

*С.В. Клячкин, З.М. Гудкович, Р.Б. Гузенко, Р.И. Май*

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЬДОВ В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ОХОТСКОГО МОРЯ ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ 1–5 СУТОК**

### **Введение**

Актуальность задачи краткосрочного прогноза эволюции ледяного покрова в районах активной хозяйственной деятельности представляется очевидной. Это в полной мере относится к юго-западной части Охотского моря (восточный шельф о. Сахалин), где осуществляется добыча и транспортировка углеводородного сырья. До настоящего времени в России не было специально адаптированной к этому региону методики, позволяющей составлять краткосрочные ледовые прогнозы в оперативном режиме и представлять их с использованием современных средств визуализации.

В 2009–2011 гг. в ФГБУ «АНИИ» была выполнена работа, направленная на адаптацию методики прогноза эволюции ледяного покрова, основанной на численной динамико-термодинамической модели, к условиям юго-западной части Охотского моря. Данная методика (и, соответственно, модель) была ранее разработана в АНИИ и хорошо себя зарекомендовала при составлении ледовых прогнозов для арктических и замерзающих неарктических морей. В 2011 г. методика прошла авторские, а в 2013 г. — производственные испытания, показавшие вполне удовлетворительные результаты. Результаты испытаний получили положительную оценку Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и геологическим прогнозам (ЦМКП Росгидромета), и методика была рекомендована к внедрению.

Описание методики дано в [1], в настоящей статье **излагают** порядок проведения и результаты производственных испытаний.

### Численная реализация модели

Для испытания и отладки численной схемы модели была принята регулярная сетка с шагом 5,6 км (общая размерность матрицы 81×212 ячеек, рис. 1). Временной шаг модели составляет: для тепловых процессов в воде и льду – 12 часов, для динамических – 10 минут, что соответствует условию Куранта.

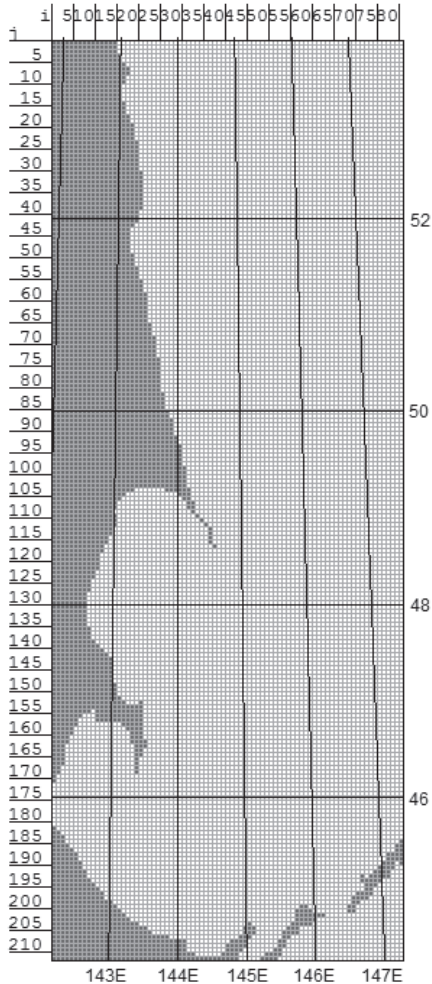


Рис. 1. Расчетная сетка для юго-запада Охотского моря.

Для расчетов течений, температуры и солёности воды использовались явные численные схемы, основанные на направленных конечно-разностных аппроксимациях производных.

Ледяной покров представлен набором маркеров, каждый из которых характеризуется пространственными координатами в декартовой системе, толщиной, торосистостью, разрушенностью и скоростью.

Термическое изменение толщины рассчитывается отдельно для каждого маркера. В случае полного вытаявания какого-либо маркера он исключается из дальнейших расчетов. После расчета изменения толщины маркеров выполняется оценка частной сплоченности по стандартным возрастным градациям и оценка средней толщины льда каждого возраста. Применительно к Охотскому морю используется 5 возрастных градаций: нилас (0–10 см), серый (10–15 см), серо-белый (15–30 см), 1-летний тонкий (30–70 см), 1-летний средний (70–120 см).

Расчет дрейфа льда основан на лагранжевском методе. Для каждого маркера определяется его скорость и перемещение через каждые 10 минут. В начальный момент времени маркеры считаются неподвижными.

Силы внутреннего взаимодействия, возникающие при дрейфе, определяются в соответствии с эйлеровским подходом и считаются одинаковыми в пределах ячейки.

Выторашиваемые маркеры исключаются из дальнейшего расчета, а их суммарная толщина равномерно распределяется среди оставшихся маркеров данной ячейки как прибавка толщины за счет торосов.

