

**Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды  
(РОСГИДРОМЕТ)**

**Федеральное государственное бюджетное учреждение  
“ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ”**

## **ИНФОРМАЦИОННЫЙ СБОРНИК**

**№ 50**

**Результаты испытания новых и усовершенствованных  
технологий, моделей и методов гидрометеорологических  
прогнозов**

Под редакцией  
канд. геогр. наук А.А. Алексеевой

2023

## УДК 551.5

Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов / под редакцией канд. геогр. наук А.А. Алексеевой. – 2023. – **Информационный сборник № 50.** – 196 с.

Изложены основы и результаты испытаний научных разработок, решениями Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета рекомендованных к внедрению в оперативную практику. В первой статье представлены сравнительные оценки качества ансамблевого радиолокационного наукастинга осадков по результатам испытаний в теплый и холодный периоды года. Обсуждаются критичные проблемы сопоставительного анализа качества. Во второй статье излагаются основы и результаты оперативных испытаний новой технологии глобального ансамблевого среднесрочного прогноза на основе модели ПЛАВ. Две статьи освещают технологии месячного и сезонного прогнозирования температуры воздуха для территорий Северной Евразии и Арктического региона на основе статистической коррекции прогнозов модели ПЛАВ. В статьях по агрометеорологии излагаются результаты производственных испытаний прогнозов урожайности семян подсолнечника по субъектам европейской части и России в целом и яровой пшеницы в Кемеровской области. Описанию и апробации технологии мониторинга продолжительности солнечного сияния на территории России посвящена следующая статья. Восьмая статья сборника представляет результаты испытания усовершенствованной технологии построения векторов ветра с использованием оптического потока по спутниковой информации. В статьях морской тематики излагаются результаты испытания долгосрочного прогноза типов температуры воздуха для западного района Арктики на осенне-зимний период, прогноза дрейфа льдов в Белом море на период до 5 суток и краткосрочного прогноза изменений уровня моря в юго-западной части Берингова моря. Заключительные статьи посвящены методикам оценки качества прогнозов: полезной заблаговременности среднесрочных прогнозов погоды и оправдываемости прогнозов космической погоды.

Для научных работников в области синоптической метеорологии, гидродинамических, агрометеорологических, морских гидрологических и гелиогеофизических прогнозов и специалистов службы прогноза погоды, аспирантов и студентов.

*А.В. Муравьев<sup>1</sup>, Д.Б. Киктев<sup>1</sup>, А.В. Смирнов<sup>1</sup>  
Ю.Б. Павлюков<sup>2</sup>, Н.И. Серебрянник<sup>2</sup>*

**ВЕРИФИКАЦИЯ ДЕТЕРМИНИСТСКОГО И ВЕРОЯТНОСТНОГО  
РАДИОЛОКАЦИОННОГО НАУКАСТИНГА ОСАДКОВ  
В ТЕПЛЫЙ И ХОЛОДНЫЙ ПЕРИОДЫ ГОДА  
НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ**

*<sup>1</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр*

*Российской Федерации, г. Москва;*

*<sup>2</sup>Центральная аэрологическая обсерватория, Московская обл., г. Долгопрудный*

**Введение**

С начала 2020 года в системе наукастинга полей интенсивности осадков Гидрометцентра России используются данные наблюдений примерно 30 современных доплеровских радиолокаторов ДМРЛ-С (далее – ДМРЛ), развернутых Росгидрометом на Европейской территории России. Управление наблюдениями на сети ДМРЛ, сбор и обработку радиолокационных данных, их валидацию, а также передачу продуктов потребителям обеспечивает Научно-технический центр по развитию и эксплуатации сети доплеровских метеорологических радиолокаторов (НТЦР ДМРЛ) ФГБУ «ЦАО» Росгидромета [5].

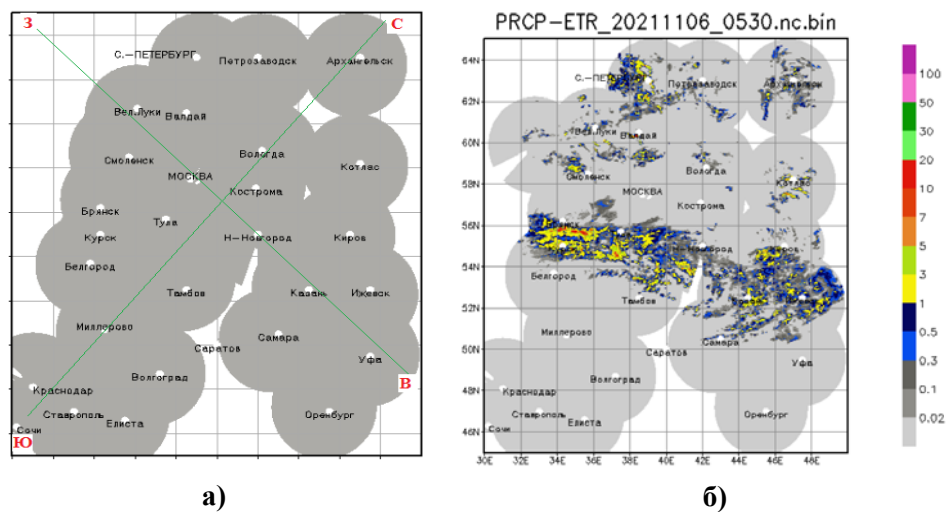
В мае–сентябре 2020 года были проведены оперативные испытания технологии с километровым разрешением. По полученным результатам на заседании ЦМКП 16.12.2020 эта технология была рекомендована к внедрению в качестве основной в "теплый" период года [9]. Для испытания технологии наукастинга в "холодный" период были накоплены данные радиолокационных наблюдений и прогнозов в интервале с ноября 2021 по март 2022 года.

Периоды года определяются как "теплый" и "холодный" вполне условно, так как аналогичные эпитеты иногда употребляются эквивалентно для календарных зимы и лета или задаются климатологическими граничными значениями среднесуточной температуры воздуха в агрометеорологии [2] и при проектировании тепловой защиты сооружений [13].

В 2021 г. авторами [10] были разработаны и внедрены более точные методы оценки качества с учетом констант отсутствия и переменных объемов условных выборок, поэтому на этапе выполнения плана НИР в 2022 г. было решено провести и представить ЦМКП сравнительные оценки для обоих периодов года. Данная статья содержит часть полученных результатов сравнительной верификации.

### 1. Зоны покрытия, архив испытаний, ограничения радиолокационного метода

Как и в испытаниях в теплый период, область прогнозирования представляет собой сферический ромб в проекции Альберса, в который вписана матрица данных размером  $1951 \times 2151 = 4\,196\,601$  точек, соответствующая полю с разрешением 1 км. Для использования графического редактора GRADS повернутый ромб спроектирован на регулярную географическую сетку с условными, но близкими к указанной области координатами  $45^\circ\text{--}65^\circ$  с.ш.,  $30^\circ\text{--}50^\circ$  в.д. (рис. 1а). Картографическая организация данных и особенности построения единого поля осадков описаны более детально в [10]. Здесь добавим, что оперативная система наукастинга осадков усваивает наблюдения ДМРЛ в автоматическом режиме, в результате чего набор радиолокаторов может динамически изменяться, что приводит к изменению и конструируемого поля осадков (рис. 1б).



**Рис. 1.** Расположение ДМРЛ в условных координатах первого испытания (а) и "снимок" поля текущего испытания системы (б) в тех же координатах, но с появлением данных нового р/л.

В архив испытаний включены данные наблюдений в наибольшем объеме из 21744 максимально возможных в холодный период ( $151 \text{ сут.} \times 24 \text{ часа} \times 6 \text{ наблюдений в час}$ ) и из 22032 максимально возможных в теплый период ( $153 \times 24 \times 6$ ). Из прогнозов, обновляющихся каждые десять минут, отобраны прогнозы, составляемые в целые часы суток на 30, 60, 90, 120 и 150 мин. Таким образом, использованное количество прогнозов в шесть раз меньше

максимально возможного. В обоих испытаниях входные поля (а значит, и наблюдения) составляются в формате *ncdf*, а поля прогностических ансамблей – в формате *tiff*.

Сделаем следующее уточнение. В самом начале верификации для синхронизации полей прогнозов и наблюдений составляются таблицы соответствий по прогнозам на выделенные 5 сроков. Количество пар полей "прогноз-наблюдение" для одной заблаговременности не превышает  $151 \times 24 = 3624$  для холодного периода и  $153 \times 24 = 3672$  – для теплого периода, при этом все фактические пары полей составляют максимально доступный объем выборки для верификации. Необходимо учитывать, что разнообразные условия формирования выборок оставляют из этого объема иногда исчезающе малую долю, что ставит под сомнение статистическую надежность соответствующих оценок. При этом ситуация с обеспеченностью выборок в холодный период усугубляется независимыми от особенностей верификации ограничениями радиолокационного метода метеонаблюдений [5, 12]. Наиболее существенным (и даже критичным) отличием пространственных структур в холодный период по сравнению с теплым периодом оказалось разрушение связности композитного поля с концентрацией вокруг радиолокаторов как значений осадков, так и значений показателей качества: в холодный период осадки, выпадающие из более низких (по сравнению с теплым периодом) слоистообразных облаков, на больших дистанциях ( $\geq 120 \div 150$  км) оказываются вне пределов радиолокационного сканирования из-за подъема р/л луча выше верхней границы облаков вследствие влияния кривизны Земли [5].

## 2. Учет пропусков и допусков, цензурирование данных

При обработке цифровых карт радиолокационных полей осадков  $R$  (мм/час) приходится иметь дело с тремя "видами" данных: 1) числовыми значениями  $R$ ; 2) **пропусками**, т. е. символьными переменными  $NA$ , заменяющими числовые значения  $R$  в местах, где значения  $R$  по разным причинам отсутствуют; 3) **допусками** в выборку, т. е. теми числами, которые учитываются при оценке качества.

Пропуски в исходных цифровых картах  $R$  возникают, например, вследствие влияния препятствий, экранирующих радиоизлучение в отдельных азимутальных направлениях, отфильтрованных радиопомех и отражений от т. н. "местных предметов" (местников).

Допуски определяются логическими условиями, представляющими собой комбинацию конъюнкций и дизъюнкций для значений  $R$  относительно пороговых значений, например (наблюдение  $< 0.5$  & прогноз  $> 0.0$ ). В условиях переменных объемов, включая нулевые, необходимо предусмотреть и обойти деление на нуль или взятие логарифма от нуля.

Аккуратный учет пропусков и допусков требуется и для определения статистической значимости рассчитываемых оценок качества, и для корректности матричных операций в

языке программирования. Прием интегрального описания пропусков и числовых значений, использованный в [10], заключается в составлении матриц-масок размерности объединенного поля, состоящих из нулей и единиц в тех точках, в которых расположена либо константа отсутствия, либо число. Арифметические поэлементные операции суммы и произведения всех матриц-масок позволяют оценить распределение этих величин по всему полю за весь период испытаний. При этом подсчет нулевых и ненулевых значений в *сумме* всех матриц-масок говорит о количестве точек, в которых встречается, соответственно, *хотя бы один раз* NA или число. Аналогичный подсчет нулей и единиц в *произведении* всех матриц-масок говорит о появлении в данной точке *во всех полях* интервала верификации либо пропуска, либо числа.

Как правило, в языках программирования имеются средства учета констант отсутствия, но соответствующие опции приходится задавать явно. При умолчаниях операция может выйти на аварийный стоп или точка поля с NA целиком исключается из анализа (даже при единственном пропуске в полной выборке полей). Одним из простейших способов преодоления опасностей такого рода является *цензурирование* выборок ("отбрасывание сора" и "отбрасывание крайних" [3]). Внимательный просмотр данных и устранение явных ошибок позволяет существенно улучшить обобщенные характеристики архивов. Так, удаление одного "сбойного" поля из архива наблюдений в холодный период кардинально изменило интегральную оценку наличия данных: *по объединению* констант отсутствия стало 2 728 248 против 3 996 522, в то время как *по пересечению* прибавилось числовых значений 1 468 353 против 200 079! При таких условиях возможны и критичные потери при использовании матричной арифметики в языке программирования, и рост дисперсии выборочных ошибок в статистических оценках.

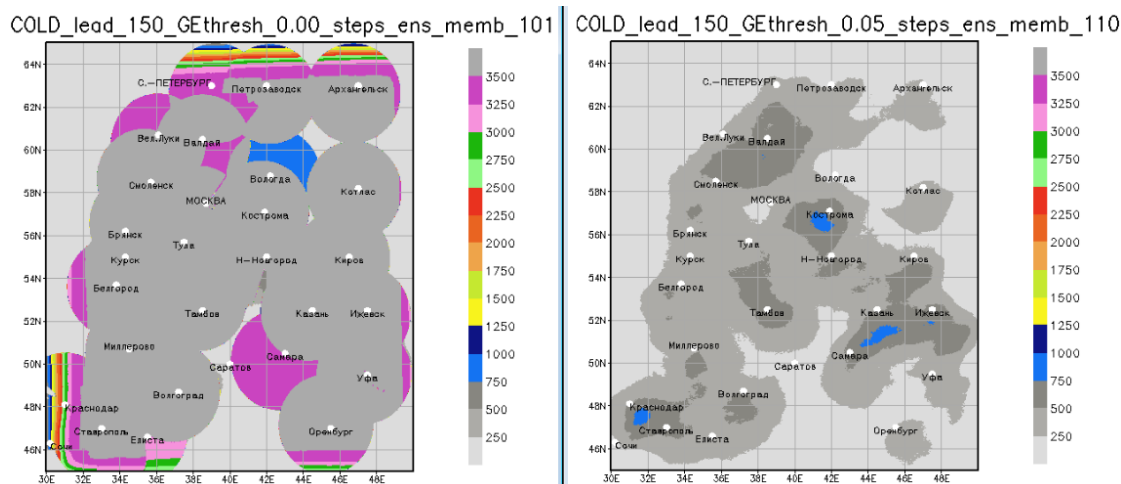
Очевидно, что проблема цензурирования выбросов не имеет универсального решения, особенно когда значение балансирует на грани экстремумов и вместо "мусора" может быть выброшен существенный элемент выборки. В этой связи к цензурированию следует прибегать при наличии дополнительных сведений или других представлений исследуемой величины.

### 3. Область верификации и пространственное осреднение полей

#### 3.1. Проблема определения области верификации

Трудности при верификации доставляют не только переменные объемы выборок в точках полей, порождаемые константами отсутствия и условиями на значение интенсивности, но и те пропуски, которыми заполняется тыловая область набегающего извне потока. На левой панели рис. 2 видны разноцветные полосы на северо-западной и юго-

западных частях карты (напомним, на условной карте направление "юг-север" идет от нижнего левого угла к верхнему правому углу).



**Рис. 2.** Поля объемов выборок в точках 10-го поля ансамбля прогнозов на 150 мин при допуске всех значений, кроме констант отсутствия (левая панель), и при допуске значений  $p_{res} \geq 0.05$  (правая панель).

Условие  $p_{res} \geq 0.05$  мм полностью устраняет краевые сюрпризы (рис. 2, правая панель), но за счет уменьшения объемов выборок в точках поля: вместо более 3500 пар полей в большей части карты приходится довольствоваться объемами до 500–750 пар полей. Подобная картина была описана в работе [10] об испытаниях в теплый период. Левая панель рис. 2 может интерпретироваться как систематическая ошибка модели в оценке скорости набегающего потока. Действительно, если климатологическая скорость потока равна примерно 10 м/с (36 км/ч), то шаг по времени 10 мин дает инкремент 6 км, а 150 мин – 90 км. Здесь же с условного севера и условного запада ширина "полосы отчуждения" составляет около 200 км ( $2^\circ$  долготы), т. е. модельная скорость с запада более чем в два раза выше средней скорости тропосферного ветра.

### 3.2. Пространственное осреднение исходных полей

На объединенных картах полей интенсивности и показателей качества в километровом разрешении имеются многочисленные, хаотически разбросанные, мелкие особенности (точки и пятна), которые сильно влияют на пространственное распределение показателей качества и часто затрудняют географическую интерпретацию полученных результатов. Мелкая пестрота карт была хорошо известна по предыдущим испытаниям схемы наукастинга, построенной на параллельном счете для зон обзора отдельных радиолокаторов ЦФО [7, 8]. Одним из оправдательных рефренов при обсуждении невысоких результатов верификации по полям высокого разрешения было признание, что крайне трудно попадать

"пулей в пулю". На текущем этапе испытаний было принято решение производить предварительное пространственное осреднение по непересекающимся квадратам размера  $10 \times 10$ , который отражает мезомасштабный характер процессов с осадками, но удаляет несущественные пространственные мелочи, включая случайные шумы.

