

*С.В. Клячкин, Р.Б. Гузенко, Р.И. Май,
Е.Б. Саперштейн, И.А. Сергеева, С.И. Ярославцева, В.В. Драбкин*

**МЕТОДИКА ПРОГНОЗА ДРЕЙФА ЛЬДОВ
В БЕЛОМ МОРЕ НА ПЕРИОД ДО 5 СУТОК
НА ОСНОВЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ЧИСЛЕННОЙ
ДИНАМИКО-ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

*Арктический и антарктический научно-исследовательский
институт, г. Санкт-Петербург*

Введение

В 2017–2019 гг. в ФГБУ «АНИИ» разрабатывалась методика прогноза дрейфа льдов в Белом море на период до 5 суток на основе усовершенствованной численной динамико-термодинамической модели.

В 2020–2021 гг., т. е. уже после окончания срока реализации проекта, была выполнена серия производственных испытаний в ретроспективном режиме.

Описание прогностической методики

В качестве океанского блока в модели АНИИ используется модель Принстонского университета (Princeton Ocean Model, модель ПОМ) [11, 14].

Главной особенностью этой модели является описание вертикальной структуры океана с помощью так называемых σ -координат, т. е. фиксированного количества слоев, толщина которых переменна и зависит от глубины места. Система уравнений модели включает уравнения движения, неразрывности, баланса турбулентной энергии, диффузии тепла и солей.

На открытой границе для баротропной моды задаются функция расхода воды и приливные явления, предвычисленные по гармоническим постоянным восьми главных приливных волн [12], для бароклинной моды используется условие излучения [8, 14].

Условия на границе «океан – атмосфера» определяются потоками тепла (турбулентными и радиационными) и обменом импульсом [13, 15, 16].

Термическая эволюция ледяного покрова основывается на уравнении теплового баланса двухслойной среды «лед – снег» [9].

Динамика ледяного покрова рассчитывается на основе уравнения движения, где в правой части присутствуют слагаемые, описывающие касательные напряжения на верхней и нижней поверхностях льда, силу Кориолиса, силу, обусловленную наклоном уровня, и силу внутреннего взаимодействия в ледяном покрове.

Напряжения на поверхностях льда, обусловленные воздействием ветра и течений, оцениваются с помощью известного квадратичного закона [3], при этом коэффициенты трения зависят от торосистости льда. Сила Кориолиса и проекция силы тяжести на поверхность моря задаются традиционно.

В данной модели считается, что ледяной покров проявляет свойства, характерные для вязкопластических сред. Вязкое взаимодействие в ледяном покрове подробно рассмотрено в [1]. Отличительной особенностью деформирования пластических сред является наличие порогового механизма, т. е. среда деформируется при достаточно больших внешних нагрузках. Если напряжения в ледяном покрове превышают некоторый предел, то в этом случае модель допускает возможность торшения, т. е. накопления «лишнего» объема льда в пределах некоторой площади (ячейки сетки). В данном случае этот предел оценивается как устойчивость ледяной пластины, лежащей на упругом основании, по отношению к продольному изгибу [10]. Если напряжение недостаточно, то, чтобы накопления лишнего объема не происходило, применяется специальный искусственный прием, заключающийся в итеративной коррекции поля дрейфа в соответствии с условием неотрицательной дивергенции.

Описанный принцип, по существу, имитирует пластическое поведение ледяного покрова.

На твердой границе при нажимном дрейфе нормальная к берегу компонента равна нулю, касательная компонента дрейфа трансформируется в зависимости от угла между направлением дрейфа и направлением береговой черты. На кромке льда напряжения равны нулю.

На границах расчетной области при дрейфе, направленном внутрь расчетной области, градиенты сплоченности (общей и частной) и скорости равны нулю; при выносном дрейфе градиенты сплоченности и скорости на границе равны соответствующим градиентам в ближайшей внутренней ячейке.

Численная схема модели построена на основе равноплощадных сеток, причем пространственный шаг сетки может варьироваться от 5 до 50 км в зависимости от размеров модельной области. В данном случае пространственная детализация модели составляет 10 км (рис. 1).

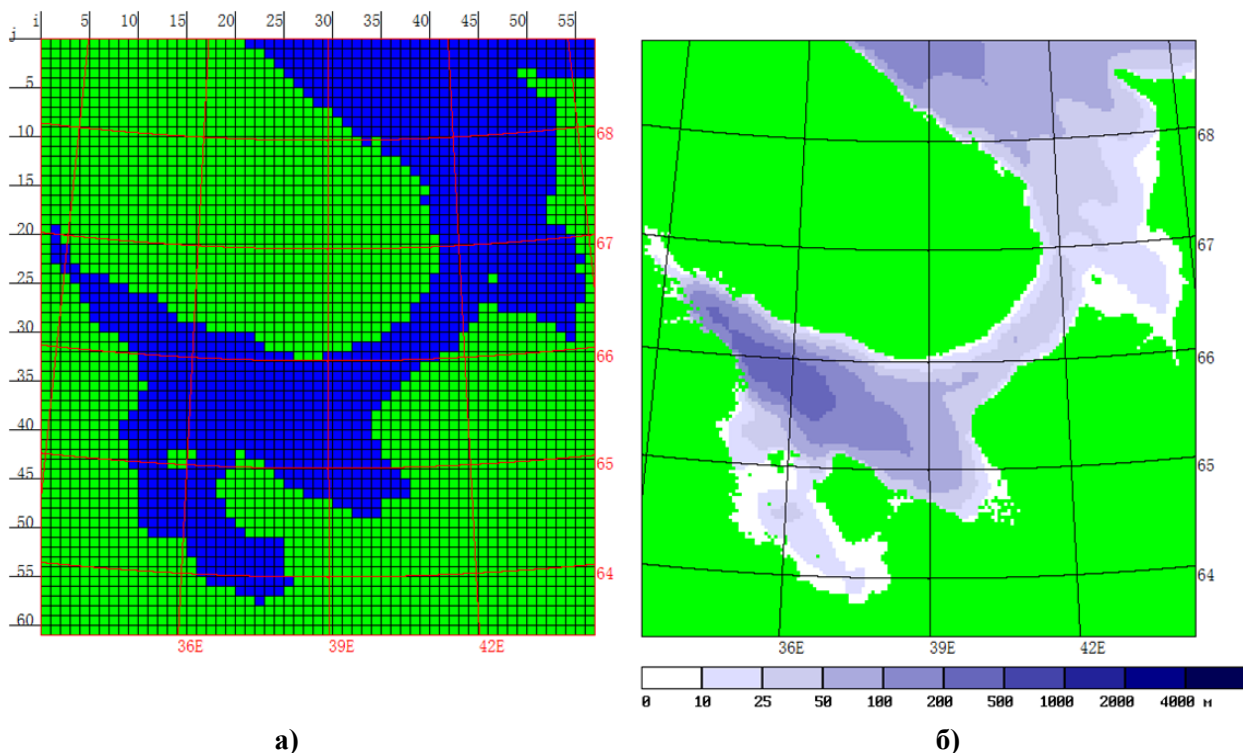


Рис. 1. Расчетная сетка (а) и схема глубин (б) Белого моря.

Временной шаг модели составляет:

- в океанском блоке для баротропного модуля – 5 секунд, для бароклинного – 2,5 минуты;
- в ледовом блоке для расчета динамики – 10 минут, для расчета теплового нарастания (таяния) – 1 час.

Временная дискретность обмена условиями между льдом и океаном составляет 1 час. Перед выполнением собственно прогностического расчета осуществляется «разгон» океана, продолжительность которого составляет 10 приливных циклов.

Ледяной покров представлен набором маркеров, каждый из которых характеризуется пространственными координатами в декартовой системе, толщиной, прибавкой толщины за счет торосов и скоростью. Перемещение и термическое изменение толщины рассчитывается отдельно для каждого маркера.

Силы внутреннего взаимодействия, возникающие при дрейфе, считаются одинаковыми в пределах ячейки. Выгораживаемые маркеры исключаются из дальнейшего расчета, а их

суммарная толщина равномерно распределяется среди оставшихся маркеров данной ячейки как прибавка толщины за счет торосов. Соотношение толщины ровного льда и прибавки толщины, обусловленной торосами, определяет торосистость данного маркера, которая, как отмечалась выше, учитывается при расчете тангенциальных напряжений на поверхностях льда.