Использование метода маркеров позволяет автоматически выполнять условие сохранения массы и полностью исключить проблемы, связанные с вычислительной вязкостью.

### **Технологическая реализация модели**

Большая часть программного обеспечения технологии написана на алгоритмическом языке FORTRAN, некоторые операции – на встроенном языке ГИС ArcView-3.2 и ArcMap-8.1.

В качестве исходных данных по ледяному покрову используются электронные ледовые карты в векторном формате типа «шейп-файл», совместимые с ГИС ArcView и ArcMap. Преобразование ледовой информации из формата обзорной карты в формат численной модели может выполняться двумя способами.

*Основной способ.* Ледовая карта представляется в виде векторного шейп-файла, содержащего информацию о границах ледовых зон и о характеристиках льда в каждой зоне. В этом случае специальная программа, работающая в среде ГИС ArcView, сопоставляет координаты границ ледовых зон с координатами ячеек расчетной сетки модели и формирует цифровой файл-матрицу в формате ASCII, содержащий информацию о характеристиках ледяного покрова по каждой ячейке сетки.

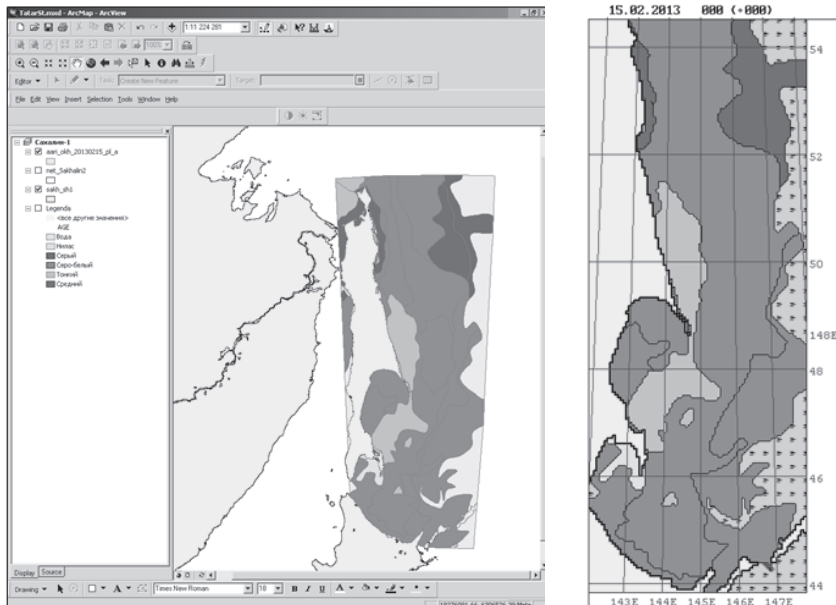
*Запасной способ.* Ледовая карта представлена в виде твердой копии или в растровом графическом формате. В этом случае используется специальный графический редактор, позволяющий в интерактивном режиме воспроизводить на экране монитора ледовую карту (т. е. границы однородных ледовых зон) и вводить характеристики ледяного покрова по каждой зоне. Затем программа также сопоставляет координаты границ ледовых зон с координатами ячеек расчетной сетки модели и формирует цифровой файл-матрицу в формате ASCII, содержащий информацию о характеристиках ледяного покрова по каждой ячейке сетки.

Первый (основной) способ позволяет существенно повысить точность и экономить затраты времени и труда. Однако, как показал опыт, второй (запасной) способ по тем или иным причинам также нередко бывает востребован.

На рис. 2 показан пример ледовой карты в векторном формате «шейп-файл», визуализированной с помощью ГИС ArcMap (до преобразования), и соответствующий файл-матрица в формате ASCII, визуализированной с помощью специальной программы на языке FORTRAN (после преобразования).

Подготовка гидрологических данных заключается в коррекции среднего климатического поля температуры воды в соответствии с фактическим распределением ледяного покрова.

В качестве нулевого приближения исходных данных по термохалинной структуре моря используются средние сезонные (месячные) поля температуры и солености воды на стандартных горизонтах [4]. Для получения соответствия между полем температуры воды и фактическим распределением ледяного покрова на момент составления прогноза применяется специально разработанная автоматическая процедура коррекции. Ее суть заключается в следующем:



**Рис. 2. Ледовая карта в векторном формате «шейп-файл» (слева) и в формате ASCII (справа).**

– в зонах чистой воды температура рассчитывается с помощью эмпирической зависимости, аргументом которой является расстояние до кромки льда;

– в зонах, покрытых льдом сплоченностью менее 5 баллов, температура рассчитывается с помощью эмпирической зависимости, аргументом которой является сплоченность льда;

– в зонах, покрытых льдом сплоченностью 5 баллов и больше, температура равна точке замерзания.