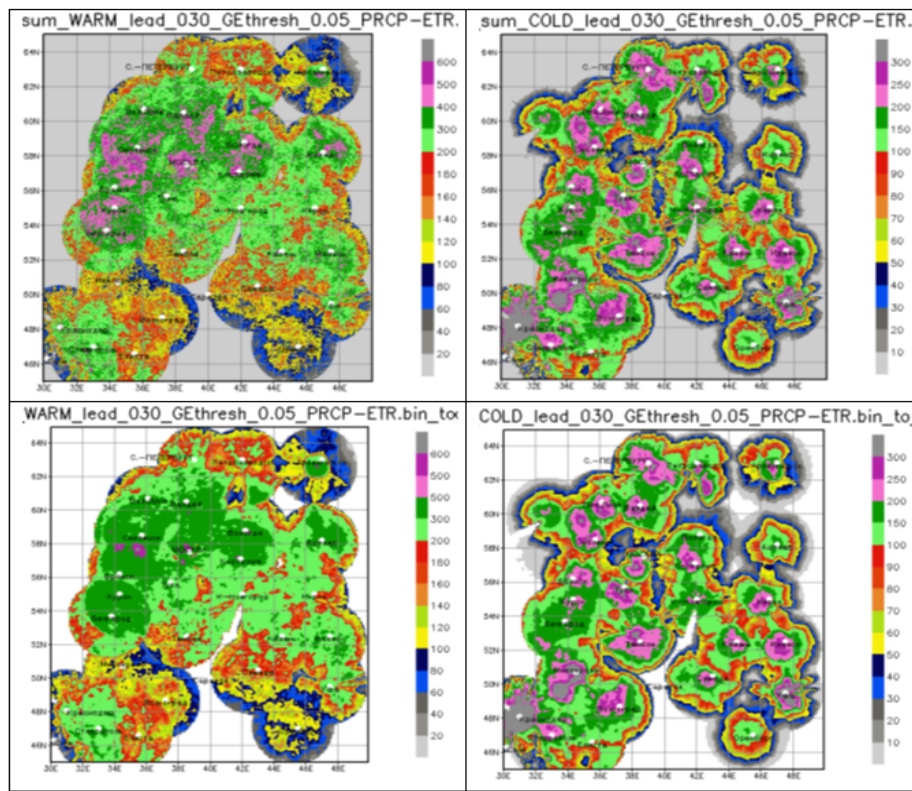
При выборе подходящего масштаба осреднения рекомендуется учитывать разнообразные физические и статистические свойства тех процессов, на которые пространственный фильтр может оказать губительное воздействие. Так как объединенное поле имеет разрешение 1 км и занимает территорию  $\sim 2000 \times 2000$  км, то соответствующие (идентифицируемые и моделируемые) процессы охватывают диапазон от мезомасштаба кучево-дождевых облаков и городской циркуляция (с временем жизни  $\sim 1$  час) до синоптического масштаба фронтов и тропических циклонов (с временем жизни порядка одних суток – одной недели) [1]. По отечественному и мировому опыту известно, что статистическая модель лагранжевой адвекции обеспечивает полезный прогноз на мелких масштабах лишь в первые два-три часа. И если сетка модели имеет километровое разрешение, а расчетная область имеет мезомасштабные размеры (до  $\sim 200$  км), то осреднение квадратом в  $10 \times 10$  узлов отфильтрует процессы горизонтального размера до  $\sim 50-70$  км. Мы используем оценку Вельтищева и Степаненко [1] о "разрешении объектов наблюдательной сетью", которая близка известной оценке Скамарока "эффективного разрешения" численной модели прогноза погоды в  $7\Delta x$  [16]. Очевидно, что подобная фильтрация не соответствует ни назначению модели, ни целям пространственной верификации. Однако если расчетная область имеет масштаб ЕТР и целью верификации является содержательная оценка качества прогностической модели по всей территории, то осреднение по квадратам со стороной в 10 узлов (км) вполне приемлемо: оно не исказит важные детали и даст более надежную статистическую оценку качества модели.

На рис. 3 показано, как поле сумм осадков может быть "очищено" выбранным методом пространственного осреднения.

#### **4. Оценки в точках, карты и пространственное распределение оценок**

Переход к осредненному полю и к соответствующей матрице данных в сто раз меньшего размера не устраняет граничных проблем, описанных в первом разделе. Однако исключение некоторых областей из дальнейшего анализа путем "вырезов" и переходом к усеченной матрице данных не только само по себе затруднительно (остается, например, вопрос о внутренних областях объединенного поля, находящихся вне зон видимости), но и усложняет программные алгоритмы расчетов. Было решено не обрезать и не вырезать

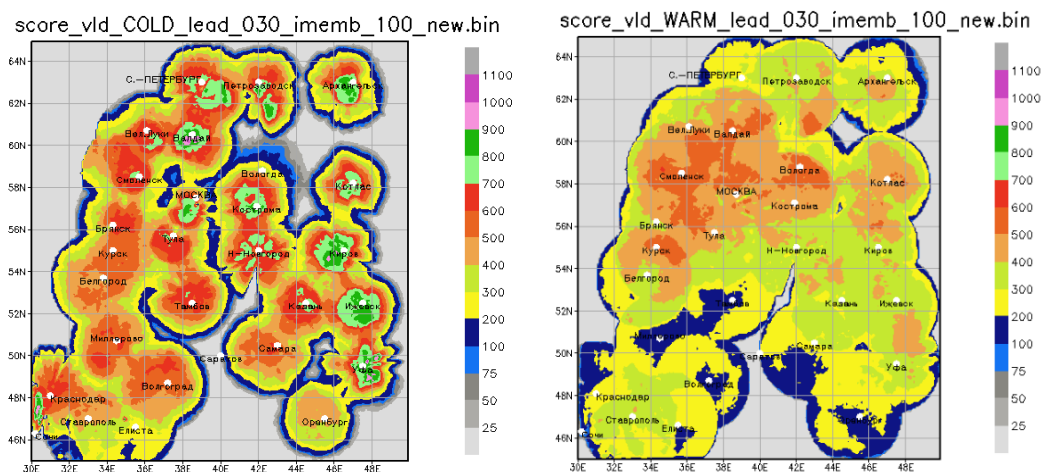
области сомнительных наблюдений и прогнозов, а проводить анализ по всем точкам поля в предположении, что комбинация карт показателей качества и 10 %-ных пространственных квантилей этих показателей позволят выделить, охарактеризовать и учесть области «граничных эффектов». Ниже все расчеты проводятся по пространственно осредненному полю размером 151×215.



**Рис. 3.** Накопленные суммы радиолокационных осадков в теплый период (левый столбец) и холодный период (правый столбец). В первой строке панелей исходные поля размером 1951×2151=4196601, во второй строке – поля размером 195×215=41925.

Оценки рассчитываются в каждой точке поля для отдельных полей прогностического ансамбля и для среднего по ансамблю поля. Применяется следующая аргументация. Если среднее по ансамблю поле лучше по качеству первого (основного) поля, то ансамбль оправдан. Если же среднее по ансамблю поле сравнимо по качеству с первым полем (или любым полем прогностического ансамбля), то при детерминистском прогнозировании следует предпочесть использование одного контрольного поля, а при вероятностном прогнозировании ансамбль оправдан при достаточной изменчивости самого ансамбля, позволяющей оценивать неопределенность прогнозов.

На рис. 4 приводятся карты распределения объемов выборок (или количества допусков) для обоих периодов при условии (наблюдение  $\geq 0.05$  & прогноз  $\geq 0.0$ ).



**Рис. 4.** Карты объемов выборок в точках объединенного поля при прогнозе на 30 минут в холодный период (левая панель) и в теплый период (правая панель).

На карте для холодного периода заметны очаги максимального количества ближе к центрам радиолокационного обзора. Отчетливая локализация очагов вызвана, как говорилось выше, "ограничениями радиолокационного метода" [5]. В основном наблюдается от 200 до 900 допусков из 3572 максимально возможных. То есть лишь в окрестности локаторов выборки в точках поля содержат примерно 25 % точек, удовлетворяющих условию (наблюдение  $\geq 0.05$ ). Тем не менее вблизи координат локаторов наблюдаются довольно высокие размеры выборок.

На карте для теплого периода очаги максимального количества допусков локализованы вокруг локаторов существенно меньше, чем на карте для холодного периода. Область максимальных размеров выборок совпадает в основном с территорией Центрального федерального округа (ЦФО). В основном наблюдаются от 200 до 900 допусков из 3667 максимально возможных, наибольшие объемы – те же примерно 25 % точек (900/3667), удовлетворяющих условию (наблюдение  $\geq 0.05$ ). При этом распределение объемов выборок более равномерно и вблизи локаторов не наблюдается очагов больших значений.

Покрытие данными для остальных заблаговременностей обоих периодов практически неотлично. Табл. 1 пространственного распределения по 10%-ным квантилям дают более детальную характеристику полей рис. 4. В данной таблице отмеченное выше наличие в холодный период очагов высоких размеров выборок можно проследить по столбцам 100%тах, очевидна существенная разница.

В данных для холодного периода в 10 % точек поля количество допусков составляет от 1 до 60, 56, ..., 44 в зависимости от заблаговременности. На картах это, очевидно, отдаленные от координат радиолокаторов области, входящие в зону упомянутых "ограничений радиолокационного метода" [5]. В данных для теплого периода в первых 10 % точек поля

объемы выборок растут до 182... 143 в зависимости от заблаговременности. По краям зон обзора в теплый период выборки имеют больший объем и нет такого сильного контраста от периферии к центру круга обзора, как в холодный период.

Таблица 1

**10%-ные квантили распределения объемов выборок в точках объединенного поля для холодного и теплого периодов и для заблаговременностей 30, 60, 90, 120 и 150 мин**

	распределение объемов выборок для верификации среднего поля ансамбля													
	lead	0%min	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%max	NAs	valid
Холодный период	030	1	60	144	234	311	384	443	504	567	651	1158	9502	32423
	060	1	56	141	230	310	383	442	505	566	649	1179	9523	32402
	090	1	53	135	225	306	380	440	502	564	648	1158	9540	32385
	120	1	48	127	217	301	376	437	500	562	647	1181	9555	32370
	150	1	44	118	206	290	369	432	495	558	645	1156	9617	32308
Теплый период	lead	0%min	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%max	NAs	valid
	030	3	182	216	252	293	329	358	389	427	476	618	9469	32456
	060	1	177	213	249	292	328	358	388	426	476	623	9471	32454
	090	1	171	209	246	290	327	357	388	427	476	618	9479	32446
	120	1	161	202	240	285	325	356	388	426	476	623	9488	32437
150	1	143	194	233	279	322	353	387	426	476	618	9516	32409	

*Примечание.* lead – заблаговременность; NAs и valid – количество пропусков и допусков соответственно. Используются данные для средних по ансамблю полей; для отдельных полей ансамбля разница незначительна.

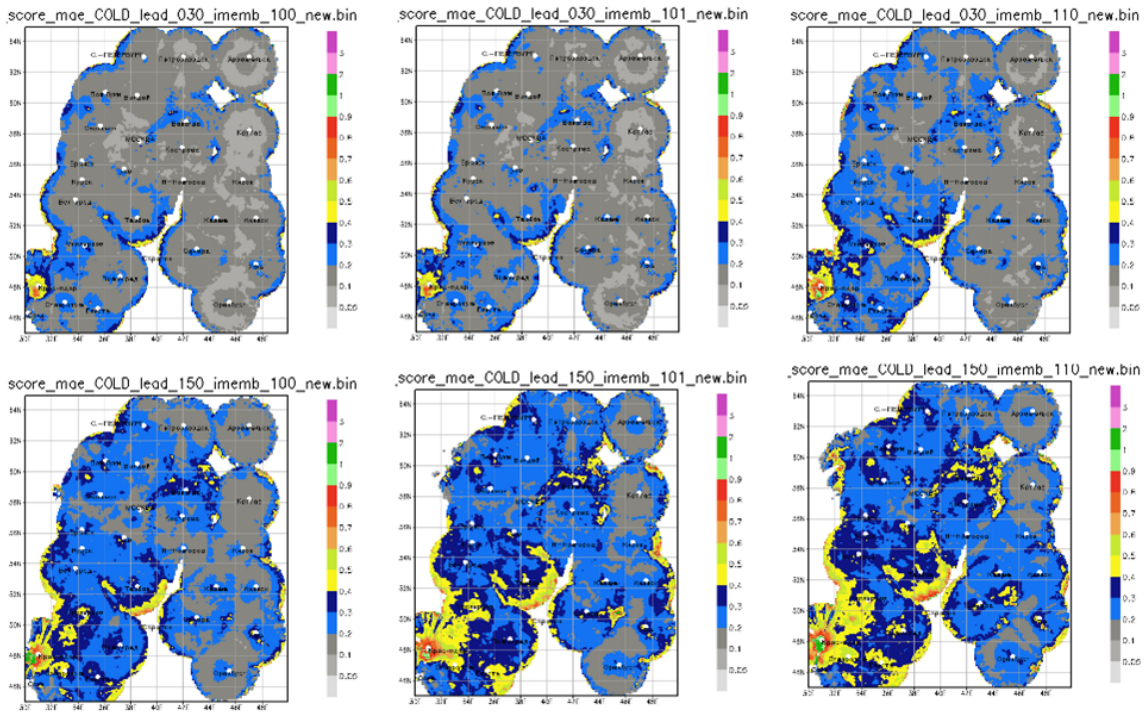
Ниже из непрерывных показателей качества приведем примеры только средней абсолютной ошибки (MAE), так как средняя ошибка (ME) не является надежной статистической характеристикой качества ввиду наличия многочисленных нулевых и малых значений интенсивности осадков в полном наборе полей в оба периода года.

#### 4.1. Средняя абсолютная ошибка (MAE) для полей ансамбля

На рис. 5 размещены поля средней абсолютной ошибки для среднего по ансамблю поля и для двух индивидуальных полей ансамбля.

С ростом заблаговременности и с увеличением номера поля ансамбля одновременно растут значения MAE, что подчеркивает особенности отдельных полей ансамбля. Судя по расцветке, MAE для среднего поля ансамбля заметно лучше (больше занято серым и синим цветом). Ошибки растут по краям, но особенно заметно "вспучивание" значений MAE в районе Сочи – Краснодар.

В соответствующей табл. 2 содержатся квантили пространственного распределения оценки MAE для холодного периода. Красным выделены квантили для среднего поля ансамбля: все они превышают соответствующие квантили индивидуальных полей, что свидетельствует о систематическом преимуществе ансамблевого метода перед стандартным прогнозом даже при столь небольшом объеме ансамбля.



**Рис. 5.** Поля средней абсолютной ошибки прогнозов на 30 мин (верхний ряд) и на 150 мин (нижний ряд) в холодный период. Прогностические поля: среднее по ансамблю – первый столбец, первое поле ансамбля (второй столбец) и десятое поле ансамбля (последний столбец).

