 230 квадратов сеточной области. Прогноз по квадрату считался оправдавшимся на 100 %, если прогностическое и фактическое наличие молодого, однолетнего льда или чистой воды совпадали в большей части данного квадрата. Прогноз по квадрату считался оправдавшимся на 50 %, если прогностическое и фактическое наличие молодого, однолетнего льда или чистой воды совпадали в меньшей части данного квадрата. В случае несовпадения прогностического и фактического наличия молодого, однолетнего льда или чистой воды в рассматриваемом квадрате прогноз по нему считался не оправдавшимся. После оценки оправдываемости прогноза по каждому квадрату подсчитывалась общая оправдываемость данного конкретного прогноза по всей юго-восточной части Баренцева моря.

Обеспеченность метода прогноза распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря для осенне-зимнего периода (на зависимом материале) приведена в табл. 9.

Таблица 9. Обеспеченность (%) метода прогноза распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря в осенне-зимний период и его сравнение с климатическим прогнозом

Table 9. Probability of the method of young and first year ice distribution in the south-eastern Barents Sea in autumn-winter period and its comparison with climatic forecast

Срок составления прогноза	Период действия прогноза	Pm, %	Pn, %	Э, %
2 декабря	декабрь	87	64	23
15 декабря	январь	82	61	21
2 января	январь	89	63	26
15 января	февраль	83	62	21
25 февраля	март	84	60	24
15 марта	апрель	76	59	17

Примечание. Pm – обеспеченность метода распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря; Pn – обеспеченность нормы; Э – эффективность метода.

4. Пример составления прогноза

Ниже приведен пример разработки прогноза распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря.

1. Входные данные прогноза

Район – юго-восточная часть Баренцева моря.

Дата составления прогноза – 1 января 2011 г., уточнение прогноза – 15 января 2011 г.

Прогнозируемый период – январь-февраль 2011 г.

Исходный тип ледовых условий в декабре – средний (III тип ледовых условий) по площади занятой льдом в юго-восточной части Баренцева моря.

2. Исходные данные:

– средняя за декабрь 2010 г. ледовитость юго-восточной части Баренцева моря – 25 % (тип ледовых условий в декабре – средний);

– сумма среднемесячных температур воздуха на п/ст Малые Кармакулы за октябрь – декабрь 2010 г. – минус 12 °С.

3. Прогноз типа ледовых условий в юго-восточной части Баренцева моря на январь и февраль 2011 года:

– по средней за декабрь ледовитости юго-восточной части Баренцева моря и сумме среднемесячных температур воздуха на п/ст Малые Кармакулы за октябрь – декабрь 2010 г. ледовые условия в юго-восточной части Баренцева моря в декабре 2010 года однозначно характеризуются как средние (III тип ледовых условий);

– учитывая вероятность сохранения типов ледовых условий от декабря к январю (67 %) и от января к февралю (71 %), прогнозируем сохранение III типа ледовых условий в январе и феврале 2011 года.

4. *Прогноз распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря на середину января и середину февраля 2011 года:*

– из набора типовых карт распределения молодых и однолетних льдов в январе и феврале выбираем карты, соответствующие III типу ледовых условий. Их и выдаем потенциальному потребителю в качестве конечного продукта;

– 15 января 2011 г. производим уточнение январского прогноза типа ледовых условий на февраль. При этом опираемся на фактические данные по ледовитости юго-восточной части Баренцева моря на середину января и фон температуры воздуха над акваторией юго-восточной части Баренцева моря за первую половину января. Площадь юго-восточной части Баренцева моря, занятой льдом к 15 января, составила 40 % при средней за январь норме 45 %, а фон температуры воздуха над этой частью Баренцева моря был близок к норме.

В рамках январского уточнения прогноза типа ледовых условий на февраль сохраняем прогнозируемый ранее в январском прогнозе III тип ледовых условий, а соответственно, оставляем в силе и прогноз – распределение молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря на середину февраля 2011 г. На рис. 3 представлена типовая прогнозическая карта распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря на 15 февраля 2011 г., а на рис. 4 – фактическое распределение льдов в юго-восточной части Баренцева моря на 15 февраля 2011 года по данным ИСЗ.