В результате действия этой процедуры пересчитываются значения температуры воды в пределах верхнего квазиоднородного слоя (соленость не корректируется по причине значительной инерционности этого параметра). Результирующие поля температуры и солености записываются в матричный файл в формате ASCII.

В качестве данных метеорологического форсинга используются данные глобальной атмосферной модели Европейского центра

среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП). Подготовка метеорологических данных заключается в преобразовании прогностических полей приземной температуры и атмосферного давления с пространственным шагом  $2,5^\circ$  из формата глобальной модели атмосферы в формат прогностической численной модели ледяного покрова.

Результаты расчетов записываются в виде набора цифровых файлов в формате ASCII. Файлы имеют стандартное имя «ICE-FRC\_[ууууmmddhh].[aaa]», где уууу, mm, dd, hh – год, месяц, дата и час составления исходной ледовой карты, aaa – заблаговременность прогноза (в часах). Заблаговременность меняется от значения «000» (исходная ситуация) до значения 24N, где N – длительность расчетного периода (в сутках). Дискретность записи результатов определяется перед выполнением расчета и может составлять 1, 3, 6 и 12 часов.

Программное обеспечение технологии предоставляет возможность осуществлять визуализацию результатов непосредственно на рабочем месте в виде карт-схем. Все программы, выполняющие визуализацию, написаны на языке FORTRAN. С помощью стандартных средств WINDOWS карты-схемы можно копировать в буфер и сохранять в форме отдельных растровых графических файлов.

На рис. 3 представлены примеры прогностических карт-схем.

Кроме того, результаты прогноза могут быть преобразованы в векторный файл в формате ГИС ArcView (шейп-файл).

Также прогностические результаты могут представляться в табличном виде. Таблица включает любые выбранные характеристики океана, ледяного покрова и атмосферы по любым выбранным ячейкам сетки.

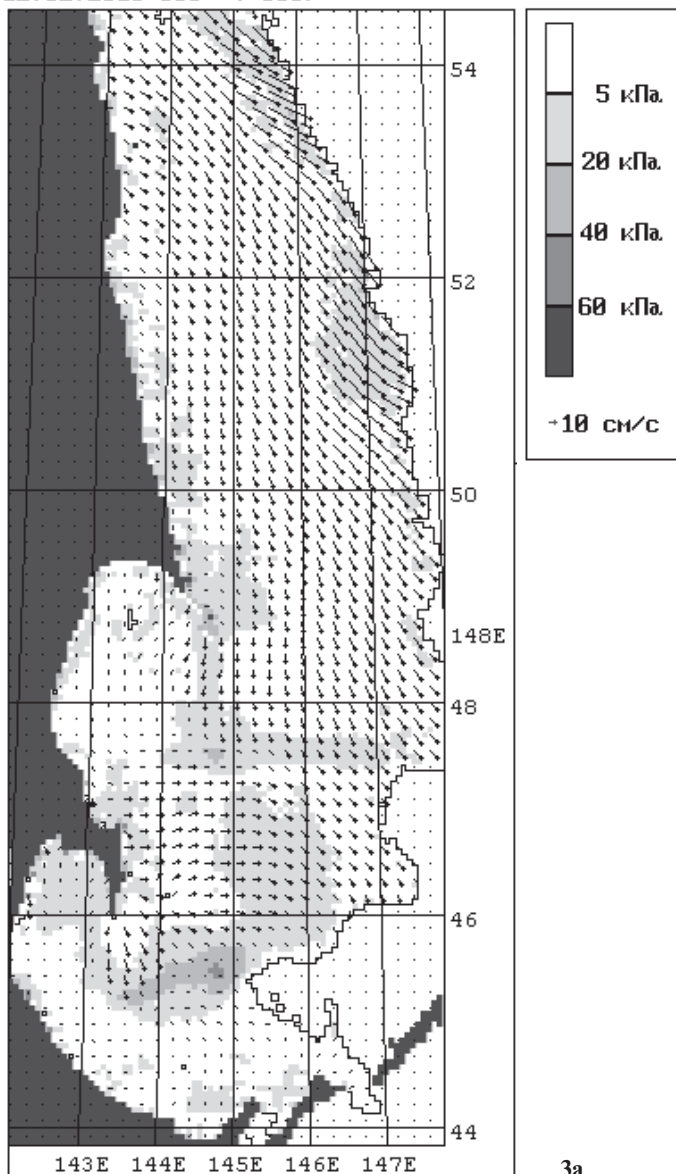
### **Порядок оценки достоверности прогнозов**

Оценка достоверности прогнозов выполнялась по сплоченности льда (общей и частной), т. к. это единственный параметр ледяного покрова, который четко и однозначно указывается на ледовых картах.