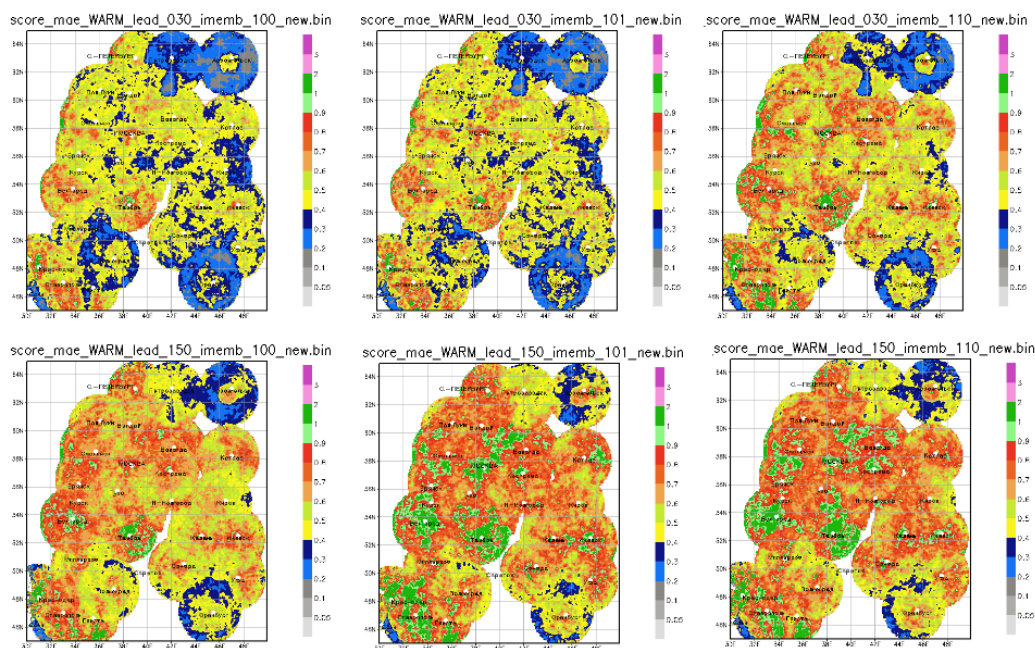
Таблица 2

**Пространственное распределение средней абсолютной ошибки прогнозов в холодный период для среднего по ансамблю поля (memb=100), первого (101), пятого (105) и десятого (110) полей ансамбля**

lead (min)	memb	spatial quantiles (NAs + valid = 41925 = 195x215) npairs = 3572 of max 24*151=3624								
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
030	100	0.0922	0.1071	0.1196	0.1322	0.1451	0.1591	0.1769	0.2038	0.2560
	101	0.0989	0.1152	0.1285	0.1412	0.1546	0.1699	0.1881	0.2164	0.2699
	105	0.1069	0.1237	0.1384	0.1529	0.1684	0.1850	0.2062	0.2374	0.2933
	110	0.1171	0.1356	0.1528	0.1697	0.1875	0.2060	0.2274	0.2588	0.3187
060	100	0.1264	0.1458	0.1617	0.1767	0.1925	0.2108	0.2312	0.2631	0.3189
	101	0.1397	0.1617	0.1801	0.1965	0.2133	0.2311	0.2540	0.2876	0.3460
	105	0.1472	0.1684	0.1864	0.2039	0.2227	0.2440	0.2703	0.3064	0.3667
	110	0.1545	0.1783	0.1998	0.2202	0.2413	0.2636	0.2891	0.3245	0.3909
090	100	0.1417	0.1633	0.1800	0.1961	0.2140	0.2335	0.2570	0.2911	0.3500
	101	0.1612	0.1863	0.2055	0.2238	0.2425	0.2629	0.2876	0.3227	0.3887
	105	0.1661	0.1906	0.2091	0.2281	0.2490	0.2718	0.3003	0.3369	0.3988
	110	0.1722	0.1997	0.2222	0.2425	0.2651	0.2893	0.3156	0.3523	0.4216
120	100	0.1480	0.1715	0.1896	0.2061	0.2247	0.2447	0.2686	0.3030	0.3629
	101	0.1714	0.1981	0.2185	0.2384	0.2582	0.2799	0.3058	0.3443	0.4125
	105	0.1744	0.2023	0.2235	0.2429	0.2637	0.2878	0.3158	0.3529	0.4174
	110	0.1797	0.2104	0.2342	0.2551	0.2759	0.2988	0.3262	0.3633	0.4337
150	100	0.1516	0.1747	0.1928	0.2099	0.2290	0.2507	0.2762	0.3093	0.3665
	101	0.1782	0.2051	0.2266	0.2477	0.2693	0.2921	0.3197	0.3575	0.4257
	105	0.1782	0.2078	0.2305	0.2521	0.2738	0.2988	0.3274	0.3631	0.4293
	110	0.1849	0.2159	0.2403	0.2618	0.2827	0.3069	0.3351	0.3737	0.4412

Примечание. lead – заблаговременность, memb – номер поля ансамбля.

Рис. 6 содержит карту ошибки MAE для теплого периода. Видно, что MAE намного больше аналогичных оценок в холодный период почти по всей области. Отчетливо проявляется "шайба" вокруг локатора Архангельска. Показатель MAE для среднего поля ансамбля также ниже оценок для индивидуальных полей. В соответствующей табл. 3 содержатся данные о пространственном распределении оценки MAE для теплого периода.



**Рис. 6.** Поля средней абсолютной ошибки прогнозов на 30 мин (верхний ряд) и на 150 мин (нижний ряд) в теплый период. Прогностические поля: среднее по ансамблю – первый столбец, первое поле ансамбля (второй столбец) и десятое поле ансамбля (последний столбец).

*Таблица 3*

**Пространственное распределение средней абсолютной ошибки прогнозов в теплый период для среднего по ансамблю поля и для первого поля ансамбля**

**оценка MAE для среднего поля ансамбля**

lead	0%min	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%max	NAs	valid
030	0.0918	0.2675	0.3306	0.3755	0.4098	0.4409	0.4743	0.5120	0.5611	0.6416	3.3441	9469	32456
060	0.0463	0.3425	0.4222	0.4756	0.5171	0.5551	0.5926	0.6360	0.6907	0.7735	4.9259	9471	32454
090	0.0174	0.3733	0.4518	0.5093	0.5527	0.5908	0.6294	0.6720	0.7237	0.8071	3.7448	9479	32446
120	0.0208	0.3834	0.4620	0.5188	0.5635	0.6028	0.6408	0.6816	0.7335	0.8182	4.8835	9488	32437
150	0.0226	0.3815	0.4634	0.5196	0.5642	0.6021	0.6389	0.6801	0.7309	0.8160	6.2713	9516	32409

**оценка MAE для 1-го поля ансамбля**

lead	0%min	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%max	NAs	valid
030	0.1172	0.2772	0.3442	0.3900	0.4270	0.4628	0.5002	0.5425	0.5978	0.6890	3.2585	9469	32456
060	0.1687	0.3707	0.4540	0.5112	0.5592	0.6032	0.6487	0.6991	0.7618	0.8605	4.1728	9469	32456
090	0.1698	0.4154	0.5022	0.5664	0.6155	0.6616	0.7086	0.7612	0.8260	0.9273	3.4722	9469	32456
120	0.1409	0.4374	0.5272	0.5928	0.6457	0.6927	0.7384	0.7898	0.8543	0.9529	4.1373	9469	32456
150	0.1022	0.4487	0.5424	0.6062	0.6579	0.7035	0.7501	0.8020	0.8644	0.9650	3.5110	9469	32456

Информативным можно считать диапазон квантилей от 0 % до 90 %. Кроме крайних квантилей ошибки с заблаговременностью ожидаемо растут до 120 мин, далее наступает

насыщение как некоторое указание на предел предсказуемости по данной метрике и для данного периода. Все значения (кроме "малонадежных" максимумов) превышают соответствующие значения MAE в холодный период. В этот период точно так же ошибка прогноза по среднему поля ансамбля ниже ошибок по отдельным полям ансамбля для всех заблаговременностей.

#### **4.2. Замечание о "превосходстве" прогнозов в холодный период по MAE**

Наибольшая достоверность радиолокационных измерений осадков на сети ДМРЛ Росгидромета обеспечивается на удалениях до ~100 км от радиолокаторов, где проводятся радиолокационные наблюдения на уровне измерения осадков (600 м) и не используется экстраполяция значений отражаемости с вышележащих уровней. Это хорошо видно на представленных картах MAE для холодного периода. По средней абсолютной ошибке в этих областях прогнозы в холодный период имеют более высокое качество, чем прогнозы в теплый период. Однако распространение данного "преимущества" на остальную часть круга обзора, и тем самым на все пространство ЕТР, не совсем корректно по следующим соображениям. В области за пределами выделенного круга сказывается неоднократно упоминаемое "ограничение радиолокационного метода", которое проявляется на осредненных по всему периоду картах. Это приводит к систематическому занижению интенсивности в прогнозах и к систематическому уменьшению показателя MAE: неравенство  $\text{abs}(f-o) \leq \text{max}(f,o)$  справедливо для любых положительных  $f$  и  $o$ . Данное обстоятельство лишний раз подтверждает необходимость верификации р/л наукастинга с помощью третьего, независимого источника (модели, спутника, но в наилучшем случае – наземных автоматических дождемеров).

#### **4.3. Категорийные показатели**

Для выделения порогов, используемых в категорийной верификации, требуются сведения о свойствах интенсивности осадков, восстанавливаемых по данным радиолокаторов. Для этих целей были рассчитаны пространственные 10%-ные квантили интенсивности с расчетом количества точек со значениями  $\geq 0.05$  мм/ч и  $\geq 0.0$  для статистического анализа количества допусков и констант отсутствия (помеченных числом -999). Рассчитано тринадцать характеристик для всех полей радиолокационных оценок R в холодный и теплый периоды (порядка 22 тыс. сроков в каждом). При этом оценены минимальные, средние и максимальные значения пространственных квантилей, а также количество "допусков" как по полным периодам, так и отдельно по месяцам.

На основе этих расчетов построена "климатология" пространственных характеристик интенсивности радиолокационных осадков ( $\geq 0.05$ ) по обоим периодам и выделены пороги превышения  $\text{thr} = \{0.5, 1.0, 2.0, 3.0 \text{ мм/ч}\}$ . Исключен использованный ранее порог интенсивности 4 мм/ч, приводивший к почти полному вырождению характеристик и оценок.

На рис. 7 дана стандартная схема двухвходовой таблицы сопряженности с мнемоническим описанием условий по строкам и столбцам в виде неравенств относительно порога  $\text{thr}$ . Во внутренние ячейки таблицы под двумерными номерами (1,1), (1,2), (2,1) и (2,2) записывается количество случаев  $a, b, c$  и  $d$  совместных событий, соответствующих условиям сопряженности. Наиболее простым образом ячейки описываются переводами англоязычных терминов из *теории обнаружения сигнала*: *попадания* (hits,  $a$ ); *ложные тревоги* (false alarms,  $b$ ); *промахи*, или *пропуски* (misses,  $c$ ); *корректные*, или *правильные отклонения* (correct rejections,  $d$ ). Натуральные числа  $a, b, c$  и  $d$ , включая нуль, используются в определениях описательных и критериальных оценок качества прогноза события ( $\text{prec} \geq \text{thr}$ ).

		наблюдение		
		$\geq \text{thr}$	$< \text{thr}$	
прогноз	$\geq \text{thr}$	$a$	$b$	$a+b$
	$< \text{thr}$	$c$	$d$	$c+d$
		$a+c$	$b+d$	$n$

**Рис. 7.** Таблица сопряженности для записи количества совместных событий, определяемых конъюнкцией условий по строкам и столбцам.

Перечислим использованные или упоминаемые в данной статье описательные и критериальные оценки качества прогнозов, рассчитываемые по элементам таблицы сопряженности (рис. 7) [14, 17]. В кавычках добавлены привычные отечественные термины [11]. В квадратных скобках указан диапазон изменения характеристики, красным цветом – значение характеристики для идеального прогноза.

1. **H** – доля попаданий, "предупрежденность наличия явления", Hit Rate:

$$H = a/(a+c), [0, \mathbf{1}].$$

2. **F** – доля ложных тревог, "предупрежденность отсутствия явления", False Alarm Rate:

$$F = b/(b+d), [\mathbf{0}, 1].$$

3. **PC** – "общая оправдываемость", Percent Correct:  $PC = (a+d)/n, [0, \mathbf{1}].$

4. **Bias** – смещение, сдвиг, отношение повторяемостей, Bias:

$$\text{Bias} = (a+b)/(a+c), [0, \text{inf}], \mathbf{1}.$$

5. **TS** – оценка угрозы, Threat Score:  $\text{TS} = a/(a+b+c), [0, \mathbf{1}]$ .

6. **ETS** – беспристрастная оценка угрозы, Equitable Threat Score; или критерий Гилберта (GSS, Gilbert Skill Score). Это оценка TS, рассчитанная относительно случайной доли попаданий:

$$\text{ETS} = (\text{TS} - \text{TS}_{\text{ref}})/(1 - \text{TS}_{\text{ref}}), \text{TS}_{\text{ref}} = a_{\text{ref}}/(a+b+c), a_{\text{ref}} = (a+b)(a+c)/n, [-1/3, \mathbf{1}].$$

7. **PSS** – Критерий Пирса-Обухова, Pierce Skill Score:  $\text{PSS} = H - F, [-1, +\mathbf{1}]$ .

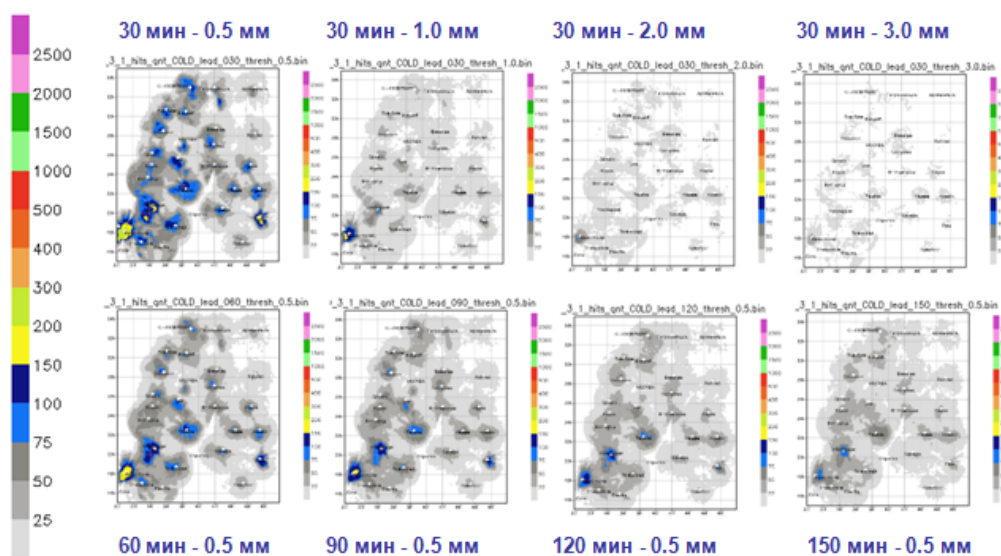
8. **EDI** – индекс экстремальной зависимости, Extremal Dependence Index:

$$\text{EDI} = (\log F - \log H)/(\log F + \log H), [-1, +\mathbf{1}].$$

#### 4.3.1. Количество попаданий и количество правильных отклонений

Будем далее для простоты записывать порог числом без указания размерности [мм/ч].

Ячейка двухвходовой таблицы сопряженности (1,1), т. е. количество **a** правильно предсказанных событий ( $\text{prec} \geq \text{thr}$ ) для порогов 0.5, 1.0, 2.0 и 3.0 при прогнозе на 30 мин, а также для порога 0.5 при прогнозах на 60, 90, 120 и 150 мин представлена в виде набора соответствующих карт на рис. 8.



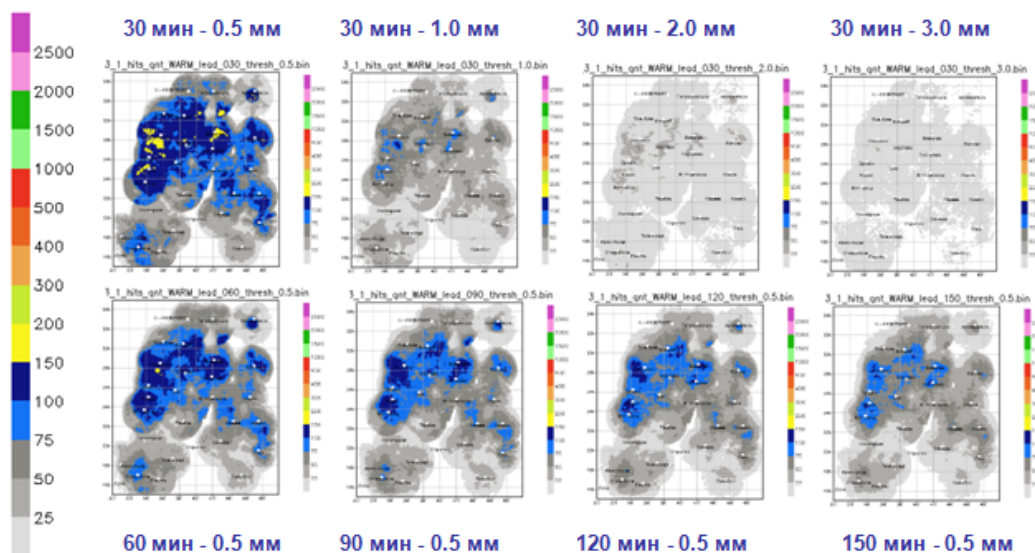
**Рис. 8.** Картография ячейки (1,1) таблицы сопряженности: количество попаданий при прогнозах превышений порогов интенсивности осадков в холодный период.

Верхний ряд карт рис. 8 демонстрирует уменьшение количества допусков с ростом порогов. Аналогично уменьшается количество допусков с ростом заблаговременности, если проследить от первой карты верхнего ряда и далее по всем картам нижнего ряда слева направо. Очаги точных попаданий, локализованные вокруг локаторов и расположенные вдоль левого края поля от нижнего левого угла к верхнему правому углу (западная сторона

фактической карты), довольно согласованно затухают с ростом заблаговременности. Общую тенденцию можно назвать *деградацией пространственной связности* поля характеристики.