Главным источником первичных фактических данных по ледяному покрову в настоящее время являются спутниковые снимки в различных спектральных диапазонах и с различной разрешающей способностью, на основе которых составляются электронные ледовые карты в соответствии с международным стандартом передачи ледовых данных SIGRID-3. Если на фактической ледовой карте есть зоны, по которым данные отсутствуют, такие пробелы восполняются из результатов предыдущего прогноза. Поскольку ледовые карты, построенные в соответствии со стандартом SIGRID-3, не содержат информации о толщине, торосистости и разрушенности льда в явном виде, то значения этих характеристик берутся из результатов предшествующего расчета (прогноза).

Подготовка гидрологических данных заключается в применении специальной процедуры согласования результатов предыдущего прогноза температуры и солености воды с фактическим распределением ледяного покрова на момент составления нового прогноза.

В качестве данных метеорологического форсинга используются результаты глобальной модели атмосферы Глобальной Прогностической Системы США (Global Forecasting System, GFS). Эти данные представляют собой бинарные матрицы прогностических полей приземной температуры воздуха и атмосферного давления на уровне моря в регулярной сферической сетке с шагом $0,5^\circ$, временной дискретностью 3 часа и заблаговременностью от 0 (диагноз) до 168 часов.

Порядок оценки достоверности прогнозов

Оценка достоверности ледовых прогнозов по Белому морю выполнялась по трем ключевым параметрам ледяного покрова: сплоченность льда (общей и частной), толщина льда и дрейф льда. Кроме того, достоверность прогнозов оценивалась также по уровню моря.

Порядок оценки достоверности прогнозов упомянутых параметров ледяного покрова и океана учитывал существенное отличие характера данных, а именно: фактические данные по сплоченности льда – это значения, определенные по спутниковому снимку, и отнесенные к каждой ячейке сетки, данные по толщине и по уровню – это значения, измеренные на нескольких береговых станциях, данные по дрейфу льда – это отдельные вектора, определенные по паре последовательных спутниковых снимков.

Порядок оценки достоверности прогнозов сплоченности льда

Для оценки качества прогнозов (расчетов) сплоченности льда используются две основных меры: (1) функция распределения ошибок прогнозов и (2) сочетание оправдываемости и эффективности. Подробное описание алгоритма получения этих оценок приводится в работе [5].

Функция распределения ошибок прогноза позволяет оценить величину средней характерной ошибки ошибок (оценка математического ожидания распределения), повторяемость ошибок заданной величины, а также наличие и величину систематической ошибки (оценка асимметрии распределения). Оправдываемость прогноза – это отношение количества ячеек сетки, в которых прогноз оправдался, к общему количеству анализируемых ячеек. Эффективность прогноза – это разность между оправдываемостью модельного прогноза и оправдываемостью инерционного прогноза.

Прогноз сплоченности (общей или частной) в данной ячейке считается оправдавшимся, если прогностическое и фактическое значения попадают в одну и ту же стандартную градацию [6] либо если разность между прогностическим и фактическим значением не превышает 1 балл по абсолютному значению [7].

При оценках достоверности прогнозов сплоченности учитывается только та часть расчетной области, по которой имеется как исходная, так и конечная фактическая (контрольная) информация. Когда значительные части расчетной области закрыты облачностью и зоны начальных и контрольных данных не пересекаются, оценить прогноз невозможно.

Порядок оценки достоверности прогнозов толщины льда

Для оценки достоверности прогнозов толщины льда в качестве основной меры использовалась оправдываемость: отношение количества случаев, когда разность между прогностической и фактической толщиной льда не превышает предельно допустимую ошибку, к общему числу проанализированных случаев.

Наставление [7] рекомендует принимать предельно допустимую ошибку краткосрочного прогноза толщины льда равной 3 см при условии, что фактическое изменение толщины за период прогноза не превышает 10 см. По мере увеличения фактического изменения толщины предельно допустимая ошибка растет, т. е. требования к прогнозу смягчаются. В нашем случае фактическое изменение толщины льда за период прогноза ни разу не превысило 10 см, поэтому при оценке качества прогнозов принималось самое строгое значение предельно допустимой ошибки, а именно ± 3 см.

Порядок оценки достоверности прогнозов дрейфа льда

Для оценки достоверности прогнозов дрейфа льда были подсчитаны следующие статистики:

- средние арифметические и средние абсолютные ошибки по модулю скорости и по направлению дрейфа;
- коллинеарный и ортогональный коэффициенты корреляции между фактическим и прогностическим дрейфом [2, 4]:

$$r_{col} = \frac{I_{fo}}{\sqrt{I_f I_o}}, \quad r_{ort} = \frac{J_{fo}}{\sqrt{I_f I_o}}, \quad (1)$$

где I и J – линейные инварианты тензоров дисперсии, равные сумме главой диагонали тензора и разности боковой диагонали тензора соответственно.

Тензоры дисперсии определяются как

$$D_f = \begin{pmatrix} Dis(u_f) & Cov(u_f, v_f) \\ Cov(v_f, u_f) & Dis(v_f) \end{pmatrix}, \quad D_o = \begin{pmatrix} Dis(u_o) & Cov(u_o, v_o) \\ Cov(v_o, u_o) & Dis(v_o) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$D_{fo} = \begin{pmatrix} Cov(u_f, u_o) & Cov(u_f, v_o) \\ Cov(v_f, u_o) & Cov(v_f, v_o) \end{pmatrix}, \quad D_{of} = \begin{pmatrix} Cov(u_o, u_f) & Cov(u_o, v_f) \\ Cov(v_o, u_f) & Cov(v_o, v_f) \end{pmatrix},$$

где Dis – дисперсия; Cov – ковариация; индексы f и o означают «прогностический» («forecasted») и «наблюденный» («observed») соответственно;

- индекс векторной корреляции и угол поворота системы координат, необходимый для получения наибольшего индекса векторной корреляции:

$$\mu = \sqrt{r_{col}^2 + r_{ort}^2}, \quad \alpha_\mu = \arctan\left(\frac{r_{ort}}{r_{col}}\right); \quad (3)$$

- длины полуосей и ориентация большой оси эллипса рассеяния ошибок прогнозов;

$$\lambda_{1,2} = \frac{I + \sqrt{I^2 - 4 \det(D)}}{2}, \quad tg(2\alpha) = \frac{2Cov(U, V)}{Dis(V) - Dis(U)}; \quad (4)$$

- значения оправдываемости прогнозов модуля скорости и направления дрейфа (отношение числа случаев, когда ошибка не превышает предельно допустимое значение, к общему числу анализируемых случаев).

В качестве предельно допустимой ошибки, согласно Наставлению [7], приняты следующие значения:

- по модулю скорости – 20 % от среднего из максимальных значений модуля скорости (имеются в виду максимальные модули в каждой паре последовательных снимков). В данном случае эта величина составила $\pm 0,07$ м/с;

– по направлению – 20 % от максимально возможной ошибки. Поскольку максимально возможная ошибка прогноза направления дрейфа составляет 180°, то предельно допустимая ошибка принята равной ±18° (сектор шириной 36°).

Порядок оценки достоверности прогнозов уровня моря

Для оценки достоверности прогнозов уровня моря были подсчитаны следующие статистики:

- взаимно-корреляционная функция между наблюдаемыми и прогностическими значениями уровня при сдвигах от -2 часа до +2 часа;
- средняя амплитуда колебаний уровня по наблюдениям и по прогнозу;
- средняя алгебраическая разность между наблюдаемой и прогностической амплитудами;
- средняя абсолютная разность между наблюдаемой и прогностической амплитудами.

Кроме того, для прогнозов уровня также определялась оценка оправдываемости: количество случаев, когда разность между прогностическим и фактическим уровнем моря не превышает предельно допустимую ошибку, отнесенное к общему числу проанализированных случаев. В качестве предельно допустимой ошибки использовалась традиционная величина, вычисляемая с помощью формулы:

$$\Delta_x = 0,68\sigma(e), \quad (5)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение естественной изменчивости исследуемого элемента e , причем изменчивость оценивается во временных масштабах, соответствующих заблаговременности прогноза (расчета).

Согласно Наставлению [7], для краткосрочных прогнозов (заблаговременностью до 3 суток) установлены следующие критерии оправдываемости: менее 80 % – плохо, 80–87 % – удовлетворительно, 87–93 % – хорошо, более 93 % – отлично. Для среднесрочных прогнозов (заблаговременностью от 3 до 15 суток): менее 75 % – плохо, 75–84 % – удовлетворительно, 84–90 % – хорошо, более 90 % – отлично.

Порядок проведения испытаний

Испытания численной модели прогноза дрейфа и распределения льдов в Белом море заблаговременностью до 5 суток проводились в 2018–2021 гг.

Прогнозы составлялись в день появления ледовой карты, а следующая ледовая карта, появлявшаяся через несколько суток, использовалась для проверки предыдущего прогноза и задания начальных условий для следующего.