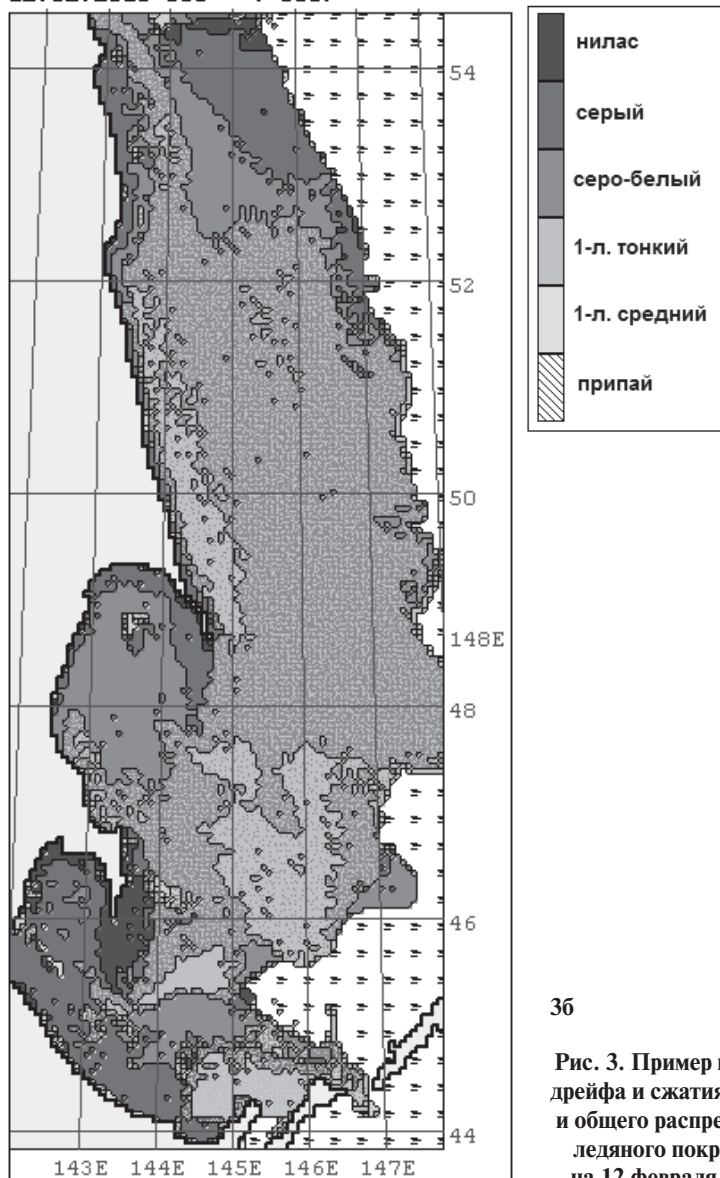
Для оценки качества расчетов сплоченности льда использовались две характеристики, рекомендуемые руководящим документом [3]: оправдываемость и эффективность.

Для получения оценки оправдываемости и эффективности прежде всего необходимо определить, оправдался или не оправдался прогноз в каждой ячейке сетки. Для этого используется простой принцип:

12.02.2013 000 (+096)



12.02.2013 000 (+096)



36

Рис. 3. Пример прогноза дрейфа и сжатия льда (а) и общего распределения ледяного покрова (б) на 12 февраля 2013 г.



попали или не попали сравниваемые значения сплоченности льда в данной ячейке в одну и ту же стандартную градацию [2]. Если попали, значение оправдываемости в данной ячейке приравнивается единице, в противном случае – нулю.

Далее по значениям оправдываемости в отдельных ячейках получают оценки оправдываемости  $P$  и эффективности  $E$  прогноза в целом по расчетной области.

Под оправдываемостью прогноза понимается величина:

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \cdot 100 \% , \quad (1)$$

где  $P_i$  – оправдываемость прогноза в  $i$ -ой ячейке (равная либо единице, либо нулю);  $n$  – количество ячеек сетки, в которых производится сопоставление.

Под эффективностью прогноза, заблаговременность которого не превышает 15 суток, понимается величина:

$$E = P - P_{inert} , \quad (2)$$

где  $P_{inert}$  – оправдываемость так называемого инерционного прогноза.

Инерционный прогноз – это прогноз, основанный на допущении, что к концу прогностического срока значение прогнозируемой характеристики будет таким же, как в начале, т. е. в момент составления прогноза. Оправдываемость инерционного прогноза получается путем сравнения фактических начальных и фактических конечных значений исследуемого элемента, причем используются те же формальные процедуры, что и при оценке оправдываемости модельного прогноза. Иными словами, эффективность прогноза (расчета) показывает, какое из двух предположений заслуживает большего доверия: «завтра будет то, что обещает прогностическая модель» или «завтра будет то же, что и сегодня».