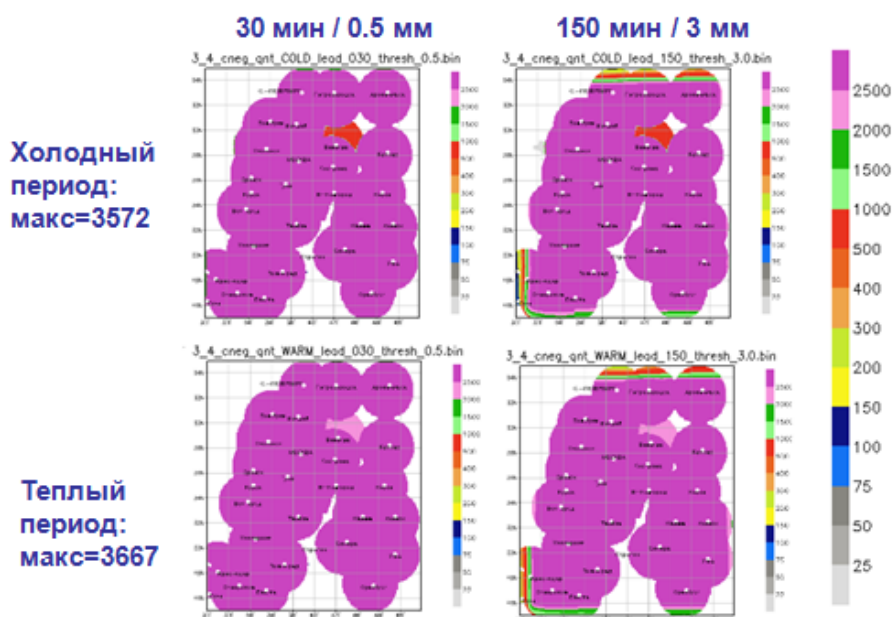
Рассмотрим такие же последовательности карт для теплого периода (рис. 9).

В данном случае очаг точных попаданий охватывает в основном западную и центральную части России, в общем совпадающую с территорией ЦФО. Односвязность поля характеристики в целом сохраняется. Как и на прежних картах, отчетливо видна "шайба" вокруг локатора Архангельск.



**Рис. 9.** Картография ячейки (1,1) таблицы сопряженности: количество попаданий при прогнозах превышений порогов интенсивности осадков в теплый период.

Приведем четыре карты для ячейки (2,2) таблицы сопряженности – количество правильных отклонений события (correct rejections) (рис. 10).



**Рис. 10.** Картография ячейки (2,2) для количества точных отклонений в оба периода при 30-минутных прогнозах превышения 0.5 мм и 150-минутных прогнозов превышения 3 мм.

На данных картах никаких очагов не наблюдается ввиду больших размеров выборок практически во всех точках поля. Отчетливо проявляются те же краевые эффекты в виде разноцветных полос с ростом заблаговременности. Тот факт, что при прогнозе на 30 мин превышения 0.05 мм/ч и при прогнозе на 150 мин превышения 3 мм/ч количество допусков оказалось не менее 2500 случаев в большей части карты, свидетельствует о перегруженности ячейки (2,2). Как правило, в таких случаях ячейка (1,1) попаданий и ячейка (1,2) ложных тревог таблицы сопряженности стремятся к нулю и даже обнуляются ("вырождаются"). С проблемой вырождения таблиц сопряженности систематически сталкиваются при прогнозах редких (и экстремальных) явлений, при которых не рекомендуется использовать для оценки качества ни общую оправдываемость (PC), ни критерий Пирса-Обухова (PSS) [6, 14]. Тем не менее показатель PSS будет представлен для всех порогов наряду с рекомендованным для редящих выборок показателем экстремальной зависимости EDI.

#### 4.3.2. Показатель смещения, или отношение повторяемостей (BIAS)

Большинство показателей будут демонстрироваться в панелях аналогично расположению карт на рис. 8 и 9.

Рассмотрим смещение прогнозов (BIAS) в точках поля, т. е. отношение количества прогнозов события к количеству самих событий (рис. 11). Если смещение больше/меньше 1, то количество прогнозов превышения заданного порога превышает/занижает количество фактических превышений этого порога, при этом количество ложных тревог больше/меньше количества промахов за период испытаний.

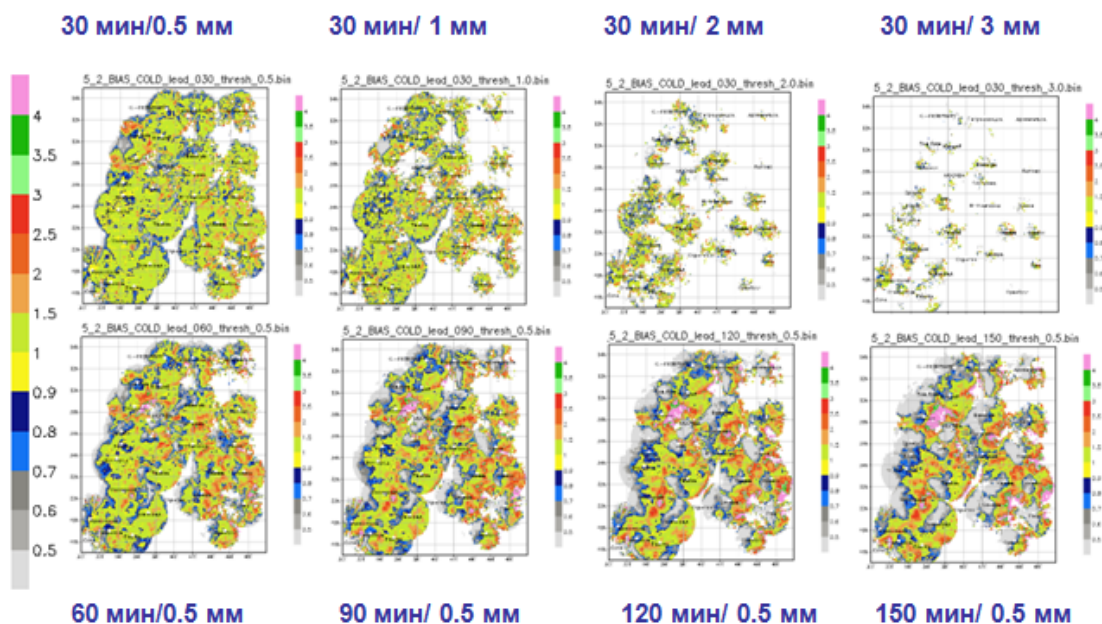


Рис. 11. Картография показателя смещения (BIAS) прогнозов для холодного периода.

В панелях рис. 11 заметны следующие особенности:

- 1) деградация связности поля с ростом порога при прогнозе на 30 мин начиная с порога 2 мм;
- 2) рост краевого эффекта с ростом заблаговременности (накопление синего цвета на западной части условной карты – занижение прогнозом повторяемости события);
- 3) наличие близких по пространству противоположных смещений (синего и красного цвета).

Полный количественный анализ пространственного распределения показателя BIAS содержится в табл. 4.

Таблица 4

**Пространственное распределение показателя BIAS по 10%-ным квантилям в холодный период с указанием количества значащих чисел (допусков, valid) в поточечных выборках**

30 минут	thresh	0%min	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%max	zeros	valid
	0.5	0.0241	0.6667	0.8090	0.8971	0.9688	1.0268	1.0952	1.1776	1.2941	1.5319	13.5000	12375	29550
	1.0	0.0309	0.6136	0.7500	0.8571	0.9545	1.0000	1.1250	1.2400	1.4000	1.7143	10.7500	18399	23526
	2.0	0.0408	0.5556	0.6667	0.8000	0.9225	1.0000	1.0909	1.2500	1.4732	1.7500	8.0000	30358	11567
	3.0	0.0667	0.5714	0.6667	0.8000	1.0000	1.0000	1.0000	1.2222	1.4000	1.7143	6.0000	37073	4852
<b>60 минут</b>														
	0.5	0.0241	0.5306	0.7037	0.8235	0.9275	1.0246	1.1379	1.2746	1.4792	1.9091	21.0000	12680	29245
	1.0	0.0556	0.4667	0.6197	0.7435	0.8571	1.0000	1.1000	1.2684	1.5000	2.0000	21.5000	19482	22443
	2.0	0.0357	0.3846	0.5000	0.6250	0.7333	0.8571	1.0000	1.1667	1.4375	2.0000	13.0000	32148	9777
	3.0	0.0513	0.4000	0.5000	0.6154	0.7000	0.8333	1.0000	1.0000	1.3333	1.8571	8.5000	38720	3205
<b>90 минут</b>														
	0.5	0.0328	0.4324	0.6088	0.7467	0.8760	1.0000	1.1538	1.3472	1.6250	2.2143	32.5000	13128	28797
	1.0	0.0426	0.3636	0.5000	0.6333	0.7619	0.9000	1.0690	1.3000	1.6429	2.3333	33.0000	21007	20918
	2.0	0.0123	0.2857	0.3750	0.5000	0.5714	0.6923	0.8333	1.0000	1.3333	2.0000	17.0000	34699	7226
	3.0	0.0556	0.2857	0.3777	0.5000	0.5833	0.6667	0.8333	1.0000	1.2420	1.6667	12.0000	40316	1609
<b>120 минут</b>														
	0.5	0.0319	0.3606	0.5263	0.6726	0.8191	0.9775	1.1558	1.3846	1.7500	2.5806	47.0000	13625	28300
	1.0	0.0351	0.2820	0.4118	0.5294	0.6522	0.8000	1.0000	1.2674	1.6667	2.4444	28.0000	22646	19279
	2.0	0.0588	0.2222	0.3000	0.3704	0.4500	0.5556	0.6667	0.9000	1.2000	1.8000	17.0000	36825	5100
	3.0	0.0714	0.2222	0.3333	0.4000	0.5000	0.6000	0.7500	1.0000	1.0000	1.6667	9.0000	41215	710
<b>150 минут</b>														
	0.5	0.0227	0.3148	0.4592	0.6000	0.7544	0.9254	1.1250	1.4000	1.8421	2.7917	37.0000	14008	27917
	1.0	0.0244	0.2284	0.3333	0.4400	0.5588	0.7073	0.9048	1.2000	1.6250	2.4286	27.5000	24249	17676
	2.0	0.0645	0.1818	0.2500	0.3333	0.4000	0.5000	0.6667	0.8333	1.0000	1.6583	13.5000	38733	3192
	3.0	0.0741	0.1690	0.2500	0.3000	0.3677	0.5000	0.5945	0.6667	1.0000	1.3515	8.5000	41621	304

*Примечание.* zeros – количество точек поля с константами отсутствия и с нулями; valid – количество точек поля со значащими числами. Красный цвет – явные выбросы. Зеленый цвет – BIAS в пределах  $0.5 \leq \text{BIAS} \leq 1.5$ .

Наличие явных выбросов в максимальных квантилях подтверждает необходимость цензурирования данных для верификации. С ростом порогов и заблаговременности растет количество точек с нулевыми значениями и соответственно падает количество точек со значащими числами. Так, при прогнозе на 150 мин для порога 3.0 мм/ч имеется всего 304 точки поля, в которых возможны оценки показателя. Снижение объемов выборок происходит с растущей недооценкой площади явления и с увеличением количества "выбросов" около максимального значения показателя. Можно утверждать, что при прогнозе

на 30 мин не более 70 % территории занято "приемлемыми" значениями показателя для всех порогов; для 60 мин – не более 70–60 %; а для 150 мин – не более 40 %.

Небольшие числа в табл. 5 являются причиной разрушения связности поля показателя из-за редящих выборок и из-за обнуления ячеек (1,2) и (2,1) с ростом порога и иногда с ростом заблаговременности. Повторяемость события,  $(hits+misses)/3572$ , при прогнозе на 30 мин имеет максимальное значение в  $(325+420)/3572 = 0.21$  для порога 0.5 мм/ч и  $(50+73)/3572 = 0.034$  для порога 3 мм/ч (менее 35 случаев на тысячу наблюдений в точке).

Таблица 5

**Пространственное распределение попаданий и промахов по 10%-ным квантилям в холодный период в поточечных выборках с указанием количества точек поля с нулями (zeros) и положительными числами (valid)**

ХОЛОД													
thresh	0%min	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%max	zeros	valid
ПРОГНОЗ 30 МИН													
hits													
0.5	1	3	8	13	20	28	38	49	62	81	325	11303	30622
1.0	1	1	2	4	6	8	11	15	20	27	182	15923	26002
2.0	1	1	1	1	2	2	3	4	6	8	84	26017	15908
3.0	1	1	1	1	1	1	2	2	3	4	50	32850	9075
misses													
0.5	1	3	6	9	12	16	20	24	30	38	420	10532	31393
1.0	1	1	2	3	5	6	8	10	13	18	296	14110	27815
2.0	1	1	1	1	2	2	3	4	5	7	153	22901	19024
3.0	1	1	1	1	1	2	2	2	3	4	73	29394	12531
ПРОГНОЗ 150 МИН													
hits													
0.5	1	2	3	5	8	12	16	21	27	35	105	13568	28357
1.0	1	1	1	2	2	3	4	5	7	9	35	23500	18425
2.0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	17	37706	4219
3.0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	4	10	41254	671
misses													
0.5	1	4	9	15	21	29	39	51	64	81	469	10763	31162
1.0	1	2	3	5	7	10	15	20	26	35	324	13699	28226
2.0	1	1	1	2	3	4	5	6	8	12	162	21211	20714
3.0	1	1	1	1	2	2	3	3	4	6	75	27470	14455

*Примечание.* Квантили пространственного распределения рассчитываются только по ненулевым значениям попаданий и ненулевым значениям промахов.

На рис. 12 с картами показателя смещения для теплого периода просматривается более целостная картина по сравнению с картами для холодного периода. И здесь наблюдается растущее с ростом порога обилие пространственно близких значений показателя по обе стороны от единицы, но в намного меньшей степени, чем для холодного периода. При этом распад единства поля показателя нарастает после порога 1 мм. Заметно меньше меняется поле показателя BIAS при росте заблаговременности на пороге 0.5, если оценивать тенденцию последовательно от первой верхней панели и далее по нижнему ряду панелей слева направо.

Данные, аналогичные табл. 4, но для теплого периода, собраны в табл. 6.

Видно, что "приемлемыми" оценками показателя BIAS покрыто больше территории, чем в холодный период, при этом объемы выборок (по столбцу valid) падают не так стремительно.

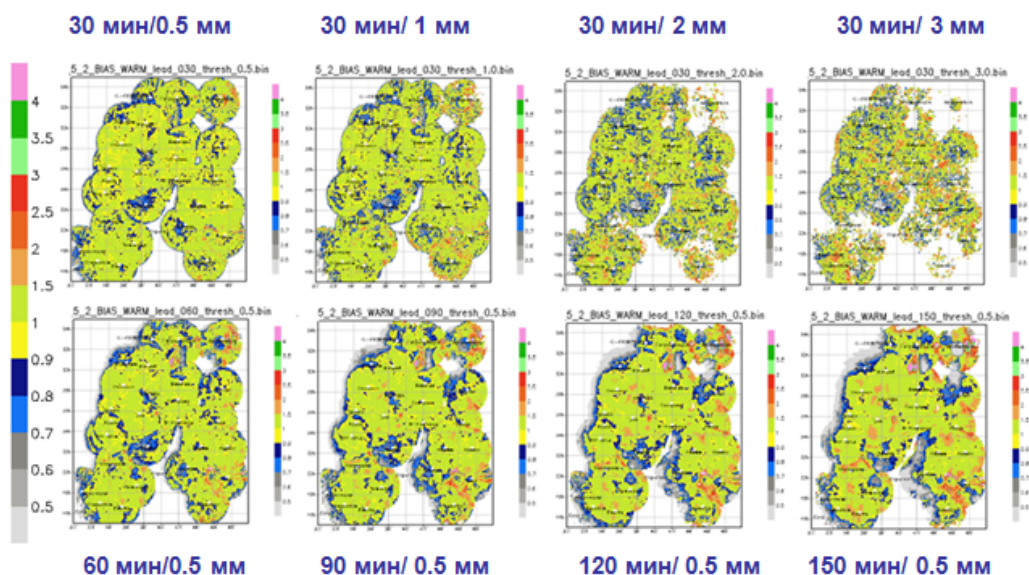


Рис. 12. Картография показателя смещения (BIAS) прогнозов для теплого периода

Таблица 6

Пространственное распределение показателя BIAS по 10%-ным квантилям в теплый период с указанием количества значащих чисел (допусков, valid) в поточечных выборках

30 мин	thresh	0%min	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%max	zeros	valid
30 мин	0.5	0.0234	0.7882	0.8723	0.9204	0.9571	0.9907	1.0235	1.0619	1.1104	1.1974	8.2500	9677	32248
	1.0	0.0364	0.7368	0.8391	0.9032	0.9535	1.0000	1.0519	1.1099	1.1875	1.3333	14.3333	10287	31638
	2.0	0.0625	0.6500	0.7727	0.8571	0.9302	1.0000	1.0833	1.1765	1.3043	1.5217	13.0000	12870	29055
	3.0	0.1053	0.6000	0.7273	0.8333	0.9231	1.0000	1.1250	1.2500	1.4167	1.7143	6.3333	16600	25325
60 мин	0.5	0.0198	0.7059	0.8310	0.9034	0.9574	1.0000	1.0518	1.1020	1.1687	1.2909	14.7500	9794	32131
	1.0	0.0312	0.6458	0.7778	0.8646	0.9333	1.0000	1.0667	1.1458	1.2523	1.4706	14.6667	10746	31179
	2.0	0.0625	0.5556	0.6875	0.7895	0.8750	0.9655	1.0588	1.1765	1.3333	1.6300	13.5000	14337	27588
	3.0	0.0800	0.5000	0.6250	0.7333	0.8333	0.9412	1.0588	1.2000	1.4000	1.7500	12.0000	19855	22070
90 мин	0.5	0.0174	0.6522	0.8077	0.8971	0.9628	1.0213	1.0795	1.1429	1.2299	1.3933	19.7500	9985	31940
	1.0	0.0400	0.5758	0.7273	0.8269	0.9107	0.9903	1.0678	1.1622	1.2933	1.5625	29.5000	11279	30646
	2.0	0.0476	0.4737	0.6087	0.7099	0.8056	0.9000	1.0000	1.1316	1.3077	1.6250	19.0000	16230	25695
	3.0	0.0769	0.4115	0.5333	0.6364	0.7333	0.8421	1.0000	1.1111	1.3333	1.6667	13.0000	23627	18298
120 мин	0.5	0.0185	0.5942	0.7835	0.8889	0.9684	1.0394	1.1087	1.1834	1.2878	1.4902	21.2500	10196	31729
	1.0	0.0364	0.5000	0.6800	0.7917	0.8814	0.9667	1.0541	1.1585	1.3077	1.6111	24.0000	12017	29908
	2.0	0.0444	0.4062	0.5385	0.6418	0.7333	0.8235	0.9286	1.0588	1.2500	1.5882	17.0000	18571	23354
	3.0	0.0444	0.3333	0.4545	0.5455	0.6364	0.7273	0.8333	1.0000	1.1667	1.5000	12.0000	27404	14521
150 мин	0.5	0.0250	0.5635	0.7667	0.8889	0.9756	1.0536	1.1333	1.2222	1.3446	1.5942	21.0000	10418	31507
	1.0	0.0417	0.4571	0.6309	0.7500	0.8493	0.9394	1.0306	1.1429	1.3000	1.6250	33.5000	12752	29173
	2.0	0.0345	0.3462	0.4706	0.5714	0.6591	0.7500	0.8500	1.0000	1.1429	1.4545	14.5000	21128	20797
	3.0	0.0571	0.2941	0.3889	0.4615	0.5385	0.6250	0.7222	0.8382	1.0000	1.3135	8.5000	31148	10777

Данные, аналогичные табл. 5, собраны в табл. 7, содержащей квантильное распределение по пространству значений соответствующих ячеек таблицы сопряженности. По сравнению с табличными характеристиками для холодного периода, здесь намного больше чисел выше единицы, а это значит, что пространственная оценка качества обеспечена более значительными объемами выборок и оказывается тем самым статистически более надежной.