В зимние сезоны 2019/2020 и 2020/2021 гг. карты составлялись только по вторникам, соответственно, в эти сезоны оценивалась достоверность прогнозов сплоченности заблаговременностью только 7 суток. В зимний сезон 2018/2019 гг. карты составлялись по вторникам и пятницам, поэтому в сезон 2018/2019 гг. оценивались прогнозы заблаговременностью 3 и 4 суток. За зимний сезон 2018/2019 гг. было проверено 45 прогнозов, за сезон 2019/2020 гг. – 19 прогнозов, за сезон 2020/2021 гг. – 25 прогнозов.

Прогнозы дрейфа льда оценивались по данным о фактическом дрейфе, полученным в результате сопоставления пар последовательных спутниковых снимков в период февраль–май 2019 г. Было проанализировано 18 пар снимков спутников Sentinel-1 a/b, TERRA/AQUA и NOAA-18,19. Промежуток времени между последовательными снимками составлял от 6 до 48 часов. Было получено 75 векторов перемещения льда за промежутки времени от 6 до 48 часов, что эквивалентно 75 векторам дрейфа льда, осредненного за соответствующие промежутки времени. Количество векторов, полученных с каждой пары последовательных снимков, составляло от 1 до 5.

Прогнозы толщины льда и уровня моря оценивались по данным наблюдений на береговых станциях в зимний сезон 2017–2018 гг.: толщина – по данным станций Соловки и Гридино, уровень моря – по данным станций Соловки и Сосновец. Все данные наблюдений были любезно предоставлены ФГБУ «Северное УГМС». Положение этих станций показано на рис. 2.



Рис. 2. Физическая карта Белого моря.

Результаты испытаний

Прогнозы общей и частной сплоченности льда

Этот вид прогнозов является основой при оценке качества прогностической методики, так как фактические данные по сплоченности льда всегда в обязательном порядке четко указываются на каждой ледовой карте, и поэтому данные по сплоченности льда всегда доступны в объемах, необходимых и достаточных для корректного статистического анализа.

Как отмечалось выше, в общей сложности было проверено 89 прогнозов заблаговременностью 3, 4 и 7 суток.

На рис. 3 представлена гистограмма распределения ошибок прогнозов общей и частной сплоченности льда, построенная по результатам всех прогнозов

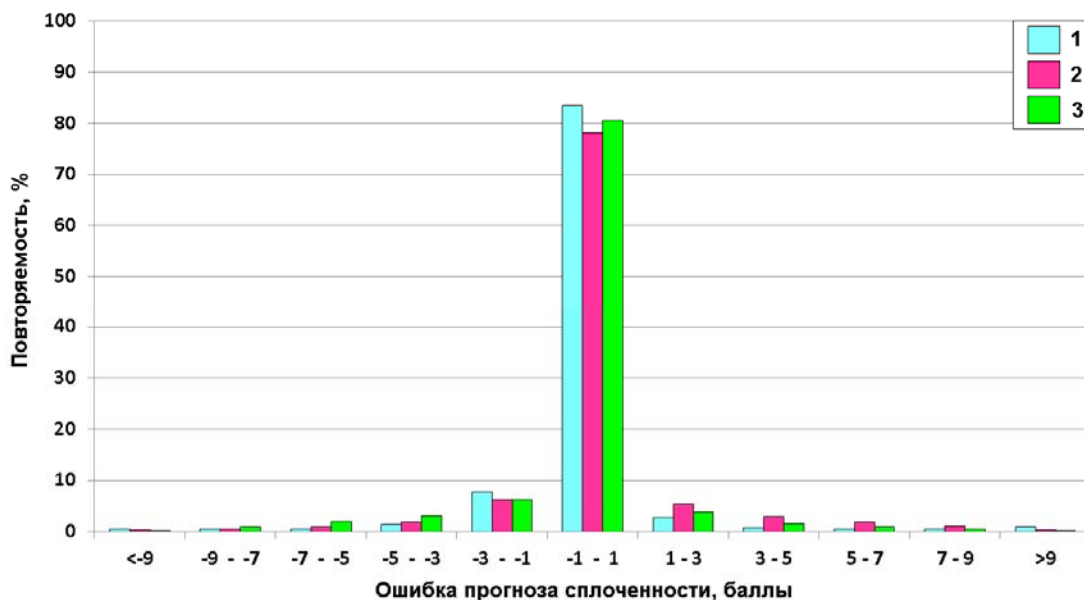


Рис. 3. Гистограмма распределения ошибок прогнозов общей сплоченности льда в Белом море:
1 – общая сплоченность, 2 – частная сплоченность молодого льда,
3 – частная сплоченность 1-летнего тонкого льда.

Как видно из рис. 3, ошибки в пределах ± 1 балл имеют огромное преобладание (повторяемость 78–83 %), ошибки в диапазоне 1–3 (или -1...-3) балла имеют повторяемость порядка 3–8 %, а суммарная повторяемость ошибок свыше 3 баллов составляет около 6–12 %. Также видно, что ни одна из гистограмм не имеет заметной асимметрии, т. е. в прогнозах сплоченности льда систематическая ошибка отсутствует.

Обобщенные результаты оценок оправдываемости и эффективности прогнозов сплоченности льда представлены в табл. 1–3.

Таблица 1

Результаты прогнозов по Белому морю, обобщенные по месяцам в хронологическом порядке, и средние показатели оправдываемости и эффективности, полученные по всей серии испытаний

Зимний сезон	Месяц	Заблаговр., сутки	Общая		Молодой		1-л. тонкий	
			Оправд.	Эффект.	Оправд.	Эффект.	Оправд.	Эффект.
2018/2019	11	+7	97,3	1,0	97,3	1,0		
	12	+3/+4	89,8	0,2	89,6	0,3	99,7	0,3
	1	+3/+4	86,3	3,6	82,6	2,9	94,0	1,7
	2	+3/+4	92,7	3,4	82,5	0,0	84,5	0,8
	3	+3/+4	90,4	4,8	79,4	3,1	84,1	-0,1
	4	+3/+4	85,3	9,6	89,5	5,8	86,8	1,6
	5	+3/+4	96,8	2,5	99,1	-0,8	97,2	3,0
2019/2020	12	+7	88,7	-0,4	88,7	-0,4		
	1	+7	86,7	11,9	85,3	11,6	93,4	2,8
	2	+7	76,1	11,4	78,0	13,3	92,0	-0,4
	3	+7	76,7	11,8	76,9	11,9	99,5	0,3
	4	+7	97,5	6,6	97,7	6,7	99,5	0,6
2020/2021	11	+7	99,1	-0,1	99,1	-0,1		
	12	+7	89,6	2,8	89,6	2,8		
	1	+7	84,2	11,6	80,0	9,3	87,2	-1,6
	2	+7	96,2	0,7	77,9	-1,5	75,8	-0,3
	3	+7	92,3	6,4	79,2	0,5	78,4	2,2
	4	+7	85,2	9,1	92,5	6,0	86,7	7,8
	5	+7	98,9	2,6				
В среднем по всей серии			88,8	5,7	85,5	4,1	89,2	1,2

132

Таблица 2

Результаты прогнозов по Белому морю, обобщенные по декадам за три зимних сезона

Месяц	Декада	Общая		Молодой		1-л. тонкий	
		Оправд.	Эффект.	Оправд.	Эффект.	Оправд.	Эффект.
11	2	99,8	0,3	99,8	0,3		
	3	97,8	0,3	97,8	0,3		
12	1	95,1	0,2	95,1	0,2		
	2	93,8	1,4	93,8	1,4		
	3	85,9	1,2	85,7	1,3	99,7	0,3
1	1	86,3	0,8	85,7	0,7	98,6	0,4
	2	81,4	5,1	78,9	3,9	92,3	0,1
	3	90,2	14,7	84,3	13,4	88,3	1,8
2	1	90,3	3,0	79,5	1,1	81,7	2,9
	2	88,1	4,7	81,1	4,4	85,8	-0,6
	3	90,1	7,3	79,9	3,5	85,6	-2,5
3	1	90,3	8,4	77,7	6,8	86,9	0,8
	2	87,4	1,8	77,5	1,2	86,2	-0,2
	3	84,2	9,5	80,6	5,3	86,8	1,0
4	1	85,1	12,2	86,4	7,2	84,9	-0,6
	2	86,0	13,7	91,1	9,8	90,0	7,0
	3	92,9	1,0	97,3	2,6	95,4	3,0
5	1	97,3	2,5				

**Результаты прогнозов по Белому морю, обобщенные по заблаговременности
за три зимних сезона**

Заблаговременность, сутки	Общая		Молодой		1-л. тонкий	
	Оправд.	Эффект.	Оправд.	Эффект.	Оправд.	Эффект.
+3	89,7	3,5	86,2	1,9	88,7	-0,3
+4	88,8	5,8	85,3	2,9	88,7	0,7
+7	87,3	7,0	84,0	5,3	85,1	2,4

Табл. 1–3 свидетельствуют о следующем.