5. *Оправдываемость прогноза распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря на середину февраля 2011 года*

Оправдываемость прогноза распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря на середину февраля 2011 г., составленного 1 января и уточненного 15 января 2011 г., составила 82 %.

5. Результаты испытаний метода прогноза

В период с декабря 2013 г. по апрель 2017 г. проводились авторские ретроспективные испытания метода прогноза на независимом материале.

Всего за период испытаний было составлено 12 долгосрочных прогнозов типов ледовых условий в юго-восточной части Баренцева моря и 12 прогнозов распределения молодых и однолетних льдов в этой части Баренцева моря с заблаговременностью 30–45 суток.

Обобщенные результаты испытаний метода прогноза типов ледовых условий в юго-восточной части Баренцева моря и базирующемся на нем прогнозе распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря представлены в табл. 10.

Средняя за четыре года испытаний оправдываемость прогнозов распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря в осенне-зимний период заблаговременностью 30–45 суток составила 82 % при климатической обеспеченности 61 % и эффективности 21 %, что соответствует необходимым требованиям.

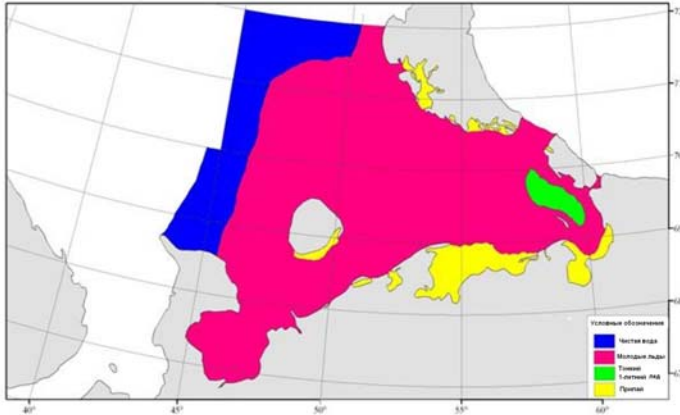


Рис. 3. Прогноз распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря на 15 февраля 2011 г. с заблаговременностью 45 суток для среднего (III) типа ледовых условий.
Fig. 3. Forecast of young and first year ice distribution in the south-eastern Barents Sea with advance period of 45 days for the February 15, 2011, ice conditions correspond to the medium (third) type.

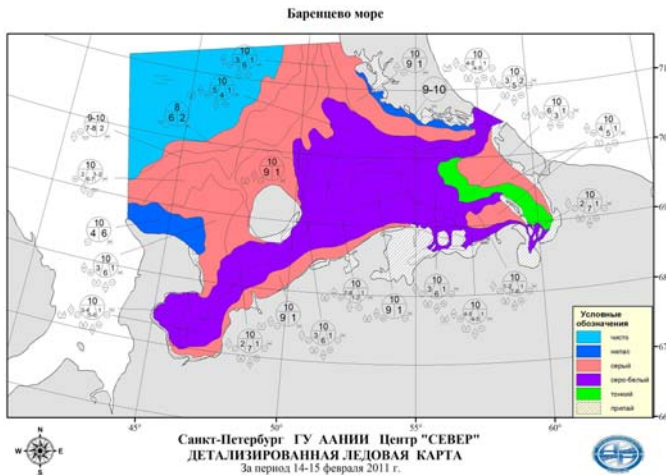


Рис. 4. Фактическое распределение молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря 15 февраля 2011 г. по данным ИСЗ.
Fig. 4. Actual distribution of young and first year ice in the south-eastern Barents Sea on February 15, 2011 (satellite data).

Известно, что в последние полтора десятилетия на акватории всего Баренцева моря устойчиво сохраняется тенденция к сохранению отрицательной аномалии площади, занятой льдом, не только в осенне-зимний период, но и на протяжении всего годового цикла.

Предлагаемый метод долгосрочного прогноза распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря опосредованно учитывает уменьшение площади, занятой льдами в этой части

Баренцева моря, характерное для начала XXI века, поскольку в численные значения самого значимого прогностического предиктора – ледовитости (при прогнозе типа ледовых условий) заложены фактические ее значения, охватывающие период с 1928 по 2011 г. Действительно, начиная с 2003 г. на данной акватории отмечался лишь средний, легкий и экстремально легкий тип ледовых условий, т. е. ледовитость юго-восточной части Баренцева моря была или близка к норме, или, как в большинстве случаев, наблюдалась ее отрицательная аномалия.