**Пространственное распределение попаданий и промахов по 10%-м квантилям  
в теплый период в поточечных выборках с указанием количества точек поля с нулями (zeros)  
и положительными числами (valid)**

thresh	0%min	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%max	zeros	valid
ПРОГНОЗ 30 мин													
hits													
0.5	1	22	35	47	59	69	80	92	105	123	195	9560	32365
1.0	1	6	13	19	24	30	35	41	49	60	115	10033	31892
2.0	1	2	4	6	7	9	12	14	17	22	57	12199	29726
3.0	1	1	2	3	3	4	5	7	8	11	33	15371	26554
misses													
0.5	1	16	21	25	29	32	36	41	46	53	136	9485	32440
1.0	1	7	11	14	17	20	23	26	30	35	88	9573	32352
2.0	1	3	5	6	8	10	12	14	16	20	54	10329	31596
3.0	1	2	3	4	5	6	7	8	10	13	34	11808	30117
ПРОГНОЗ 150 мин													
hits													
0.5	1	6	12	19	26	33	40	48	58	71	115	10360	31565
1.0	1	2	4	6	8	10	13	16	21	27	62	12685	29240
2.0	1	1	1	2	2	3	3	4	5	7	24	20992	20933
3.0	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	9	30888	11037
misses													
0.5	1	23	37	46	56	65	73	82	93	107	207	9676	32249
1.0	1	10	18	25	32	38	44	50	58	68	139	9956	31969
2.0	1	4	7	10	14	17	20	24	28	34	77	10759	31166
3.0	1	2	4	6	7	9	11	13	16	20	52	11968	29957

Все же в максимальных квантилях (по пространственным долям порядка 10 % от полного поля) значения показателя вполне сравнимы со своими аналогами в табл. 5 для холодного периода, таким образом, и здесь также возможны нежелательные выбросы и неустраняемые граничные эффекты.

### 4.3.3. Беспристрастная оценка угрозы (ETS)

Английское название показателя ETS (Equitable Threat Score) – дань традиции и не соответствует свойству показателя [17]. Дело в том, что эпитет equitable означает оценку нулевым значением случайного и неизменного прогнозов, а также вознаграждение правильного прогноза редкого явления. Как выяснилось, данный показатель, впервые предложенный Гилбертом в 1884 г., не стремится к нулю на случайных прогнозах при конечных выборках, но "беспристрастен" в асимптотическом смысле, т. е. при стремлении объема выборки к бесконечности. В связи с этим рекомендуется название Gilbert Skill Score (GSS, критерий Гилберта), но в англоязычных публикациях, и вслед за ними в наших переводах, сохраняется традиционное наименование и сокращение.

Напомним определение показателя ETS и отчасти справедливо приписываемые ему свойства, основываясь на обозначениях ячеек таблицы сопряженности (рис. 13). Данный показатель строится как критерий (skill score) на оценке (score) TS:

$$TS = a/(a+b+c), TS_{ref} = a_{ref}/(a+b+c), a_{ref} = (a+b)(a+c)/n,$$

$$ETS = (TS - TS_{ref}) / (1 - TS_{ref}) = (a - a_{ref}) / (a - a_{ref} + b + c).$$

Число  $a_{ref}/n$  равно произведению маргинальных вероятностей, которому равнялась бы доля попаданий при статистической независимости прогнозов и наблюдений. Таким

образом, положительное ETS оценивает превышение качества прогнозов над случайным прогнозом. Однако данный показатель вполне корректно оценивает преимущество методического прогноза над случайным прогнозом лишь на выборках из примерно более трех десятков значений. На более редких событиях он может вырождаться и приводить к неестественно высокой оценке [15].

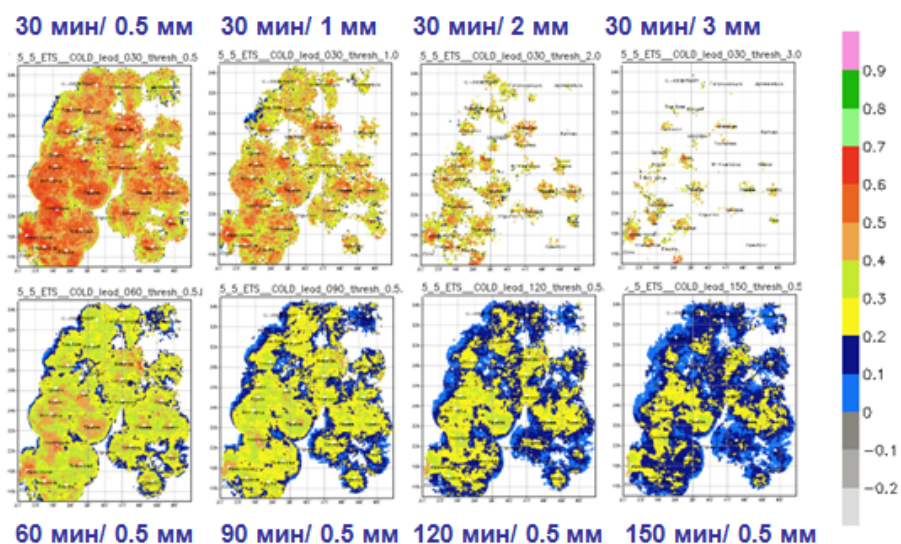


Рис. 13. Картография показателя ETS прогнозов для холодного периода.

По верхнему ряду панелей видно, что диапазон оценок 0.4–0.6 (для порога 0.5 мм) изменяется примерно до 0.3–0.5 (для порога 1 мм). Как и для доли попаданий, пороги 2 и 3 мм оказываются "деструктивными", на них пространственная связность теряется, растет пятнистость. Тем не менее сохраняющиеся пятна и даже отдельные точки (в реальности это квадраты 10×10 км) отражают очаги редких явлений, иногда удовлетворительно предсказанных.

Последовательность от левой верхней панели (прогноз на 30 мин) и всего нижнего ряда панелей (прогнозы от 60 до 150 мин) демонстрирует падение качества от 0.4–0.7 до 0.0–0.3 (от "красного" цвета до "синего"), здесь также заметна очаговая локализация высоких значений показателя.

Рис. 14 содержит картографию показателя ETS для теплого периода. Все пороги не столь деструктивны, как в холодный период, хотя на 2 и 3 мм заметна растущая хаотизация, когда рядом могут возникать значения из противоположных краев диапазона изменения показателя. По панелям прогноза на 30 мин (с ростом порога) максимальные значения показателя изменяются от ~0.7 на пороге 0.5 мм до ~0.4 на порогах 2 и 3 мм. Нижний ряд представляет также более целостную пространственную картину, чем в холодный период; однако видно, что с ростом заблаговременности отчетливо растут краевые эффекты.

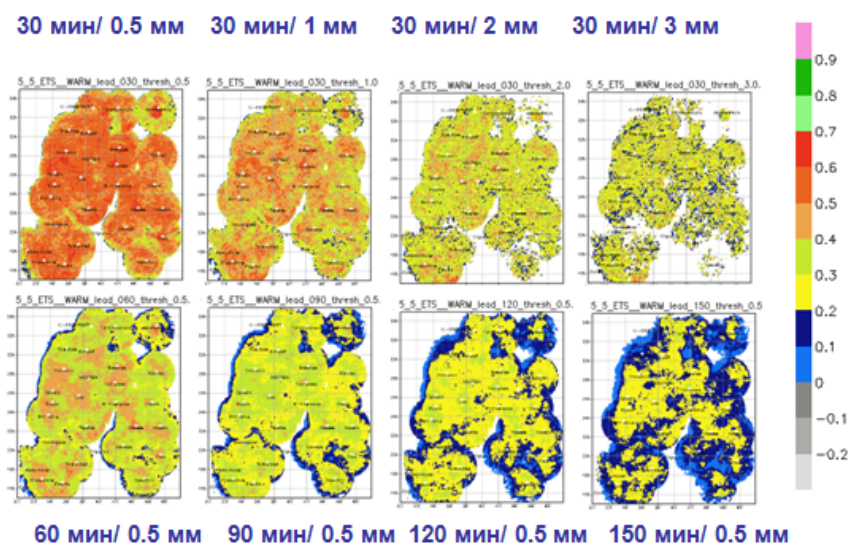


Рис. 14. Картография показателя ETS прогнозов для теплого периода.

Квантильные значения показателя ETS, соответствующие картам рис. 13 и 14, собраны в табл. 8 и 9 для холодного и теплого периодов соответственно. Зеленым цветом (оценок полезного прогноза) выделены значения не менее 0.3. То, что в обеих таблицах отсутствуют отрицательные значения показателя по всем порогам и всем заблаговременностям (кроме двух незначительных отрицательных чисел в таблице для теплого периода), свидетельствует о регулярном превышении качества методического прогноза над случайным. Однако при этом заполнение поля числами зеленого цвета быстро уменьшается как с ростом порога, так и с ростом заблаговременности.

Таблица 8

**Пространственное распределение показателя ETS по 10%-ным квантилям в холодный период с указанием количества значащих чисел (допусков, valid) в поточечных выборках**

30 мин	thresh	0%min	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%max	zeros	valid
30 мин	0.5	0.0104	0.2515	0.3316	0.3803	0.4187	0.4494	0.4774	0.5031	0.5330	0.5709	0.8326	12375	29550
	1.0	0.0207	0.1863	0.2492	0.2975	0.3329	0.3712	0.4004	0.4362	0.4722	0.5207	0.7995	18399	23526
	2.0	0.0190	0.1528	0.1996	0.2493	0.2851	0.3321	0.3504	0.3992	0.4437	0.4997	0.8329	30358	11567
	3.0	0.0243	0.1660	0.1996	0.2490	0.2497	0.3313	0.3331	0.3875	0.4280	0.4997	0.7995	37073	4852
60 мин	0.5	0.0088	0.1353	0.1906	0.2326	0.2656	0.2947	0.3219	0.3474	0.3768	0.4154	0.7489	12680	29245
	1.0	0.0192	0.0992	0.1365	0.1662	0.1985	0.2235	0.2497	0.2827	0.3164	0.3627	0.6356	19482	22443
	2.0	0.0159	0.0902	0.1238	0.1423	0.1662	0.1992	0.2258	0.2497	0.2992	0.3561	0.7134	32148	9777
	3.0	0.0179	0.1104	0.1423	0.1662	0.1992	0.1996	0.2497	0.2655	0.3328	0.3664	0.7773	38720	3205
90 мин	0.5	0.0000	0.0904	0.1333	0.1676	0.1978	0.2224	0.2474	0.2710	0.2991	0.3368	0.7678	13128	28797
	1.0	0.0091	0.0665	0.0944	0.1187	0.1418	0.1648	0.1862	0.2102	0.2412	0.2841	0.6663	21007	20918
	2.0	0.0056	0.0662	0.0894	0.1041	0.1244	0.1423	0.1662	0.1992	0.2340	0.2852	0.5996	34699	7226
	3.0	0.0219	0.0826	0.1104	0.1246	0.1424	0.1663	0.1996	0.2345	0.2497	0.3331	0.5996	40316	1609
120 мин	0.5	0.0067	0.0683	0.1012	0.1302	0.1548	0.1777	0.1993	0.2218	0.2489	0.2850	0.6819	13625	28300
	1.0	0.0077	0.0514	0.0721	0.0904	0.1099	0.1286	0.1481	0.1698	0.1984	0.2380	0.5984	22646	19279
	2.0	0.0137	0.0583	0.0759	0.0901	0.0995	0.1239	0.1423	0.1662	0.1996	0.2497	0.6663	36825	5100
	3.0	0.0284	0.0708	0.0993	0.1244	0.1424	0.1662	0.1976	0.1996	0.2497	0.3330	0.4997	41215	710
150 мин	0.5	0.0044	0.0545	0.0815	0.1052	0.1269	0.1479	0.1668	0.1870	0.2113	0.2463	0.7699	14008	27917
	1.0	0.0056	0.0421	0.0581	0.0727	0.0890	0.1045	0.1227	0.1418	0.1658	0.2032	0.6258	24249	17676
	2.0	0.0154	0.0543	0.0660	0.0825	0.0992	0.1107	0.1326	0.1657	0.1992	0.2494	0.5996	38733	3192
	3.0	0.0248	0.0659	0.0880	0.1096	0.1277	0.1567	0.1959	0.2159	0.2497	0.3329	0.4997	41621	304

Таблица 9

**Пространственное распределение показателя ETS по 10%-ным квантилям в теплый период с указанием количества значащих чисел (допусков, valid) в поточечных выборках**

30 мин	thresh	0%min	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%max	zeros	valid
0.5	0.0107	0.3536	0.4243	0.4620	0.4869	0.5065	0.5239	0.5412	0.5595	0.5840	0.7392		9677	32248
1.0	0.0108	0.2487	0.3202	0.3596	0.3883	0.4126	0.4342	0.4565	0.4804	0.5114	0.7773		10287	31638
2.0	0.0236	0.1654	0.2156	0.2496	0.2830	0.3095	0.3329	0.3627	0.3956	0.4362	0.7639		12870	29055
3.0	0.0228	0.1232	0.1639	0.1973	0.2210	0.2490	0.2766	0.3081	0.3425	0.3980	0.7267		16600	25325
60 мин														
0.5	0.0088	0.2057	0.2740	0.3110	0.3361	0.3564	0.3743	0.3927	0.4129	0.4386	0.6214		9794	32131
1.0	0.0104	0.1330	0.1839	0.2172	0.2428	0.2649	0.2854	0.3062	0.3292	0.3598	0.7259		10746	31179
2.0	0.0166	0.0786	0.1098	0.1347	0.1565	0.1776	0.1988	0.2209	0.2474	0.2829	0.6356		14337	27588
3.0	0.0133	0.0617	0.0825	0.0994	0.1188	0.1402	0.1581	0.1808	0.2066	0.2488	0.5709		19855	22070
90 мин														
0.5	0.0027	0.1408	0.1985	0.2335	0.2585	0.2780	0.2951	0.3127	0.3321	0.3576	0.7097		9985	31940
1.0	0.0065	0.0833	0.1232	0.1514	0.1734	0.1932	0.2119	0.2314	0.2529	0.2820	0.5414		11279	30646
2.0	0.0098	0.0517	0.0721	0.0895	0.1053	0.1227	0.1402	0.1576	0.1800	0.2109	0.7771		16230	25695
3.0	0.0165	0.0441	0.0577	0.0706	0.0836	0.0986	0.1118	0.1310	0.1528	0.1864	0.6657		23627	18298
120 мин														
0.5	-0.0021	0.1025	0.1503	0.1821	0.2054	0.2245	0.2410	0.2583	0.2766	0.3016	0.4980		10196	31729
1.0	0.0041	0.0602	0.0894	0.1127	0.1314	0.1489	0.1656	0.1834	0.2028	0.2285	0.5541		12017	29908
2.0	0.0094	0.0384	0.0519	0.0656	0.0783	0.0914	0.1051	0.1208	0.1403	0.1662	0.4994		18571	23354
3.0	0.0129	0.0367	0.0462	0.0549	0.0657	0.0782	0.0902	0.1051	0.1243	0.1539	0.5992		27404	14521
150 мин														
0.5	-0.0034	0.0790	0.1180	0.1468	0.1683	0.1852	0.2012	0.2167	0.2338	0.2569	0.4975		10418	31507
1.0	0.0015	0.0437	0.0667	0.0856	0.1019	0.1163	0.1317	0.1473	0.1648	0.1894	0.5338		12752	29173
2.0	0.0057	0.0298	0.0413	0.0512	0.0607	0.0713	0.0828	0.0963	0.1119	0.1386	0.4993		21128	20797
3.0	0.0152	0.0328	0.0409	0.0486	0.0567	0.0656	0.0760	0.0901	0.1091	0.1361	0.3996		31148	10777

Отметим большое сходство таблиц для обоих периодов и по значениям показателя, и по тенденциям его изменения в зависимости от порогов и прогностических сроков, за исключением объемов выборок (столбцы valid), несопоставимых на больших порогах превышения.