Почти все средние оценки оправдываемости – при осреднении по месяцам для каждого сезона отдельно, а также по декадам и по заблаговременности для 3 сезонов вместе – превышают 80–85 %, т. е. в среднем оправдываемость прогнозов соответствует уровню «хорошо». При этом большинство средних оценок эффективности положительные.

Наихудшие результаты (**85,5 %**) получились по молодым льдам, что, очевидно, связано с их изменчивостью и подвижностью, наилучшие (**89,2 %**) – по 1-летним тонким, так как эти льды более статичны и инерционны. Однолетних льдов средней толщины в рассматриваемые сезоны в Белом море не наблюдалось, а льды более старших возрастных градаций в Белом море вообще не встречаются.

Исходя из данных табл. 1, из 51 оценки среднемесячной оправдываемости только в одном случае (т. е. 2 %) получился неудовлетворительный результат: оправдываемость прогнозов частной сплоченности молодых льдов в марте 2019 г. в среднем за месяц составила 79,4 %. В 19 случаях (37,3 %) оценки оправдываемости соответствуют уровню «отлично», в 15 случаях (29,4 %) – «хорошо» и в 16 случаях (31,3 %) – «удовлетворительно».

Известная закономерность, заключающаяся в том, что в периоды резких изменений оправдываемость прогнозов несколько снижается, а эффективность повышается, а в периоды стабильных условий – обратная картина, в Белом море проявляется не столь явно, как, например, в морях восточной Арктики. Это связано с тем, что в Белом море синоптическая изменчивость ледовых условий вообще очень высокая, и периоды стабильности почти не выражены.

С увеличением заблаговременности оправдываемость снижается в среднем на 0,5–1,2 % на каждые сутки, а эффективность повышается на 0,4–1,0 %.

Прогнозы толщины льда

Анализ достоверности прогнозирования толщины льда выполнялся для станций Соловки и Гридино в период с января по май 2018 г. Прогностические расчеты толщины

льда выполнялись без регулярного усвоения фактических данных, т. е. для каждого 7-суточного прогноза в качестве исходных данных использовались результаты предыдущего 7-суточного прогноза. Единственное исключение относилось к первому прогнозу: дата составления этого прогноза соответствовала дате первого измерения толщины льда на соответствующей станции, а начальная толщина льда при первом прогнозе задавалась равной первому измеренному значению толщины. Для станции Соловки первое измерение было выполнено 21 января 2018 г. и составило 19 см, для станции Гридино – 4 февраля 2018 г. и составило 12 см.

В качестве прогностических данных использовались значения толщины льда в ячейках сетки, в пределах которых расположены соответствующие станции. На рис. 4 представлен временной ход изменения фактической и прогностической толщины льда на станциях Соловки и Гридино с момента начала измерений до их окончания.

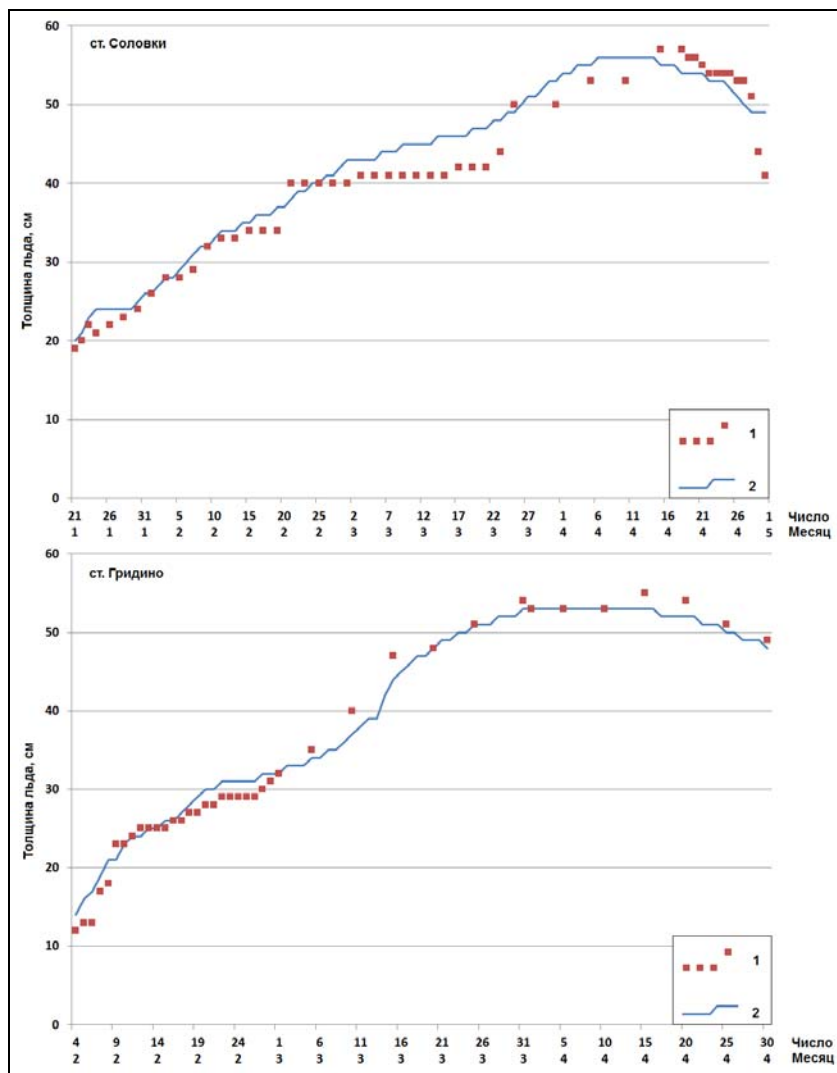


Рис. 4. Временной ход изменения фактической и прогностической толщины льда на станциях Соловки и Гридино: 1 – наблюдения, 2 – прогноз.

Получилось, что для станции Соловки оправдываемость прогнозов толщины льда составила 82,0 % (в 82 % случаев прогностическая толщина льда отличалась от измеренной менее чем на 3 см), что соответствует уровню «удовлетворительно». Ошибочные значения, когда разность между прогностической и измеренной толщиной превысила 3 см, в основном пришлись на конец февраля – первую половину марта. В этот период, судя по измерениям, рост толщины льда по существу остановился, хотя температуры воздуха были заметно ниже нуля (от -5 до -15 °С). При этом по расчетам рост толщины льда продолжался.

Что касается станции Гридино, то для этой станции оправдываемость составила 97,4 % (лишь одно прогностическое значение «не уложилось» в допустимые пределы), прогнозы можно оценить как «отличные». Интересно отметить, что почти полная остановка роста толщины льда в феврале–марте на станции Гридино, в отличие от Соловков, не была зафиксирована, хотя, как видно из рис. 2, географически эти станции находятся на расстоянии примерно 110 км друг от друга. Это вызывает определенные сомнения в достоверности той самой остановки роста толщины, отмеченной на станции Соловки и породившей почти все ошибки прогнозов толщины.

Прогнозы дрейфа льда

По результатам сопоставления фактического дрейфа, полученного по парам последовательных спутниковых снимков, и прогностического дрейфа оценены оценки средних арифметических и средних абсолютных ошибок модуля скорости и направления дрейфа. Отношение числа случаев, когда ошибка прогноза модуля скорости (направления) не превышала предельно допустимое значение, к общему числу анализируемых случаев, дает оценку оправдываемости прогнозов. В табл. 4 представлены соответствующие результаты.

Таблица 4

Оценки ошибок прогнозов и оправдываемости модуля и направления дрейфа льда в Белом море

Арифметическая ошибка		Абсолютная ошибка		Оправдываемость, %	
Модуль, м/с	Направл., град.	Модуль, м/с	Направл., град.	Модуль	Направл., град.
-0,037	-4,4	0,056	14,5	82,3	80,8

На рис. 5 представлены гистограммы распределения ошибок прогнозов модуля и направления дрейфа льда. Как видно из табл. 4 и рис. 5, в среднем прогностический дрейф слабее фактического на 3–4 см/с и отклоняется влево на 4–5°, т. е. прогностическая методика имеет систематическую ошибку. Однако эту ошибку можно признать как незначительную и не имеющую серьезного практического значения.