Таблица 10. Обобщенные результаты испытаний метода прогноза типов ледовых условий и распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря в осенне-зимний период заблаговременностью 30–45 суток

Table 10. Generalized results of verifying the method of ice conditions type and young and first year ice distribution forecast in the south-eastern Barents Sea in autumn-winter with advance period of 30-45 days

Характеристика	Район моря	Период	Р, %	Ркл, %	Э, %
Тип ледовых условий	юго-восточная часть Баренцева моря	осенне-зимний (декабрь – апрель)	96	65	31
Распределение молодых и однолетних льдов	юго-восточная часть Баренцева моря	осенне-зимний (декабрь – апрель)	82	61	21

Примечание. Р – оправдываемость прогноза за четыре года; Ркл – обеспеченность метода климатическая; Э – эффективность метода.

Успешные испытания метода прогноза на независимом материале, когда привлекались значения площади, занятой льдом с 2013 по 2017 г., показали правильность численных значений выявленных предикторов и, в первую очередь, самого значимого из них – ледовитости, а следовательно, подтвердили опосредованный учет климатических изменений в бассейне Северного Ледовитого океана в методе прогноза распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря в осенне-зимний период. Следует отметить, что впервые с 1928 г. на протяжении последних 17 лет (с 2003 по 2019 г. включительно) в юго-восточной части Баренцева моря в осенне-зимний период не отмечались не только экстремально тяжелые, но и просто тяжелые ледовые условия. В 8 случаях ледовые условия были близкими к средним, в 4 случаях легкими и в 5 случаях экстремально легкими, т. е. в этой части Баренцева моря в течение всего этого периода устойчиво преобладала отрицательная аномалия ледовитости. Сохраняется эта тенденция и поныне, и она в полной мере учитывается в данном методе и находит свое отражение в достаточно высокой оправдываемости долгосрочных прогнозов распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря в осенне-зимний период.

Особенность предлагаемого метода заключается в том, что появляется возможность долгосрочного прогноза распределения молодых и однолетних льдов в активной с точки зрения судоходства акватории, использование которого в практике повысит экономический эффект морских операций начиная со стадии их планирования.

Заключение

ЦМКП Росгидромета на заседании 21 ноября 2018 года рекомендовала:

– одобрить работу ФГБУ «ААНИИ» по разработке метода долгосрочного прогноза распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря в осенне-зимний период с заблаговременностью 30-45 суток;

– ФГБУ «ААНИИ» внедрить метод долгосрочного прогноза распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря в осенне-зимний период с заблаговременностью 30-45 суток в оперативную практику ФГБУ «ААНИИ» в качестве основного.

В заключении хочется почтить память старейшего сотрудника ФГБУ «ААНИИ» Анатолия Александровича Лебедева, стоявшего у истоков создания метода долгосрочного прогноза распределения молодых и однолетних льдов в юго-восточной части Баренцева моря в осенне-зимний период. Немало его труда было отдано сбору исходного материала, а идеи, заложенные им при создании алгоритма прогноза, были развиты последователями и нашли свое выражение в законченном методе прогноза. Рекомендация ЦМКП к использованию метода в качестве основного в ФГБУ «ААНИИ» есть дань уважения и к вкладу Анатолия Александровича в его создание.

Список литературы

1. Международная символика для морских ледовых карт и номенклатура морских льдов. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 56 с.
2. РД 52.27.759-2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. М.: Триада лтд, 2011. С. 79-89.
3. *Спичкин В.А.* Определение критерия крупной аномалии // Труды ААНИИ. 1987. Том 402. С. 15-20.

References

1. *Mezhdunarodnaya simbolika dlya morskikh ledovykh kart i nomenklatura morskikh l'dov.* Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1984, 56 p. [in Russ.].
2. *RD 52.27.759-2011. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. CHast' III. Sluzhba morskikh gidrologicheskikh prognozov.* Moscow, Triada LTD publ., 2011, pp. 79-89 [in Russ.].
3. *Spichkin V.A.* Opredelenie kriteriya krupnoi anomalii. *Trudy AANII*, 1987, vol. 402, pp. 15-20 [in Russ.].

*Поступила в редакцию 04.03.2019 г.
Received by the editor 04.03.2019.*