Таким образом, для оценки прогностического метода применяются две характеристики: оправдываемость и эффективность. Чтобы метод был признан удовлетворительным, необходимо, чтобы оправдываемость была достаточно высока (формально минимальные

значения не установлены, но традиционно принимается величина 70–75 %), а эффективность должна быть положительной. Если хотя бы одно из этих условий не выполняется, то данный прогноз считается неудачным.

Понятно, что при оценках ошибок прогнозов учитывается только та часть расчетной области, по которой имеется как исходная, так и конечная фактическая (контрольная) информация. Когда значительные части расчетной области не освещены натурными данными, и зоны начальных и контрольных данных не пересекаются, оценить прогноз невозможно.

### **Порядок проведения испытаний**

Опытная эксплуатация представляла собой составление регулярных прогнозов в оперативном режиме в течение примерно 2 месяцев.

Прогнозы составлялись 2 раза в неделю (по вторникам и пятницам) и имели заблаговременность 3 или 4 суток. В общей сложности было составлено 16 прогнозов, из них 8 – заблаговременностью 3 суток и 8 – заблаговременностью 4 суток. Первый прогноз был составлен 29 января, последний – 22 марта.

В качестве исходной и контрольной информации использовались ледовые карты, составленные специалистами ФГБУ «АНИИ» по спутниковым снимкам NOAA и MODIS-TERRA в видимом диапазоне среднего разрешения.

В качестве данных метеорологического форсинга использовались данные глобальной модели ЕЦСПП.

### **Результаты испытаний**

Прогнозы оценивались как по общей сплоченности, так и по частным сплоченностям отдельных возрастных градаций.

В таблице представлены значения достоверности прогнозов.

Из таблицы видно, что в среднем оправдываемость прогнозов общей сплоченности составила более 87 % при эффективности +4,4 %. Такой результат представляется вполне удовлетворительным, т. к. в течение всей прогностической серии на акватории расчетной области присутствовала кромка льда, и, соответственно, изменчивость общей сплоченности была довольно заметной.

Таблица

**Результаты оценки качества (оправдываемость и эффективность) прогнозов общей и частной сплоченности льда (январь–март 2013 г.) в Охотском море на основе численной динамико–термодинамической модели «лед–океан» заблаговременностью 3–4 суток**

Дата составления	Дата проверки	Общая		Молодой		Тонкий		Средний	
		Опр.	Эфф.	Опр.	Эфф.	Опр.	Эфф.	Опр.	Эфф.
29.01.2013	01.02.2013	89,4	1,4	86,7	3,5	89,6	1,8	100,0	0,0
01.02.2013	05.02.2013	85,8	13,6	76,3	8,7	82,1	4,0	100,0	0,0
05.02.2013	08.02.2013	90,1	2,8	77,8	5,9	81,9	5,9	100,0	0,0
08.02.2013	12.02.2013	84,4	1,9	78,8	7,0	80,5	4,6	100,0	0,0
12.02.2013	15.02.2013	86,1	7,2	85,2	4,6	88,9	4,8	100,0	0,0
15.02.2013	19.02.2013	83,4	4,9	78,9	−0,8	83,0	−0,6	100,0	0,0
19.02.2013	22.02.2013	89,3	9,4	81,8	2,7	84,4	8,0	99,8	0,1
22.02.2013	26.02.2013	92,2	6,7	83,3	7,3	81,9	9,8	78,7	10,7
26.02.2013	01.03.2013	92,6	4,8	84,9	−1,6	87,7	−1,7	93,9	3,0
01.03.2013	05.03.2013	80,4	2,8	73,5	−1,0	86,2	6,2	88,1	2,6
05.03.2013	08.03.2013	82,5	1,4	78,1	0,7	86,6	−1,2	90,8	−0,4
08.03.2013	12.03.2013	89,3	2,1	82,1	−0,5	86,3	3,8	85,6	5,5
12.03.2013	15.03.2013	90,3	3,0	84,2	2,1	91,8	−1,1	89,1	6,6
15.03.2013	19.03.2013	92,2	6,4	82,1	−4,7	90,5	3,8	86,6	10,2
19.03.2013	22.03.2013	87,5	−0,1	84,5	−4,1	92,8	4,2	83,9	12,1
22.03.2013	26.03.2013	80,4	2,5	75,9	−3,5	79,2	12,5	85,6	7,0
<b>В среднем</b>		<b>87,2</b>	<b>4,4</b>	<b>80,9</b>	<b>1,6</b>	<b>85,8</b>	<b>4,1</b>	<b>92,6</b>	<b>3,6</b>

Оправдываемость прогнозов частной сплоченности молодого льда составила в среднем около 81 % при эффективности +1,6 %. Хотя оправдываемость оказалась не слишком высокой, однако положительная эффективность дает основание признать этот результат удовлетворительным, особенно учитывая факт постоянного присутствия в пределах расчетной области кромки льда.