Сделаем замечание о возможности цензурирования данных для устранения или учета краевых эффектов, которые сходным образом проявляются на картах показателя ETS в оба периода (рис. 13 и 14). Так как эти значения выделяются синим цветом и отражаются в таблицах распространением на более высокие квантили (т. е. по пространству) значений ETS между 0 и 0.1 с ростом порога и заблаговременности, то цензурированию подлежат соответственно растущие доли пространства. Ввиду того, что граничные эффекты "расползаются" с ростом заблаговременности, сама процедура цензурирования становится в некотором роде "динамической" и существенно усложняется.

Если выделить значение ETS=0.1 как наибольшее для "динамического" цензурирования, то в таблице для холодного периода исключению из сравнительного анализа прогнозов, например на 150 мин, подлежат квантили до 40 % пространства, а для теплого периода – до 80 % пространства. Однако вывод о "преимуществе" прогнозов в холодный период по данному показателю не совсем корректен статистически. Количество точек поля, в которых при прогнозе на 150 мин превышения порога 3 мм в холодный период была сформирована выборка для верификации, оказалось равным 304 против 10777 в теплый

период. На малых выборках оценки качества находятся под критическим влиянием выборочных эффектов и могут принимать любые, в том числе "наиболее выгодные" значения случайным образом.

#### 4.3.4. Критерий Пирса-Обухова (PSS)

Картография показателя PSS на рис. 15 и 16 в общих чертах повторяет аналогичную картографию для категориальных показателей HR и ETS (рис. 13 и 14). В основном это быстрое разрушение связности при росте порога для холодного периода начиная с 2 мм/ч и постепенное усиление граничного эффекта при увеличении заблаговременности для обоих периодов начиная с 90 мин. Также можно оставшиеся на карте (даже для порога 3 мм) точки и пятна отнести к очагам высоких значений показателя.

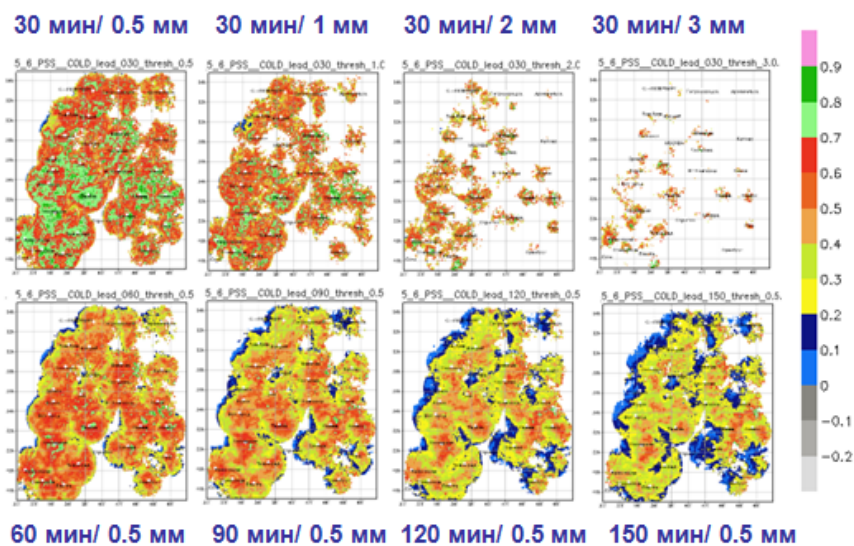


Рис. 15. Картография показателя PSS прогнозов для холодного периода.

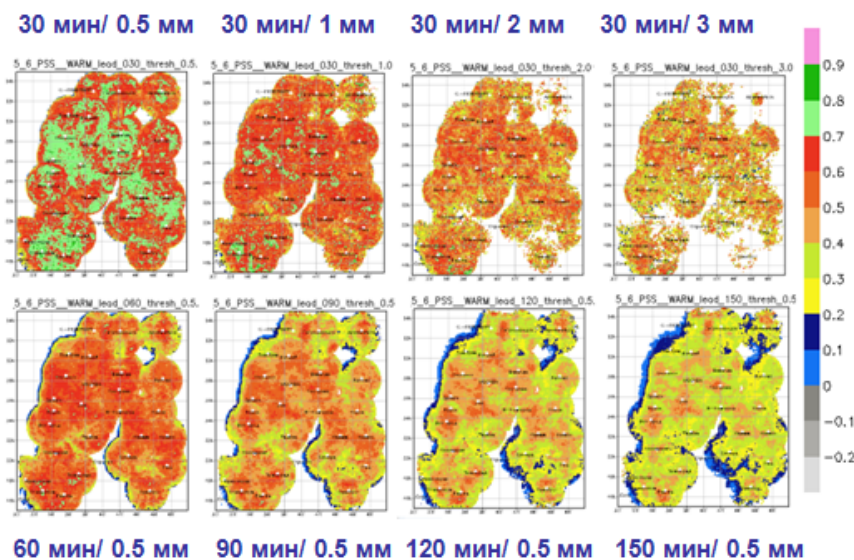


Рис. 16. Картография показателя PSS прогнозов для теплого периода.

В табл. 10 и 11 пространственного распределения показателя PSS зеленым цветом выделены значения не меньше 0.5.

Таблица 10

**Пространственное распределение показателя PSS по 10%-ным квантилям в холодный период с указанием количества значащих чисел (допусков, valid) в поточечных выборках**

30 мин													
thresh	0%min	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%max	zeros	valid
0.5	0.0112	0.3980	0.4990	0.5669	0.6091	0.6444	0.6738	0.7041	0.7350	0.7740	0.9577	12375	29550
1.0	0.0241	0.3273	0.3994	0.4781	0.4997	0.5608	0.5998	0.6506	0.6901	0.7486	0.9476	18399	23526
2.0	0.0199	0.2494	0.3325	0.3989	0.4867	0.4994	0.5373	0.5992	0.6658	0.7480	0.9352	30358	11567
3.0	0.0258	0.2494	0.3328	0.3628	0.4977	0.4994	0.4997	0.5709	0.6658	0.7129	0.9222	37073	4852
60 мин													
0.5	0.0097	0.2415	0.3297	0.3912	0.4399	0.4815	0.5144	0.5525	0.5949	0.6487	0.9497	12680	29245
1.0	0.0262	0.1661	0.2387	0.2855	0.3319	0.3790	0.4246	0.4776	0.5152	0.5975	0.9462	19482	22443
2.0	0.0170	0.1423	0.1986	0.2480	0.2838	0.3322	0.3719	0.4280	0.4989	0.5703	0.8978	32148	9777
3.0	0.0200	0.1658	0.1997	0.2497	0.3310	0.3328	0.3983	0.4989	0.4995	0.5711	0.8747	38720	3205
90 мин													
0.5	0.0000	0.1644	0.2430	0.2984	0.3445	0.3887	0.4289	0.4699	0.5083	0.5690	0.9369	13128	28797
1.0	0.0138	0.1152	0.1647	0.2024	0.2477	0.2852	0.3303	0.3730	0.4307	0.4986	0.9024	21007	20918
2.0	0.0059	0.0991	0.1247	0.1650	0.1989	0.2461	0.2770	0.3322	0.3974	0.4991	0.8552	34699	7226
3.0	0.0244	0.1105	0.1426	0.1986	0.2486	0.2510	0.3325	0.3331	0.4980	0.4997	0.8528	40316	1609
120 мин													
0.5	0.0087	0.1230	0.1873	0.2373	0.2784	0.3222	0.3643	0.4083	0.4546	0.5090	0.9026	13625	28300
1.0	0.0107	0.0819	0.1214	0.1559	0.1941	0.2265	0.2626	0.3102	0.3624	0.4596	0.9172	22646	19279
2.0	0.0159	0.0766	0.0997	0.1244	0.1533	0.1969	0.2219	0.2497	0.3328	0.4983	0.8322	36825	5100
3.0	0.0316	0.0903	0.1395	0.1664	0.1997	0.2492	0.2845	0.3328	0.4292	0.4997	0.8280	41215	710
150 мин													
0.5	0.0050	0.0951	0.1481	0.1922	0.2316	0.2721	0.3157	0.3554	0.4014	0.4756	0.8948	14008	27917
1.0	0.0070	0.0619	0.0928	0.1225	0.1502	0.1799	0.2120	0.2489	0.3144	0.3978	0.8702	24249	17676
2.0	0.0167	0.0661	0.0901	0.1108	0.1409	0.1658	0.1994	0.2494	0.3322	0.4980	0.8225	38733	3192
3.0	0.0280	0.0766	0.1108	0.1423	0.1774	0.2109	0.2497	0.3326	0.3745	0.4997	0.6664	41621	304

Таблица 11

**Пространственное распределение показателя PSS по 10%-ным квантилям в теплый период с указанием количества значащих чисел (допусков, valid) в поточечных выборках**

30 мин													
thresh	0%min	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%max	zeros	valid
0.5	0.0112	0.5113	0.5878	0.6247	0.6516	0.6724	0.6908	0.7085	0.7280	0.7538	0.9384	9677	32248
1.0	0.0116	0.3964	0.4801	0.5258	0.5605	0.5894	0.6144	0.6395	0.6673	0.7042	0.9184	10287	31638
2.0	0.0269	0.2723	0.3473	0.3994	0.4441	0.4931	0.5123	0.5516	0.5928	0.6492	0.9306	12870	29055
3.0	0.0269	0.1994	0.2705	0.3311	0.3703	0.4104	0.4559	0.4984	0.5449	0.6228	0.9375	16600	25325
60 мин													
0.5	0.0096	0.3367	0.4248	0.4713	0.5038	0.5305	0.5538	0.5765	0.6006	0.6308	0.8686	9794	32131
1.0	0.0115	0.2313	0.3070	0.3557	0.3917	0.4236	0.4522	0.4817	0.5125	0.5534	0.8912	10746	31179
2.0	0.0229	0.1407	0.1959	0.2350	0.2703	0.3039	0.3322	0.3709	0.4103	0.4704	0.8970	14337	27588
3.0	0.0303	0.1089	0.1420	0.1791	0.2080	0.2470	0.2742	0.3157	0.3550	0.4317	0.8736	19855	22070
90 мин													
0.5	0.0032	0.2458	0.3293	0.3797	0.4155	0.4438	0.4680	0.4919	0.5182	0.5520	0.8486	9985	31940
1.0	0.0076	0.1531	0.2169	0.2614	0.2966	0.3271	0.3564	0.3869	0.4194	0.4623	0.8001	11279	30646
2.0	0.0174	0.0889	0.1242	0.1559	0.1848	0.2129	0.2450	0.2720	0.3105	0.3632	0.8745	16230	25695
3.0	0.0239	0.0752	0.0984	0.1228	0.1418	0.1655	0.1973	0.2250	0.2631	0.3315	0.8562	23627	18298
120 мин													
0.5	-0.0027	0.1830	0.2629	0.3133	0.3482	0.3778	0.4031	0.4276	0.4548	0.4913	0.8158	10196	31729
1.0	0.0055	0.1085	0.1605	0.1995	0.2314	0.2600	0.2881	0.3165	0.3476	0.3879	0.7913	12017	29908
2.0	0.0155	0.0642	0.0894	0.1127	0.1354	0.1594	0.1812	0.2074	0.2436	0.2898	0.8267	18571	23354
3.0	0.0214	0.0589	0.0747	0.0903	0.1092	0.1253	0.1494	0.1740	0.2059	0.2661	0.7989	27404	14521
150 мин													
0.5	-0.0043	0.1439	0.2155	0.2626	0.2972	0.3273	0.3522	0.3759	0.4021	0.4391	0.9046	10418	31507
1.0	0.0021	0.0786	0.1202	0.1535	0.1821	0.2083	0.2348	0.2608	0.2893	0.3290	0.8690	12752	29173
2.0	0.0111	0.0476	0.0672	0.0838	0.1012	0.1206	0.1401	0.1631	0.1937	0.2426	0.7975	21128	20797
3.0	0.0189	0.0494	0.0620	0.0747	0.0887	0.1031	0.1223	0.1415	0.1701	0.2259	0.7465	31148	10777

Как и для предыдущих показателей, по количеству зеленых чисел есть некоторое преимущество карт холодного диапазона для отдельных заблаговременностей в сравнении с

данными по теплому периоду (табл. 11), но также следует учитывать объемы выборок, а значит, и статистическую значимость "преимущества", которое может быть выборочным, т. е. случайным.

Имеются два небольших отрицательных числа на тех же местах, что и в таблице ETS для теплого периода (табл. 14): там, где качество категорийного прогноза оказалось чуть ниже качества случайного прогноза, здесь доля ложных тревог немного превысила долю попаданий.

#### 4.3.5. Индекс экстремальной зависимости (EDI)

Как упоминалось выше, показатель EDI рекомендуется использовать для оценки качества прогнозов редких явлений, так как он имеет статистические преимущества перед всеми ранее описанными категорийными показателями, в частности перед ETS и PSS [4, 6, 14]. Однако отмеченные преимущества EDI справедливы при теоретических, в первую очередь асимптотических предположениях, которые не выполняются автоматически на каждой конечной выборке. Как было показано в [6], одним из условий корректного применения данного показателя является сходимость к невырожденному значению не при некотором пороге превышения, а при последовательном увеличении этого порога. Возникает проблема определения последовательности порогов для оценки сходимости показателя, и эта проблема остается пока открытой.

На рис. 17 и 18 собраны карты показателя EDI прогнозов для холодного и теплого периодов.

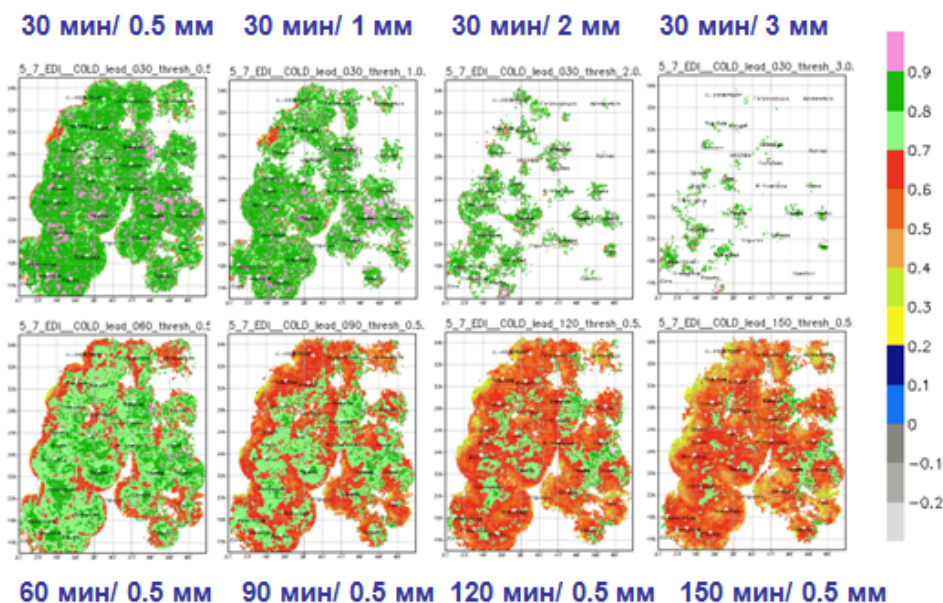
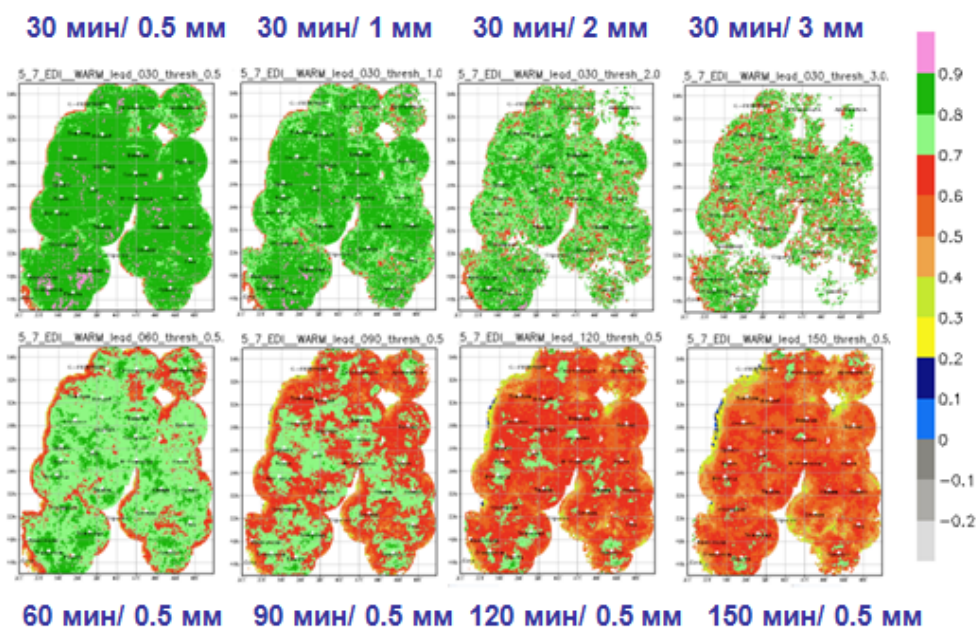


Рис. 17. Картография показателя EDI прогнозов для холодного периода.