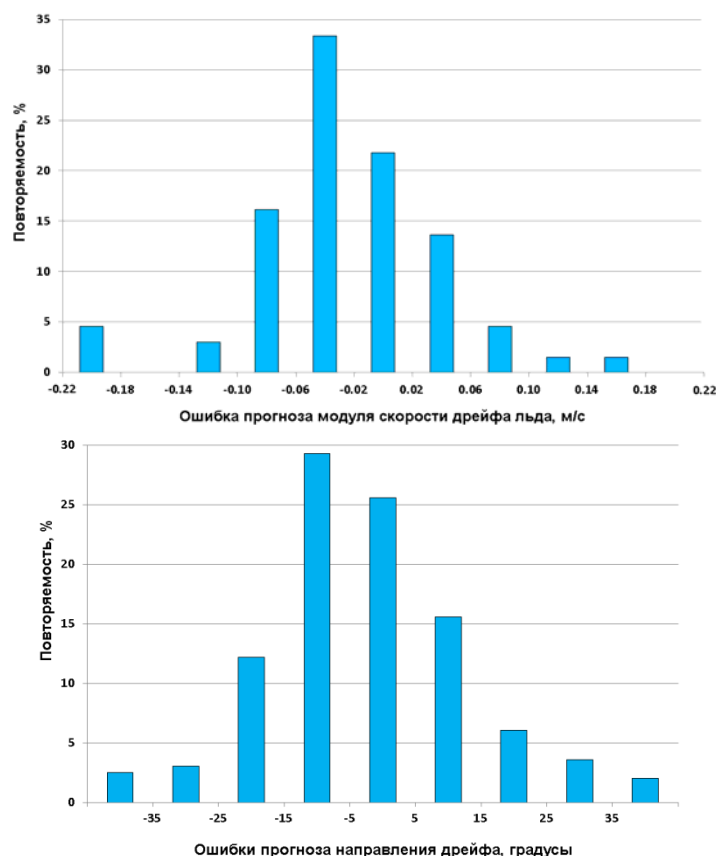


Рис. 5. Гистограммы распределения ошибок прогнозов модуля и направления дрейфа льда.

Абсолютные ошибки прогнозов модуля и направления дрейфа в среднем составляют 5–6 см/с и 14–15° соответственно, т. е. в среднем абсолютная ошибка не превышает предельно допустимое значение. Значения оправдываемости прогнозов составляют порядка 81–82 %, что соответствует уровню «удовлетворительно».

В табл. 5 представлены результаты векторного корреляционного анализа.

Таблица 5

Результаты векторного корреляционного анализа прогностического и наблюдаемого дрейфа льда

Коллинеарный коэффициент корреляции	0.78
Ортогональный коэффициент корреляции	-0.12
Индикатор векторной корреляции (ИВК)	0.79
Отклонение от направления наибольшего ИВК	-9
Большая полуось эллипса ошибок, м/с	0.032
Малая полуось эллипса ошибок, м/с	0.011
Направление большой оси эллипса ошибок, градусы	18

Как видно из табл. 5, коллинеарный коэффициент корреляции составляет 0,78, тогда как ортогональный всего лишь -0,12. Это свидетельствует о том, что прогностический и наблюдаемый дрейф статистически тесно связаны вдоль направления дрейфа и мало зависимы в поперечном направлении. Проще говоря, если у фактического дрейфа как-то меняется составляющая U , то у прогностического дрейфа составляющая U меняется схожим образом, а изменение составляющей V прогностического дрейфа мало связано с изменением составляющей U фактического дрейфа. Сравнительно высокий индекс векторной корреляции (0,79) также подтверждает хорошую статистическую связь прогностического и фактического дрейфа. Длины полуосей эллипса ошибок примерно соответствуют средней арифметической ошибке и существенно меньше предельно допустимой ошибки.

Таким образом, достоверность прогнозов дрейфа льда в Белом море в целом можно признать удовлетворительной.

Прогнозы уровня моря

Для анализа достоверности прогнозов уровня моря были использованы данные наблюдений на гидрометеорологических станциях Соловки и Сосновец. В качестве прогностических данных использовались значения уровня моря в ячейках сетки, в пределах которых расположены соответствующие станции.

Продолжительность временных рядов для анализа прогнозов уровня моря составила 2352 часа (с 00 ч 23.01.2018 до 23 ч 30.04.2018) на каждой станции. Были подсчитаны следующие статистики:

- взаимно-корреляционная функция между наблюдаемыми и прогностическими значениями уровня при сдвигах от -2 часа до +2 часа;
- средняя амплитуда колебаний уровня по наблюдениям и по прогнозу;
- средняя алгебраическая разность между наблюдаемой и прогностической амплитудами;
- средняя абсолютная разность между наблюдаемой и прогностической амплитудами.

В табл. 6 приводятся значения взаимно-корреляционной функции, в табл. 7 – характеристики амплитуд колебаний уровня.

Таблица 6

Значения взаимно-корреляционной функции между наблюдаемыми и прогностическими значениями уровня моря

Станция	Временной сдвиг, часы				
	-2	-1	0	1	2
Соловки	0,48	0,70	0,74	0,60	0,14
Сосновец	0,19	0,59	0,83	0,69	0,25

Характеристики наблюдаемых и прогностических амплитуд колебаний уровня моря

Характеристика		Соловки	Сосновец
Средняя амплитуда, м	Прогноз	0,39	1,28
	Наблюдения	0,35	1,46
Средняя разность амплитуд	Метры	0,04	-0,18
	Проценты	11,4	-12,3
Средняя абсолютная разность амплитуд	Метры	0,06	0,26
	Проценты	17,1	17,8
Станд. отклонение колебаний уровня	Метры	0,28	1,10
Предельно допустимая ошибка	Метры	0,19	0,74
Оправдываемость ежечасных прогнозов	Проценты	80,2	86,4

Содержание табл. 6 и 7 можно интерпретировать следующим образом.

Во-первых, на обеих станциях взаимно-корреляционные функции имеют максимум при сдвиге, равном 0. Это свидетельствует о том, что фаза приливных колебаний прогнозируется вполне прилично, по крайней мере прогностические и наблюдаемые моменты полной и малой воды в подавляющем большинстве случаев совпадают с точностью до 1 часа.

Во-вторых, важное отличие этих станций друг от друга заключается в том, что станция Сосновец расположена в Горле, где периодические (приливные) колебания имеют заметное преобладание над непериодическими (сгонно-нагонными), а станция Соловки – в западной части бассейна, где роль приливных колебаний не столь явно преобладает над сгонно-нагонными. Тот факт, что коэффициент корреляции на станции Сосновец заметно выше, чем на станции Соловки, свидетельствует о том, что модель лучше прогнозирует приливные колебания уровня, чем непериодические.

В-третьих, на станции Соловки модель несколько завышает значения амплитуд колебаний (в среднем на 4 см, или на 11,4 %), а на станции Сосновец – занижает (в среднем на 18 см, или на 12,3 %). Стандартное отклонение колебаний уровня на станции Соловки составляет 28 см, на станции Сосновец – 110 см. Соответственно, предельно допустимая ошибка прогноза, равная 0,68 от стандартного отклонения, на Соловках составляет 19 см, на Сосновце – 74 см. Следовательно, в обоих случаях средняя ошибка прогноза амплитуды с большим запасом укладывается в рамки предельного допуска. Если же рассматривать все ежечасные значения ошибок прогнозов уровня, то на станции Соловки оправдываемость прогноза (число случаев, когда ошибка прогноза не превышает предельно допустимую, в процентах от общего числа анализируемых случаев) составляет 80,2 % («удовлетворительно»), на станции Сосновец – 86,4 % («хорошо»).

Таким образом, можно сделать вывод, что прогнозы колебаний уровня моря в целом оказались вполне удовлетворительными, хотя погрешности при прогнозировании непериодических колебаний достаточно заметны.

Примеры прогнозов

На рис. 6–8 приведены примеры прогнозов распределения ледяного покрова в Белом море.