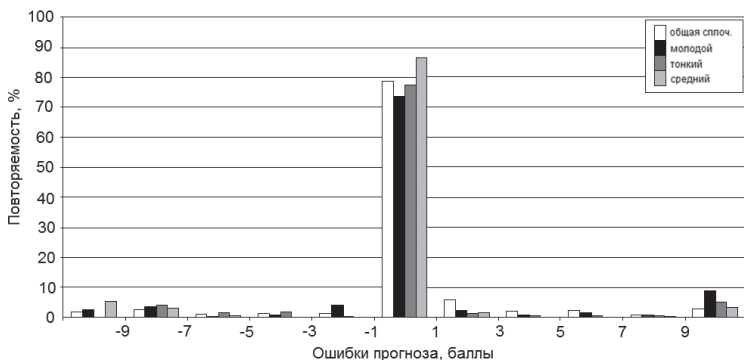
Оправдываемость прогнозов частной сплоченности 1-летнего тонкого льда составила почти 86 % при эффективности более 4 %. Такой результат представляется вполне удовлетворительным.

Оправдываемость прогнозов частной сплоченности 1-летнего льда средней толщины составила почти 93 % при эффективности 3,6 %. Такой

результат также можно признать вполне удовлетворительным. Необходимо обратить внимание, что с середины февраля 1-летние средние льды вообще отсутствовали в этом районе, из-за чего оправдываемость прогнозов была равна 100 % при нулевой эффективности. При осреднении это привело к завышению оправдываемости и занижению эффективности. Если оценивать достоверность прогнозов 1-летних средних льдов начиная с момента их появления, то оправдываемость составит 88,2 % при эффективности 5,7%, что также вполне удовлетворительно.

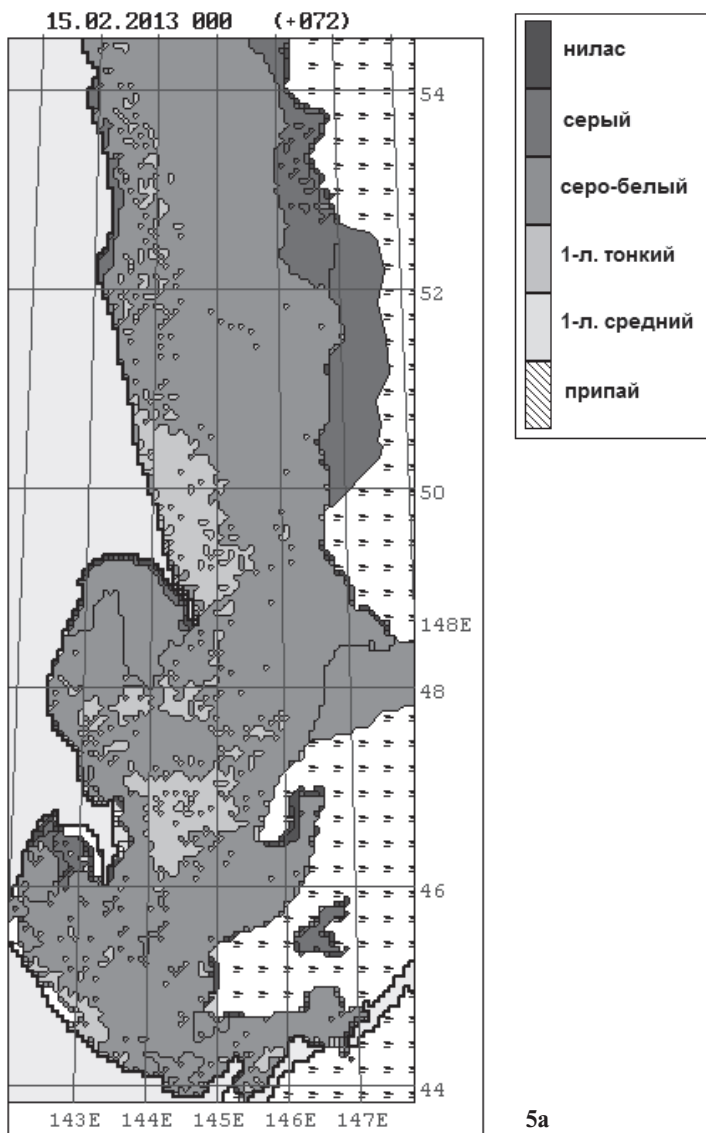
Увеличение заблаговременности прогнозов приводит к снижению оправдываемости и росту эффективности. Средняя оправдываемость прогнозов общей сплоченности заблаговременностью 3 суток оказалась выше, чем 4-суточных, на 2,5 %, а эффективность – ниже на 1,4 %. То же относится к прогнозам частной сплоченности: оправдываемость 3-суточных прогнозов в среднем на 4,1 % выше, чем 4-суточных, эффективность – ниже на 1,6 %.