**Рис. 18.** Картография показателя EDI прогнозов для теплого периода.

На картографии рис. 17 для холодного периода можно выделить пространственное сходство с ETS и PSS в довольно быстром нарастании "деструктивности" порогов после 1 мм, но, в отличие от тех же показателей, граничный эффект с ростом заблаговременности проявляется в основном на первых порогах (нижний ряд).

Для теплого периода (рис. 18) также отмечается более связная пространственная структура в сравнении с холодным периодом. "Деструктивные" пороги не проявляются столь сильно, но есть некоторая пространственная хаотизация, заключающаяся в появлении мелких, почти точечных очагов значений показателя (панель с порогом 3 мм). В нижнем ряду панелей можно заметить слабое проявление граничного эффекта (узкая красная полоса на 60 мин).

В табл. 12 и 13 зеленым цветом выделены значения EDI не меньше 0.5 для сопоставления с поведением показателя PSS.

Как известно, положительные значения EDI (когда доля попаданий в категорию выше соответствующей доли ложных тревог) всегда больше PSS [6], поэтому более корректным было бы использование порога 0.6 или 0.7. В любом случае картина выглядит более «гармонично» – нет резкого падения «качества» при росте порогов и при росте заблаговременности. Возможно, это свидетельствует о заявленном преимуществе EDI перед показателями ETS и PSS при оценке качества прогнозов редких явлений.

Сравнение таблиц показателя EDI для двух периодов приводит к выводу, что по количеству зеленого цвета качество несколько ниже в теплый период (табл. 13), чем в холодный период. Вполне возможно, что это "преимущество" приобретено как за счет

выборочного эффекта малой выборки, так и за счет заниженного «характерного» порога для самого показателя (0.5).

Таблица 12

**Пространственное распределение показателя EDI по 10%-ным квантилям в холодный период с указанием количества значащих чисел (допусков, valid) в поточечных выборках**

30 мин													
thresh	0%min	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%max	zeros	valid
0.5	0.1784	0.7405	0.7879	0.8140	0.8320	0.8469	0.8604	0.8734	0.8874	0.9055	0.9867	12375	29550
1.0	0.2466	0.7002	0.7530	0.7853	0.8091	0.8286	0.8442	0.8636	0.8835	0.9067	0.9819	18399	23526
2.0	0.3210	0.6759	0.7312	0.7632	0.7994	0.8217	0.8433	0.8598	0.8872	0.9139	0.9791	30358	11567
3.0	0.3157	0.6874	0.7343	0.7632	0.8037	0.8275	0.8434	0.8465	0.8873	0.9055	0.9776	37073	4852
60 мин													
0.5	0.1655	0.6076	0.6643	0.6976	0.7215	0.7430	0.7628	0.7820	0.8036	0.8311	0.9827	12680	29245
1.0	0.2564	0.5603	0.6184	0.6585	0.6895	0.7159	0.7405	0.7661	0.7959	0.8316	0.9810	19482	22443
2.0	0.2421	0.5642	0.6155	0.6515	0.6875	0.7140	0.7440	0.7763	0.8146	0.8438	0.9660	32148	9777
3.0	0.2313	0.5960	0.6460	0.6869	0.7102	0.7438	0.7632	0.8091	0.8305	0.8438	0.9673	38720	3205
90 мин													
0.5	-0.0000	0.5193	0.5827	0.6199	0.6490	0.6746	0.6984	0.7219	0.7479	0.7829	0.9766	13128	28797
1.0	0.1711	0.4833	0.5433	0.5822	0.6156	0.6449	0.6725	0.7040	0.7374	0.7841	0.9626	21007	20918
2.0	0.1951	0.4987	0.5459	0.5840	0.6155	0.6481	0.6850	0.7135	0.7599	0.8148	0.9517	34699	7226
3.0	0.2215	0.5339	0.5874	0.6270	0.6629	0.6875	0.7152	0.7486	0.7985	0.8434	0.9448	40316	1609
120 мин													
0.5	0.0979	0.4587	0.5217	0.5604	0.5909	0.6196	0.6480	0.6746	0.7039	0.7458	0.9600	13625	28300
1.0	0.0927	0.4268	0.4857	0.5259	0.5592	0.5902	0.6212	0.6537	0.6947	0.7539	0.9693	22646	19279
2.0	0.1921	0.4675	0.5120	0.5461	0.5814	0.6147	0.6461	0.6850	0.7258	0.8040	0.9477	36825	5100
3.0	0.2572	0.5010	0.5548	0.5979	0.6402	0.6708	0.7056	0.7314	0.7632	0.8401	0.9326	41215	710
150 мин													
0.5	0.0853	0.4094	0.4710	0.5127	0.5461	0.5770	0.6061	0.6360	0.6682	0.7162	0.9561	14008	27917
1.0	0.0860	0.3848	0.4430	0.4825	0.5161	0.5461	0.5790	0.6130	0.6596	0.7247	0.9512	24249	17676
2.0	0.2455	0.4440	0.4939	0.5309	0.5685	0.5986	0.6366	0.6722	0.7210	0.7998	0.9320	38733	3192
3.0	0.2747	0.4604	0.5148	0.5603	0.5871	0.6401	0.6711	0.7101	0.7631	0.8305	0.9055	41621	304

Таблица 13

**Пространственное распределение показателя EDI по 10%-ным квантилям в теплый период с указанием количества значащих чисел (допусков, valid) в поточечных выборках**

30 мин													
thresh	0%min	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%max	zeros	valid
0.5	0.2443	0.7736	0.8094	0.8265	0.8389	0.8485	0.8575	0.8664	0.8765	0.8895	0.9779	9677	32248
1.0	0.2056	0.7224	0.7638	0.7864	0.8026	0.8162	0.8288	0.8411	0.8551	0.8737	0.9705	10287	31638
2.0	0.3162	0.6581	0.7069	0.7349	0.7586	0.7783	0.7971	0.8152	0.8348	0.8617	0.9769	12870	29055
3.0	0.2292	0.6125	0.6630	0.7000	0.7280	0.7533	0.7762	0.8008	0.8252	0.8605	0.9786	16600	25325
60 мин													
0.5	0.1308	0.6406	0.6926	0.7177	0.7357	0.7507	0.7642	0.7777	0.7924	0.8114	0.9484	9794	32131
1.0	0.1775	0.5790	0.6305	0.6610	0.6834	0.7020	0.7196	0.7372	0.7560	0.7822	0.9564	10746	31179
2.0	0.2084	0.5056	0.5599	0.5969	0.6251	0.6498	0.6729	0.6960	0.7230	0.7611	0.9644	14337	27588
3.0	0.0928	0.4734	0.5272	0.5636	0.5957	0.6224	0.6513	0.6804	0.7140	0.7603	0.9601	19855	22070
90 мин													
0.5	0.0478	0.5487	0.6082	0.6399	0.6623	0.6802	0.6961	0.7124	0.7301	0.7531	0.9388	9985	31940
1.0	0.1112	0.4804	0.5394	0.5741	0.5996	0.6220	0.6422	0.6627	0.6859	0.7166	0.9185	11279	30646
2.0	0.1337	0.4154	0.4714	0.5083	0.5377	0.5657	0.5912	0.6181	0.6489	0.6903	0.9659	16230	25695
3.0	0.2095	0.4044	0.4526	0.4895	0.5201	0.5474	0.5787	0.6077	0.6444	0.6966	0.9570	23627	18298
120 мин													
0.5	-0.0347	0.4746	0.5388	0.5755	0.6006	0.6208	0.6386	0.6562	0.6767	0.7048	0.9138	10196	31729
1.0	0.0607	0.4111	0.4696	0.5062	0.5331	0.5569	0.5793	0.6014	0.6253	0.6591	0.9103	12017	29908
2.0	0.1123	0.3571	0.4076	0.4450	0.4757	0.5026	0.5286	0.5564	0.5897	0.6367	0.9299	18571	23354
3.0	0.1701	0.3629	0.4056	0.4399	0.4715	0.5012	0.5307	0.5620	0.5984	0.6544	0.9366	27404	14521
150 мин													
0.5	-0.0548	0.4176	0.4840	0.5201	0.5466	0.5684	0.5883	0.6081	0.6294	0.6601	0.9607	10418	31507
1.0	0.0234	0.3510	0.4091	0.4462	0.4750	0.5007	0.5241	0.5473	0.5746	0.6101	0.9491	12752	29173
2.0	0.0816	0.3115	0.3606	0.3951	0.4256	0.4530	0.4801	0.5093	0.5429	0.5918	0.9281	21128	20797
3.0	0.1965	0.3411	0.3811	0.4111	0.4410	0.4696	0.4979	0.5291	0.5674	0.6245	0.9033	31148	10777

#### 4.4. Вероятностные оценки качества

В данном разделе речь идет о вероятностном прогнозе превышения порогов  $\text{thr} = 0.5, 1, 2$  и  $3$  мм/ч на основе ансамблевой модели ruSTEPS. Прогностическая вероятность события ( $\text{pres} \geq \text{thr}$ ) рассчитывается с помощью 10-членного ансамбля в каждой точке поля для синхронизированных пар "наблюдение – прогноз". Качество оценивается с помощью оценки Брайера (BS), критерия Брайера (BSS), относительной оперативной характеристики (Relative Operating Characteristic, ROC) и площади под кривой ROC (ROCA). Все эти показатели, кроме ROCA, конструируются на множестве пар  $(\text{binO}, \text{probF})$ , где  $\text{binO}$  – бинарная переменная 1 или 0 в зависимости от наличия или отсутствия события в наблюдении, а  $\text{probF}$  – прогностическая вероятность события, т. е. отношение количества прогнозов события в ансамбле к объему ансамбля.

##### 4.4.1. Оценка и критерий Брайера (BS и BSS)

Формула расчета оценки Брайера:

$$\text{BS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - o_i)^2,$$

где  $p$  – прогностическая вероятность;  $o = 1/0$  – событие да-нет; показатель отрицательно ориентирован (чем меньше, тем лучше). Диапазон изменения  $[0,1]$ , для идеального прогноза  $\text{BS} = 0$ . Формула расчета критерия Брайера:

$$\text{BSS} = 1 - \frac{\text{BS}}{\text{BS}_{\text{reference}}},$$

где  $\text{BS}_{\text{reference}}$  – оценка Брайера, в которой вместо  $p$  используется, как правило, климатический прогноз или выборочная вероятность события. Диапазон изменения  $[-\text{inf},1]$ , для идеального прогноза  $\text{BSS} = 1$ . Заметим, что в случае использования выборочной климатологии  $\text{BS}_{\text{reference}} = p(1-p)$ , что, кстати, равно оценке дисперсии случайной величины по схеме Бернулли.

На рис. 19 и 20 представлена картография оценки Брайера для холодного и теплого периодов.

Расположение панелей в верхнем и нижнем рядах аналогично предыдущим представлениям полей показателей: верхний ряд – 30-минутный прогноз превышения всех выбранных порогов, нижний ряд – прогнозы превышения порога 0.5 для всех выбранных заблаговременностей.

На обоих рисунках проявляется главная особенность оценки Брайера – критичная зависимость от повторяемости события в наблюдениях при перегруженности ячейки (2,2) таблицы сопряженности, в которой содержится количество правильных прогнозов отсутствия явления. Для оценки прогноза осадков, избыливающих нулевыми значениями, с

увеличением порога под знаком суммы количество нулей растёт, вследствие чего BS падает, указывая на мнимый рост качества. Это свойство благополучно отсутствует при увеличении заблаговременности.

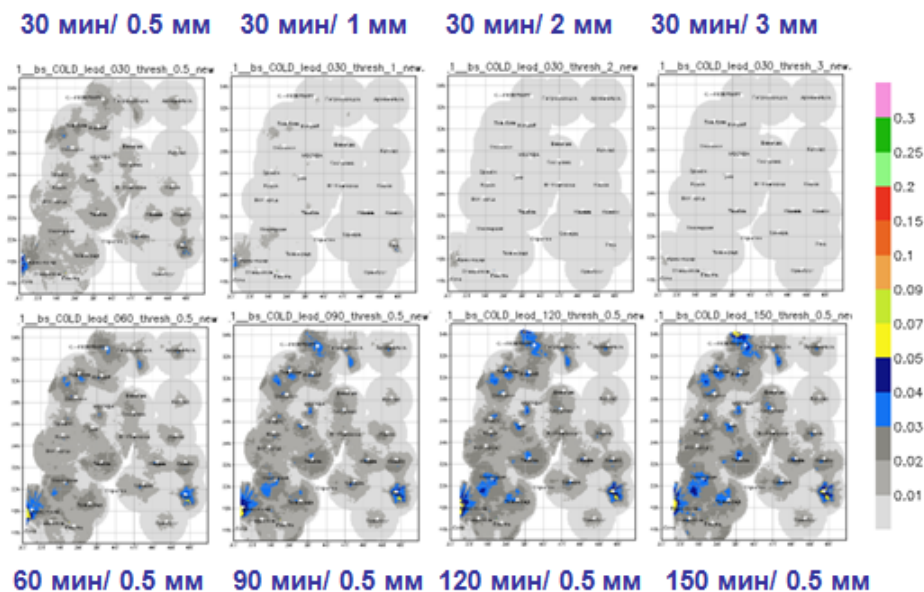


Рис. 19. Картография показателя BS прогнозов для холодного периода.

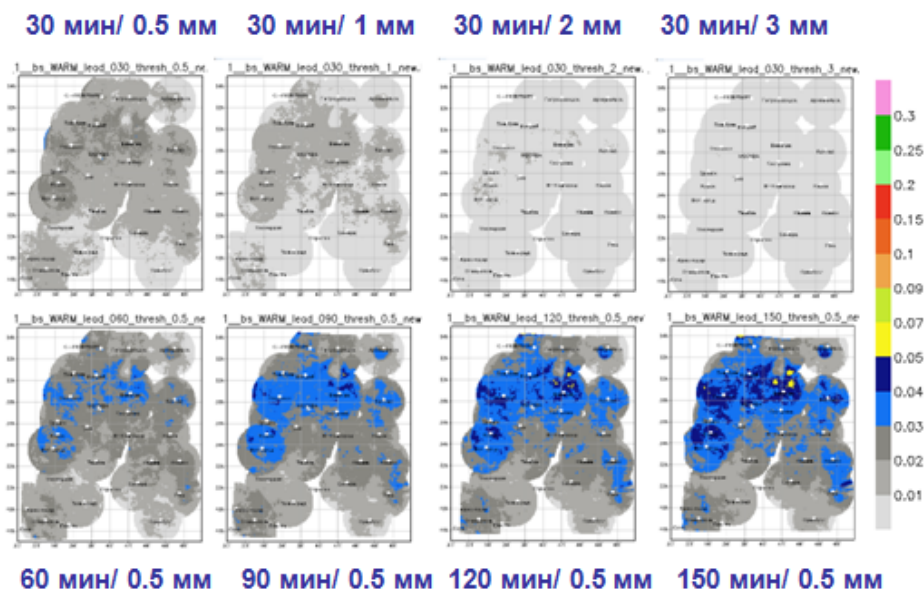


Рис. 20. Картография показателя BS прогнозов для теплого периода.

Сравнивая карты для обоих периодов, можно прийти к выводу о заметном преимуществе прогнозов в холодный период. Уточнение визуальных оценок и свойств данного показателя можно сделать на основе соответствующих табл. 14 и 15, при этом в первую очередь выделим, что по количеству допусков (valid) оценки по двум периодам сходны.