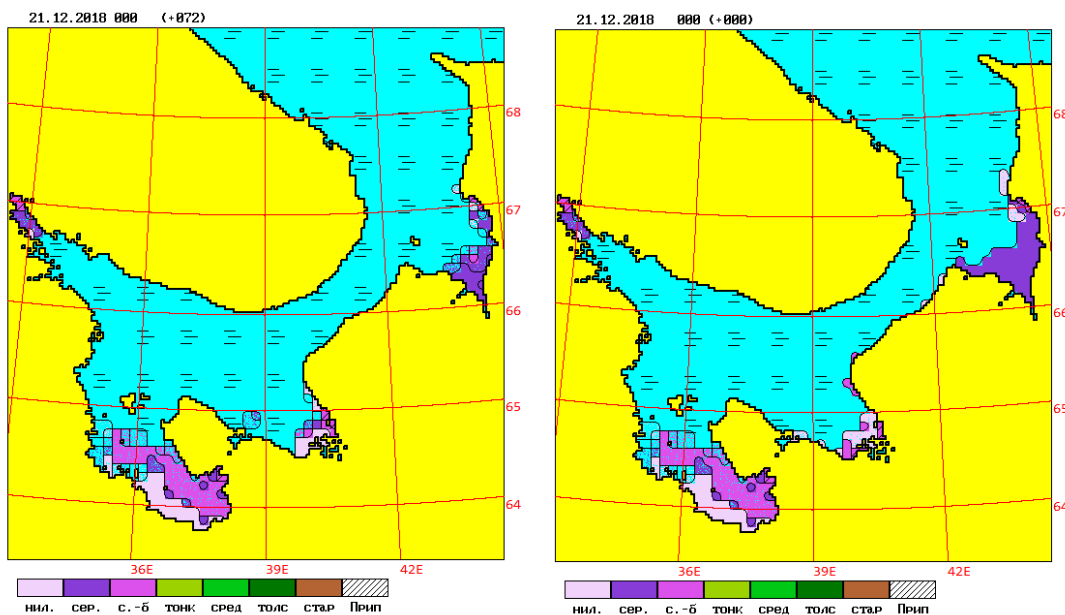


Рис. 6. Пример прогноза распределения ледяного покрова в Белом море в начале зимнего сезона: прогностическая карта на 21.12.2018 (прогноз от 18.12.2018 +72 часа) (слева); фактическая карта на 21.12.2018 (справа).

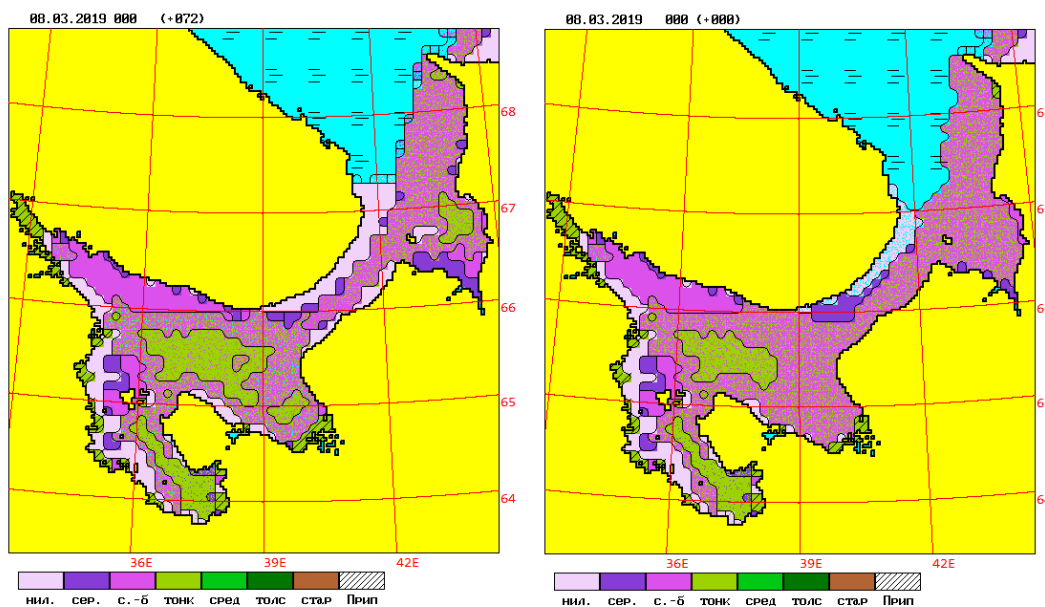


Рис. 7. Пример прогноза распределения ледяного покрова в Белом море в середине зимнего сезона: прогностическая карта на 08.03.2019 (прогноз от 05.08.2019 +72 часа) (слева); фактическая карта на 08.03.2019 (справа).

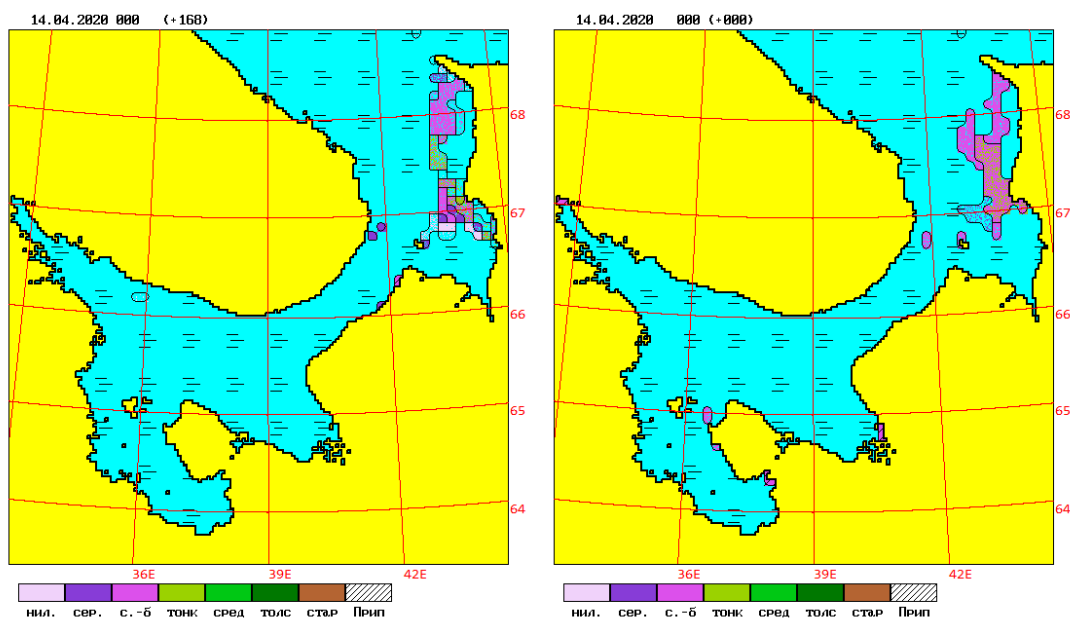


Рис. 8. Пример прогноза распределения ледяного покрова в Белом море в конце зимнего сезона: прогностическая карта на 14.04.2020 (прогноз от 07.04.2020 +168 часов) (слева); фактическая карта на 14.04.2020 (справа).

На рис. 9–11 приведены примеры пар последовательных спутниковых снимков и прогнозов дрейфа ледяного покрова в Белом море.

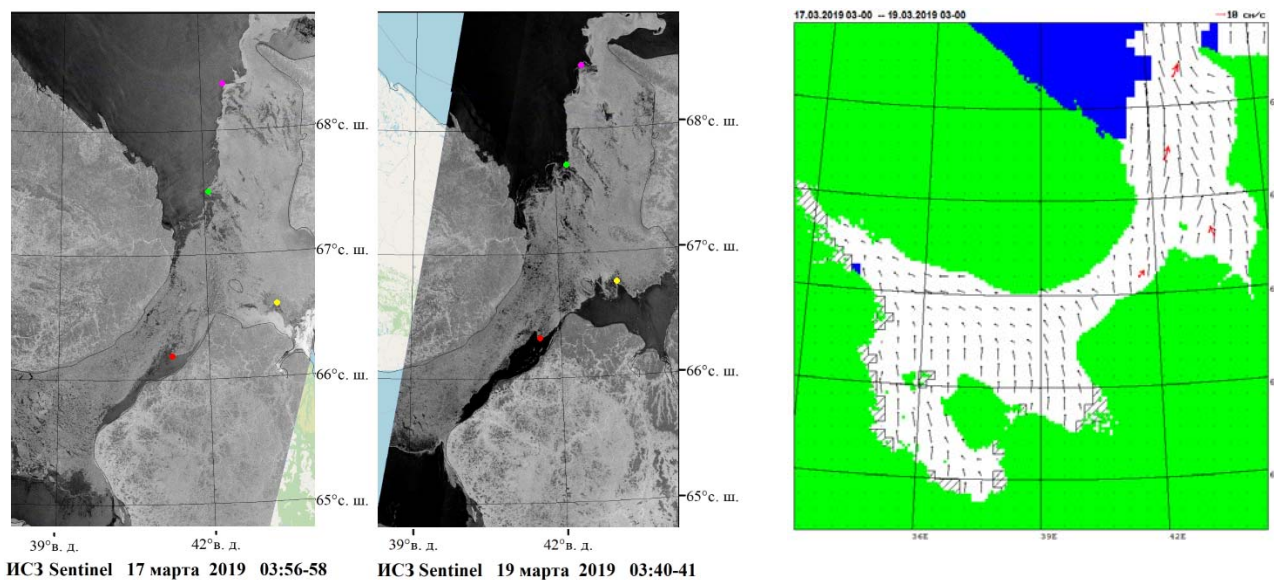


Рис. 9. Пример фактического и прогностического дрейфа льда в Белом море в период 17–19.03.2019: снимки Sentinel от 17.03.2019 03:58 UTC и от 19.03.2019 03:41 UTC (слева); фактический (красные стрелки) и прогностический (черные стрелки) дрейф, осредненный за период с 17.03.2019 03:00 по 19.03.2019 03:00 (справа).