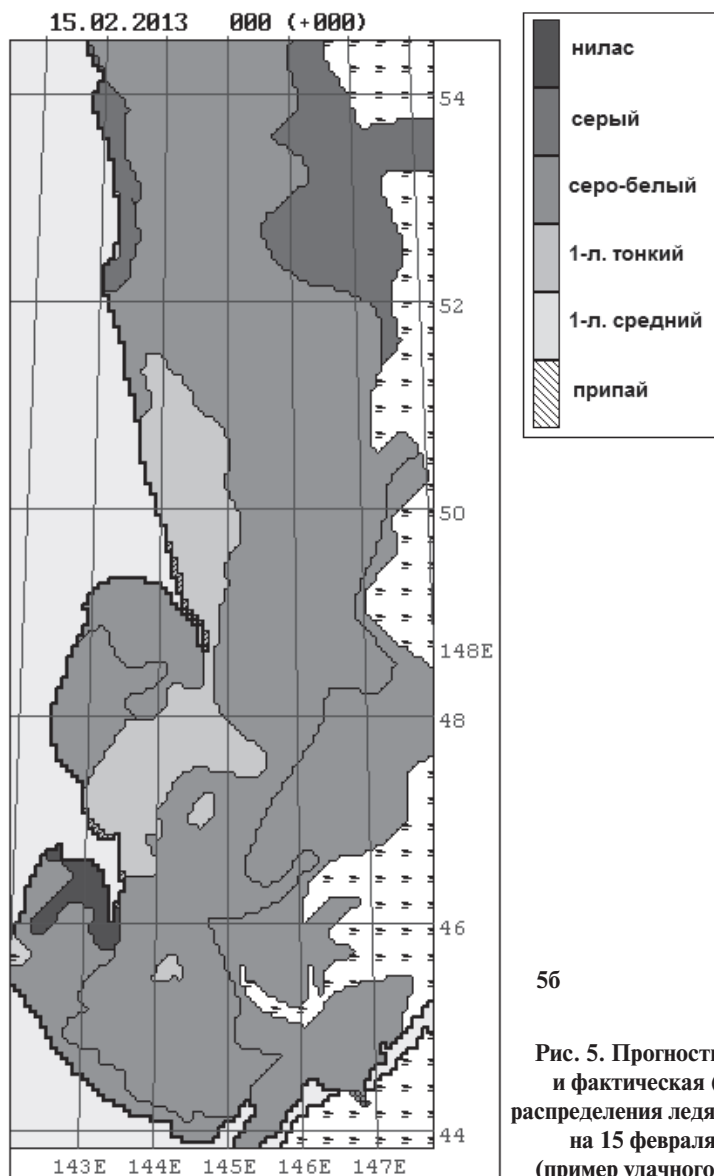
На рис. 4 представлена гистограмма распределения ошибок прогнозов общей и частной сплоченности льда. Большинство ошибок прогнозов (около 80 %) группируется в пределах  $\pm 1$  балл. Гистограмма ошибок не имеет явной асимметрии, т. е. систематическая ошибка отсутствует. Повторяемость грубых ошибок (более 7–9 баллов по абсолютному значению) по общей сплоченности ничтожна, а по частным – несколько более заметна. Это и привело к несколько меньшей оправдываемости прогнозов частной сплоченности.



**Рис. 4. Гистограмма распределения ошибок прогнозов общей и частной сплоченности льда.**

На рис. 5 и 6 представлены примеры удачного и неудачного прогноза.

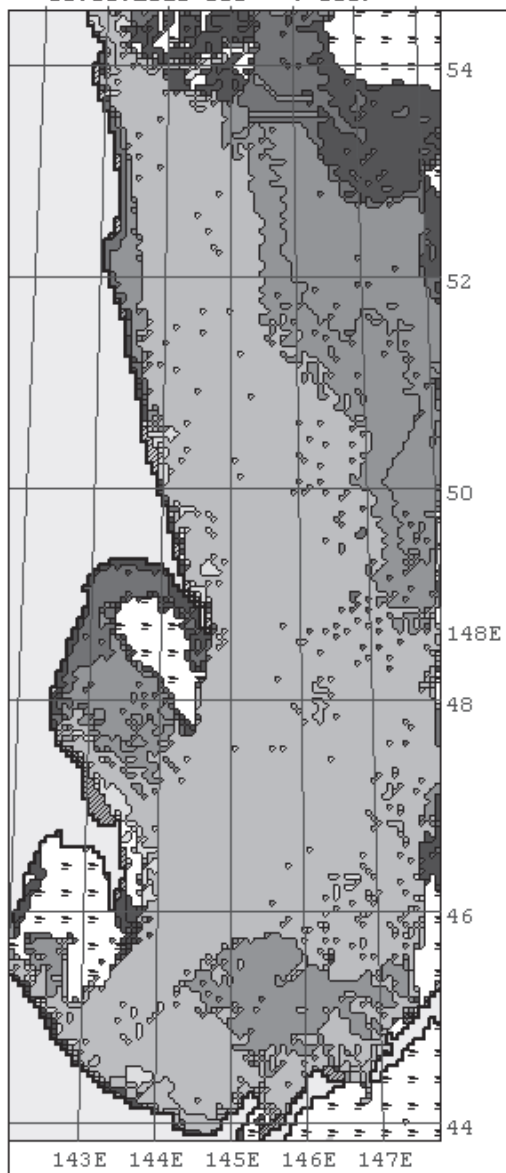




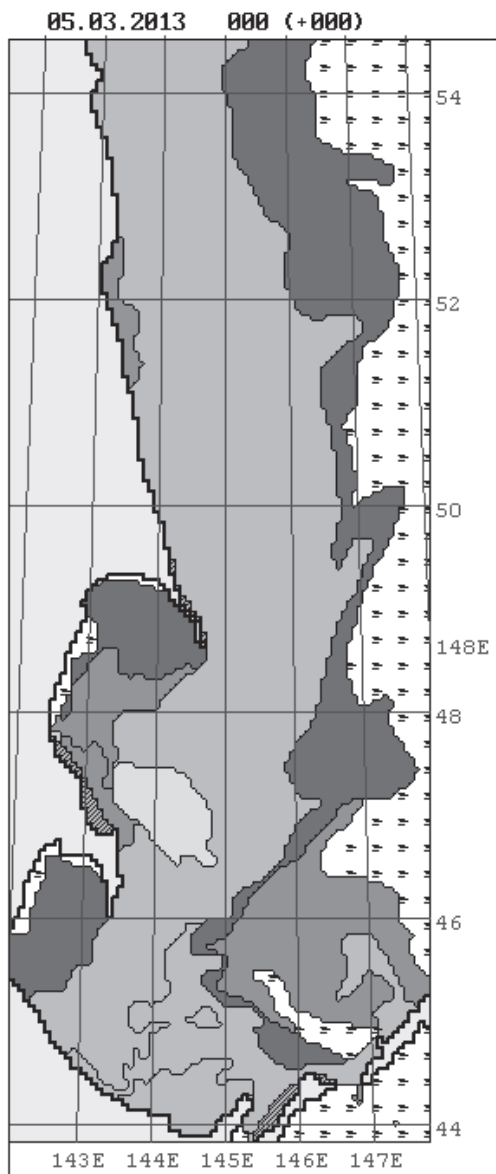
56

Рис. 5. Прогностическая (а) и фактическая (б) карты распределения ледяного покрова на 15 февраля 2013 г. (пример удачного прогноза).

05.03.2013 000 (+096)



ба



66

Рис. 6. Прогностическая (а) и фактическая (б) карты распределения ледяного покрова на 05 марта 2013 г. (пример неудачного прогноза).



## Заключение

По результатам проведенных испытаний Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета (ЦМКП) от 5 ноября 2013 г. приняла следующее решение:

– внедрить метод прогноза распределения ледяного покрова Охотского моря на основе численной динамико-термодинамической модели «лед–океан» заблаговременностью до 5 суток (ФГБУ «АНИИ», С.В. Клячкин, З.М. Гудкович, Р.Б. Гузенко, Р.И. Май) в оперативную практику АНИИ.

## Список литературы

1. *Клячкин С.В., Гудкович З.М., Гузенко Р.Б., Май Р.И.* Численная модель прогноза распределения льдов в юго-западной части Охотского моря с заблаговременностью 1–5 суток // Труды Гидрометцентра России. – 2015. – Вып. 353. – С. 63–87.
2. Международная символика для морских ледовых карт и номенклатура морских льдов. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 56 с.
3. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. – М.: ТРИАДА ЛТД, 2011. – 102 с.
4. *Conkright, M.E., Locarnini R.A., Garcia H.E., O'Brien T.D., Boyer T.P., Stephens C., Antonov J.I.* World Ocean Atlas 2001: Objective Analyses, Data Statistics and Figures, CD-ROM Documentation. National Oceanographic Data Center, 2002. – Silver Spring, MD. – 17 p.