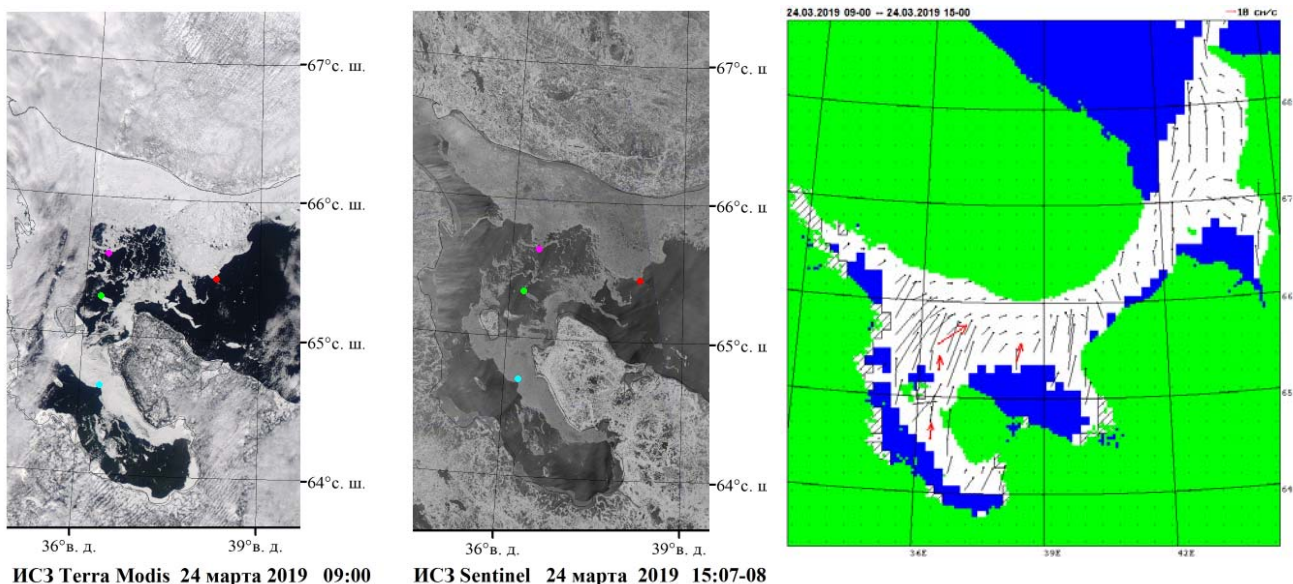


Рис. 10. Пример фактического и прогностического дрейфа льда в Белом море в период с 03:00 24.03.2019 по 15:00 24.03.2019: снимки Terra Modis от 24.03.2019 09:00 UTC и Sentinel от 24.03.2019 15:08 UTC (слева); фактический (красные стрелки) и прогностический (черные стрелки) дрейф, осредненный за период с 24.03.2019 03:00 по 24.03.2019 15:00 (справа).

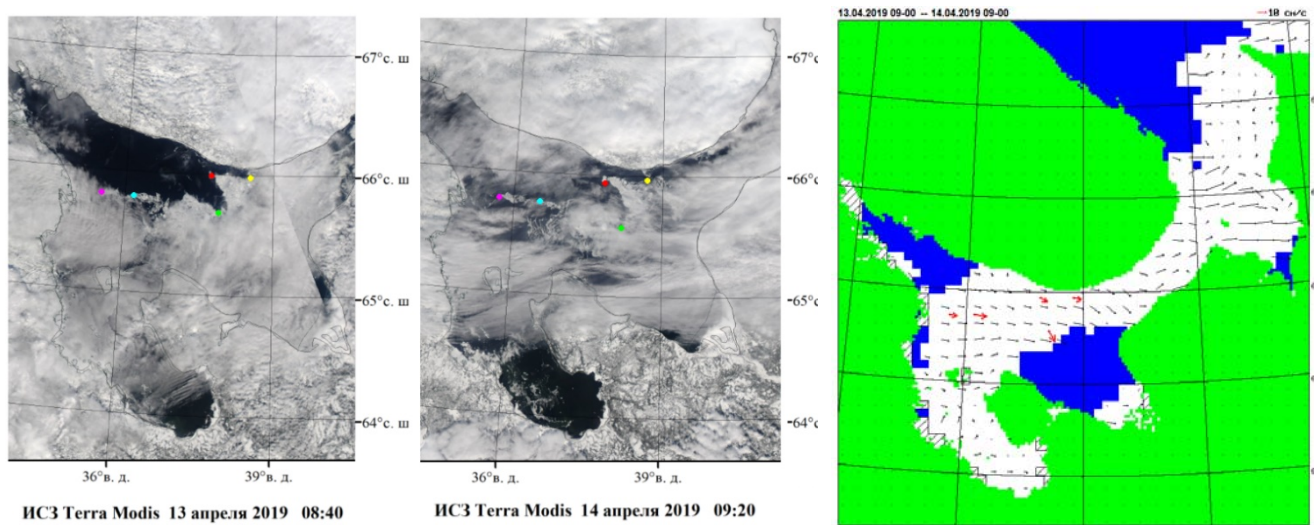


Рис. 11. Пример фактического и прогностического дрейфа льда в Белом море в период 13–14.04.2019: снимки Terra Modis от 13.03.2019 08:40 UTC и от 14.03.2019 09:20 UTC (слева); фактический (красные стрелки) и прогностический (черные стрелки) дрейф, осредненный за период с 13.03.2019 09:00 по 14.03.2019 09:00 (справа).

На рис. 12 показаны фрагменты временного хода наблюдаемого и прогностического уровня моря на станциях Соловки и Сосновец.

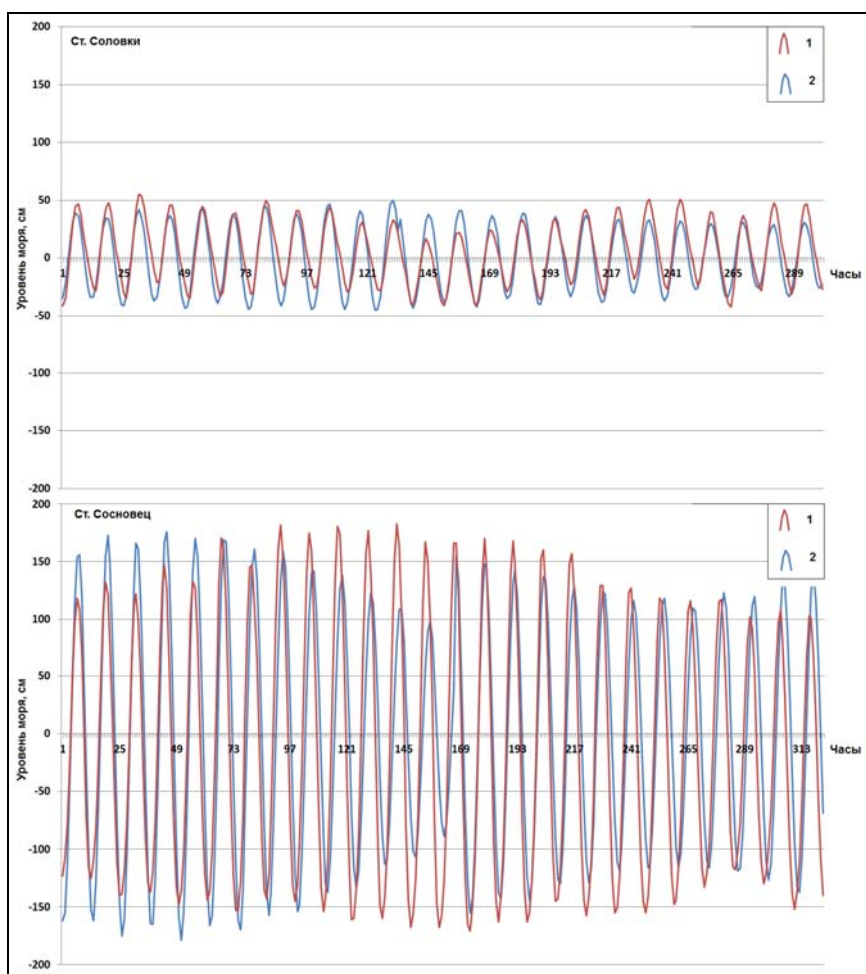


Рис. 12. Фрагменты временного хода наблюдаемого и прогностического уровня моря на станциях Соловки и Сосновец: 1 – наблюдения, 2 – прогноз.

Заключение

Основные выводы, которые можно сделать по результатам испытаний, сводятся к следующему.

Испытания выполнены в объемах, достаточных для получения надежных выводов о качестве прогнозов сплоченности, дрейфа и толщины льда, а также колебаний уровня моря.

Для оценки достоверности прогнозов сплоченности льда было составлено 89 прогнозов для зимних сезонов 2018/2019, 2019/2020 и 2020/2021 гг.

Для оценки достоверности прогнозов толщины льда были спрогнозированы сезонные ходы толщины на станциях Соловки и Гридино с января до мая 2018 года.

Для оценки прогнозов дрейфа льда были проанализированы 18 пар последовательных спутниковых снимков в период с февраля по май 2019 года.

Для оценки достоверности прогнозов колебания уровня моря были спрогнозированы временные ряды на станциях Соловки и Сосновец в период с января до апреля 2018 года.

Заблаговременность оцененных прогнозов варьировалась от 3 до 7 суток.

Гистограммы распределения ошибок сплоченности показали, что незначительные ошибки (в пределах ± 1 балл) имеют повторяемость порядка 78–83 %, а повторяемость грубых ошибок (более 3 баллов) составляет в основном не более 6–12 %. Гистограммы не имеют выраженной асимметрии, что свидетельствует об отсутствии систематической ошибки в прогнозах сплоченности льда.

По совокупности всех испытаний, средняя оценка оправдываемости прогнозов сплоченности льда составила **85,5–89,2 %** при эффективности от **1,2 до 5,7 %**. В 37,3 % случаев оправдываемость прогнозов соответствует оценке «отлично», 29,4 % – «хорошо», **31,3%** – «удовлетворительно» и в 2,0 % – «неудовлетворительно».

Почти все средние оценки оправдываемости прогнозов сплоченности – при осреднении по месяцам для каждого сезона отдельно, а также по декадам и по заблаговременности для 3 сезонов вместе – превышают 80–85 %, т. е. в среднем оправдываемость прогнозов соответствует уровню «хорошо». При этом большинство средних оценок эффективности положительные, в основном, от 2 до 6 %.

Наихудшие результаты (**85,5 %**) получились по молодым льдам, что, очевидно, связано с их изменчивостью и подвижностью, наилучшие (**89,2 %**) – по 1-летним тонким льдам, так как эти льды более статичны и инерционны.

Изменения оправдываемости и эффективности прогнозов в зависимости от изменчивости или стабильности ледовых условий проявилась не столь явно, как в арктических морях.

С увеличением заблаговременности оправдываемость снижается в среднем на 0,5–1,2 % на каждые сутки, а эффективность повышается в среднем на 0,4–1,0 % на каждые сутки.

Анализ достоверности прогнозов толщины льда показал, что для станции Соловки оправдываемость прогнозов толщины льда составила 82,0 % (в 82 % случаев прогностическая толщина льда отличалась от измеренной менее чем на 3 см), что соответствует уровню «удовлетворительно», а для станции Гридино – 97,4 %, что соответствует уровню «отлично».

Анализ достоверности прогнозов дрейфа льда, выполненный по результатам анализа 18 пар последовательных спутниковых снимков, показал, что средняя арифметическая ошибка прогноза модуля скорости дрейфа составляет -0,037 м/с, направления – $-4,4^\circ$ (средние абсолютные ошибки составляют 0,056 м/с и $14,5^\circ$ соответственно). Индекс векторной корреляции между прогностическим и наблюдаемым дрейфом сравнительно высокий (0,79), причем коллинеарный коэффициент корреляции показывает довольно тесную прямую статистическую связь (0,78), а ортогональный коэффициент – очень слабую обратную связь

(-0,12). Оценки оправдываемости прогнозов модуля скорости и направления дрейфа составляют 82,3 и 80,8 % соответственно. В целом, достоверность прогнозов дрейфа льда можно оценить как удовлетворительную.

Анализ достоверности прогнозов уровня моря на станциях Соловки и Сосновец показал, что фаза приливных колебаний прогнозируется вполне прилично, по крайней мере прогностические и наблюдаемые моменты полной и малой воды в подавляющем большинстве случаев совпадают с точностью до 1 часа. Для обеих станций средняя ошибка прогноза амплитуды с большим запасом укладывается в рамки предельного допуска. На станции Соловки оправдываемость прогноза (число случаев, когда ошибка прогноза не превышает предельно допустимую, в процентах от общего числа анализируемых случаев) составляет 80,2 % («удовлетворительно»), на станции Сосновец – 86,4 % («хорошо»).

Таким образом, испытания методики прогнозов сплоченности (общей и частной), дрейфа и толщины ледяного покрова, а также колебаний уровня моря в Белом море, выполненные в период с 2018 по 2021 год, показали, что достоверность прогнозов полностью соответствует требованиям действующего Наставления [7].

ЦМКП Росгидромета в своем решении от 29 марта 2022 г. постановила «... одобрить работу ФГБУ «ААНИИ» по разработке методики прогноза дрейфа льдов в Белом море на период до 5 суток на основе усовершенствованной численной динамико-термодинамической модели» и «внедрить методику прогноза дрейфа льдов в Белом море на период до 5 суток на основе усовершенствованной численной динамико-термодинамической модели в ФГБУ «ААНИИ» в качестве основной».

Список литературы

1. *Апель И.Л., Гудкович З.М.* Численное моделирование и прогноз эволюции ледяного покрова арктических морей в период таяния. – Л.: Гидрометеиздат, 1992. – 143 с.
2. *Бельшев А.П., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А.* Вероятностный анализ морских течений. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 264 с.
3. *Гудкович З.М., Доронин Ю.П.* Дрейф морских льдов. –СПб.: Гидрометеиздат, 2001. – 112 с.
4. *Иванов Н.Е.* О характеристиках корреляции скоростей ветра, морских течений и дрейфа льда // *Метеорология и гидрология.* – 2004. – № 8. – С. 61–72.
5. *Клячкин С.В., Гузенко Р.Б., Май Р.И., Саперштейн Е.Б., Сергеева И.А., Ярославцева С.И.* Метод прогноза ледовых условий Восточно-Сибирского и Чукотского морей, включая дрейф массивов сплоченных льдов в летний период и старых льдов в зимний период, на период до 5 суток на основе усовершенствованной численной динамико-термодинамической модели // *Результаты*

испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2022. – Информационный сборник № 49. – С. 102–122.

6. Международная символика для морских ледовых карт и номенклатура морских льдов. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 56 с.

7. *Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III.* – М.: ТРИАДА ЛТД, 2011. – 102 с.

8. *Некрасов А.В.* Энергия океанских приливов. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 288 с.

9. *Николаева А.Я., Шестериков Н.П.* Метод расчета ледовых условий (на примере моря Лаптевых) // Труды ААНИИ. – 1970. – Т. 292. – С. 143–217.

10. *Хейсин Д.Е., Ивченко В.О.* Распространение ледовых сжатий в сплоченных льда // Океанология. – 1975. – Т. 15, № 5. – С. 803–812.

11. *Blumberg A.F., Mellor G.L.* A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, in *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*. – 1987. – American Geophysical Union, Washington, DC: Heaps N.S. – P. 1–16.

12. *Foreman M.G.G.* Manual for tidal heights analysis and prediction. Pacific Marine Science Report 77-10. – 1996. – 58 p.

13. *Gill A.E.* Atmosphere-Ocean Dynamics: International Academic Series. Vol. 30. – Atmosphere-Ocean Dynamics, Academic Press, 1982. – 662 p.

14. *Mellor G.L.* A three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model. Users guide. Program in Atmospheric and Oceanic Sciences Princeton University, Princeton, NJ 08544-0710, 2003. – 53 p.

15. *Rosati A., Miyakoda K.* A general-circulation model for upper-ocean simulation // *Journal of Physical Oceanography*. – 1988. – No. 18. – P. 1601–1626.

16. *Zillman J.W.* Study of some aspects of the radiation and heat budgets of the Southern Hemisphere oceans // Bureau of Meteorology. – 1972. – Report 26. – P. 44–62.