**Пространственное распределение показателя BS по 10%-ным квантилям  
в холодный период с указанием количества значащих чисел  
(допусков, valid) в поточечных выборках**

30 мин													
thresh	0%min	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%max	zeros	valid
0.5	0.0000	0.0013	0.0028	0.0044	0.0061	0.0077	0.0093	0.0110	0.0129	0.0158	0.1186	10088	31837
1	0.0000	0.0003	0.0006	0.0012	0.0018	0.0025	0.0033	0.0043	0.0054	0.0071	0.0829	10088	31837
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0003	0.0005	0.0008	0.0011	0.0016	0.0023	0.0426	10088	31837
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0003	0.0004	0.0006	0.0010	0.0208	10088	31837
60 мин													
0.5	0.0000	0.0019	0.0040	0.0063	0.0086	0.0108	0.0132	0.0154	0.0179	0.0216	0.1279	10339	31586
1	0.0000	0.0003	0.0009	0.0016	0.0024	0.0033	0.0045	0.0058	0.0072	0.0093	0.0868	10339	31586
2	0.0000	0.0000	0.0001	0.0002	0.0004	0.0006	0.0010	0.0014	0.0020	0.0029	0.0462	10339	31586
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0002	0.0003	0.0005	0.0008	0.0013	0.0222	10339	31586
90 мин													
0.5	0.0000	0.0024	0.0048	0.0073	0.0099	0.0124	0.0151	0.0177	0.0204	0.0243	0.1295	10694	31231
1	0.0000	0.0004	0.0011	0.0019	0.0027	0.0037	0.0050	0.0064	0.0080	0.0103	0.0899	10694	31231
2	0.0000	0.0000	0.0001	0.0003	0.0004	0.0007	0.0011	0.0015	0.0021	0.0030	0.0453	10694	31231
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0002	0.0003	0.0006	0.0008	0.0013	0.0218	10694	31231
120 мин													
0.5	0.0000	0.0028	0.0054	0.0081	0.0107	0.0133	0.0161	0.0189	0.0219	0.0258	0.1322	11160	30765
1	0.0000	0.0005	0.0012	0.0020	0.0029	0.0040	0.0052	0.0067	0.0084	0.0107	0.0882	11160	30765
2	0.0000	0.0000	0.0001	0.0003	0.0005	0.0007	0.0011	0.0015	0.0022	0.0031	0.0463	11160	30765
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0002	0.0003	0.0006	0.0008	0.0013	0.0192	11160	30765
150 мин													
0.5	0.0000	0.0031	0.0058	0.0086	0.0112	0.0137	0.0165	0.0196	0.0227	0.0270	0.1341	11828	30097
1	0.0000	0.0006	0.0013	0.0021	0.0030	0.0040	0.0053	0.0068	0.0086	0.0110	0.0900	11828	30097
2	0.0000	0.0000	0.0001	0.0003	0.0005	0.0007	0.0011	0.0015	0.0022	0.0031	0.0453	11828	30097
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0002	0.0003	0.0006	0.0008	0.0013	0.0212	11828	30097

**Пространственное распределение показателя BS по 10%-ным квантилям  
в теплый период с указанием количества значащих чисел (допусков, valid)  
в поточечных выборках**

30 мин													
thresh	0%min	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%max	zeros	valid
0.5	0.0010	0.0075	0.0094	0.0112	0.0128	0.0143	0.0156	0.0171	0.0188	0.0209	0.0371	9986	31939
1	0.0000	0.0037	0.0051	0.0064	0.0077	0.0088	0.0099	0.0110	0.0123	0.0142	0.0248	9986	31939
2	0.0000	0.0012	0.0021	0.0028	0.0036	0.0043	0.0050	0.0057	0.0066	0.0078	0.0161	9986	31939
3	0.0000	0.0006	0.0011	0.0016	0.0020	0.0025	0.0030	0.0035	0.0041	0.0049	0.0109	9986	31939
60 мин													
0.5	0.0002	0.0105	0.0130	0.0156	0.0181	0.0201	0.0220	0.0241	0.0265	0.0293	0.0455	10370	31555
1	0.0000	0.0048	0.0068	0.0087	0.0104	0.0120	0.0135	0.0150	0.0168	0.0193	0.0334	10370	31555
2	0.0000	0.0016	0.0026	0.0036	0.0045	0.0055	0.0064	0.0074	0.0084	0.0099	0.0190	10370	31555
3	0.0000	0.0007	0.0013	0.0019	0.0024	0.0030	0.0036	0.0042	0.0050	0.0059	0.0131	10370	31555
90 мин													
0.5	0.0015	0.0122	0.0150	0.0183	0.0212	0.0235	0.0256	0.0281	0.0309	0.0342	0.0534	10851	31074
1	0.0001	0.0055	0.0077	0.0098	0.0119	0.0136	0.0152	0.0169	0.0190	0.0218	0.0350	10851	31074
2	0.0000	0.0017	0.0028	0.0039	0.0049	0.0059	0.0069	0.0079	0.0091	0.0109	0.0217	10851	31074
3	0.0000	0.0007	0.0013	0.0019	0.0025	0.0032	0.0038	0.0044	0.0052	0.0063	0.0140	10851	31074
120 мин													
0.5	0.0013	0.0133	0.0164	0.0201	0.0235	0.0259	0.0281	0.0307	0.0339	0.0376	0.0614	11504	30421
1	0.0005	0.0059	0.0083	0.0106	0.0128	0.0146	0.0163	0.0181	0.0203	0.0234	0.0399	11504	30421
2	0.0000	0.0018	0.0030	0.0041	0.0051	0.0062	0.0072	0.0082	0.0094	0.0112	0.0209	11504	30421
3	0.0000	0.0008	0.0014	0.0020	0.0026	0.0032	0.0038	0.0045	0.0053	0.0064	0.0140	11504	30421
150 мин													
0.5	0.0029	0.0141	0.0175	0.0215	0.0252	0.0277	0.0300	0.0329	0.0362	0.0401	0.0725	12222	29703
1	0.0005	0.0062	0.0087	0.0112	0.0134	0.0153	0.0170	0.0189	0.0213	0.0245	0.0398	12222	29703
2	0.0000	0.0019	0.0031	0.0042	0.0053	0.0063	0.0074	0.0084	0.0096	0.0115	0.0223	12222	29703
3	0.0000	0.0008	0.0014	0.0020	0.0026	0.0032	0.0038	0.0045	0.0053	0.0065	0.0146	12222	29703

Малые значения оценки Брайера в табл. 14 обусловлены, несомненно, обилием нулевых значений. Упомянутая выше тенденция оценки отражена в данной табл. 14 и в следующей табл. 15 для теплого периода: в столбце одного порога сверху вниз значения снижаются, но по фиксированной строке заблаговременности вниз для всех порогов значения растут.

Несмотря на то, что значения показателя BS в табл. 15 заметно выше соответствующих значений в табл. 14, делать общий вывод о более высоком качестве вероятностного прогноза в холодный период не совсем корректно. Во-первых, недостаточно физических оснований сравнивать качество прогнозов по одинаковым порогам. Во-вторых, в оба периода для выбранных заблаговременностей и порогов оценки Брайера малы, и их статистическая значимость не оценивается, т. е. может оказаться, что ансамблевая модель в оба периода дает сходные и вполне удовлетворительные по данному показателю вероятностные прогнозы. Уместно провести параллель с упомянутой выше средней ошибкой (ME), главное приложение которой усматривается лишь в выделении и цензурировании нежелательных выбросов.

Проявленное свойство оценки Брайера снимается в ее критериальном варианте относительно некоторого контрольного прогноза, например относительно климатологии – многолетней или выборочной. В нескольких странах (например, в США) критерий Брайера применяется в официальной верификации краткосрочных прогнозов осадков относительно многолетней климатологии. Могут быть другие источники "контрольных" вероятностей, отличные от климатологии, например ансамблевые прогнозы оперативных систем. Вероятности можно сконструировать из лаговых инерционных прогнозов, отчасти пренебрегая сериальной коррелированностью [9].

В данной статье приводятся расчеты BSS относительно выборочной климатологии, т. е. для каждой серии пар "наблюдение – вероятность" контрольным прогнозом считается постоянный прогноз повторяемости события из данной выборки. Важно подчеркнуть следующие два момента. Во-первых, использование многолетней климатологии более выгодно по сравнению с выборочной климатологией: последняя входит в состав данных наблюдений в интервале прогноза, чем неизбежно занижает величину критерия. Во-вторых, оценка по выборочной климатологии апостериорна и не может быть предъявлена как пример лучшего прогноза: на момент прогноза она сама не известна.

В рис. 21 и 22 и в соответствующих табл. 16 и 17 содержатся картографические и числовые характеристики критерия Брайера.

На верхнем ряду рис. 21 видны знакомые тенденции: наибольшая часть на малых порогах занята положительными значениями (превышение качества над выборочной

климатологией), с ростом порога пространственная структура разрушается и очаги все ближе концентрируются около локаторов. Поля показателя в нижнем ряду сохраняют пространственную целостность, но постепенно заполняются отрицательными значениями, которые концентрируются на дальних секторах кругов покрытия. Рис. 22 (показатель BSS для теплого периода) представляет карты с более связной пространственной структурой, хотя с ростом порога растет пестрота (панель 30 мин/3мм). Также просматриваются очаги около локаторов и вокруг Архангельска рисуется привычная "шайба".

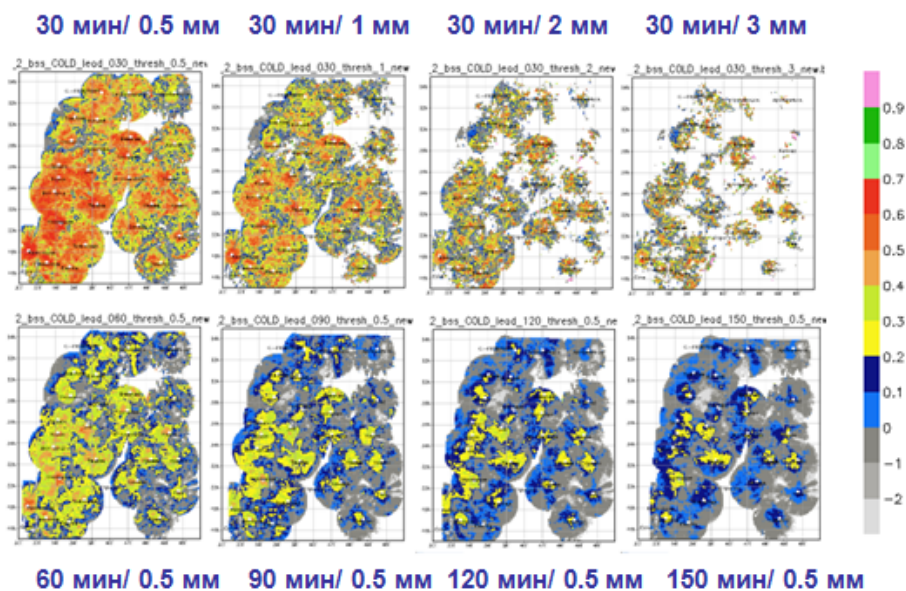


Рис. 21. Картография показателя BSS прогнозов в холодный период.

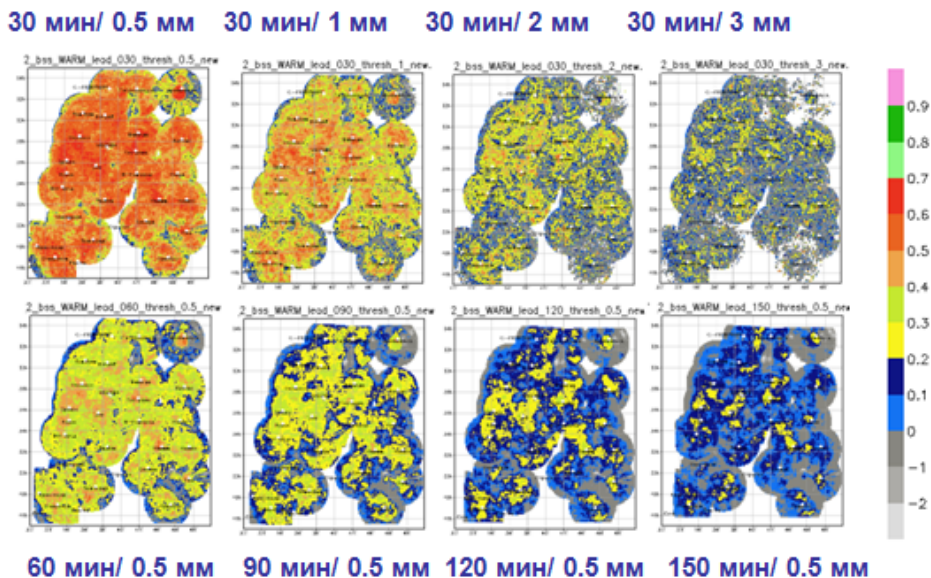


Рис. 22. Картография показателя BSS прогнозов в теплый период.

Точное пространственное распределение показателя BSS демонстрируется в табл. 16 и 17, зеленым цветом выделены положительные числа показателя.

**Пространственное распределение показателя BSS по 10%-ным квантилям  
в холодный период с указанием количества значащих чисел (допусков, valid)  
в поточечных выборках**

30 мин thresh	0%min	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%max	zeros	valid
0.5	-13.1740	-0.0249	0.1632	0.2719	0.3451	0.3994	0.4441	0.4833	0.5242	0.5725	1.0000	10583	31342
1.0	-13.5641	-0.3207	-0.0357	0.0915	0.1902	0.2670	0.3305	0.3891	0.4460	0.5151	1.0000	13126	28799
2.0	-11.2934	-0.5104	-0.1677	-0.0161	0.0766	0.1795	0.2657	0.3498	0.4374	0.5477	1.0000	20622	21303
3.0	-8.1726	-0.5104	-0.1743	-0.0256	0.0397	0.1598	0.2646	0.3598	0.4662	0.6297	1.0000	27064	14861
<b>60 мин</b>													
0.5	-40.0716	-0.4116	-0.1050	0.0193	0.0989	0.1644	0.2201	0.2696	0.3184	0.3733	0.8900	10889	31036
1.0	-14.7444	-0.7105	-0.3159	-0.1366	-0.0386	0.0300	0.0938	0.1566	0.2225	0.2984	0.9600	13479	28446
2.0	-15.7847	-0.7605	-0.3758	-0.1980	-0.0912	-0.0203	0.0428	0.1148	0.1945	0.2970	1.0000	20808	21117
3.0	-9.3629	-0.6405	-0.3204	-0.1703	-0.0803	-0.0206	0.0149	0.0997	0.1891	0.3150	1.0000	26987	14938
<b>90 мин</b>													
0.5	-30.6889	-0.6665	-0.2758	-0.1066	-0.0105	0.0556	0.1105	0.1635	0.2157	0.2748	0.6330	11157	30768
1.0	-23.4669	-0.9783	-0.4746	-0.2564	-0.1310	-0.0529	0.0043	0.0614	0.1209	0.1909	0.8300	13610	28315
2.0	-15.6947	-0.8816	-0.4608	-0.2639	-0.1496	-0.0753	-0.0234	0.0197	0.0845	0.1644	0.9100	20878	21047
3.0	-12.1937	-0.5904	-0.3107	-0.1853	-0.1076	-0.0591	-0.0203	0.0058	0.0751	0.1698	0.8900	27238	14687
<b>120 мин</b>													
0.5	-54.1255	-0.9338	-0.3924	-0.1832	-0.0697	0.0001	0.0547	0.1067	0.1585	0.2152	0.4751	11668	30257
1.0	-21.0662	-1.1674	-0.5709	-0.3169	-0.1759	-0.0881	-0.0290	0.0200	0.0725	0.1351	0.7899	14175	27750
2.0	-13.3140	-0.8947	-0.4704	-0.2704	-0.1596	-0.0903	-0.0415	-0.0076	0.0395	0.1050	0.8400	21227	20698
3.0	-9.8831	-0.5300	-0.2904	-0.1777	-0.1103	-0.0642	-0.0342	-0.0103	0.0292	0.1065	0.8099	27260	14665
<b>150 мин</b>													
0.5	-42.8623	-1.0872	-0.4671	-0.2319	-0.1074	-0.0324	0.0195	0.0696	0.1201	0.1728	0.4899	12202	29723
1.0	-23.4669	-1.2364	-0.6177	-0.3458	-0.1996	-0.1056	-0.0456	-0.0015	0.0458	0.1013	0.8500	14584	27341
2.0	-11.5335	-0.8682	-0.4514	-0.2644	-0.1607	-0.0955	-0.0504	-0.0192	0.0164	0.0695	0.7399	21504	20421
3.0	-6.8723	-0.4708	-0.2607	-0.1603	-0.1006	-0.0650	-0.0382	-0.0175	0.0052	0.0692	0.8099	27641	14284

Таблица 17

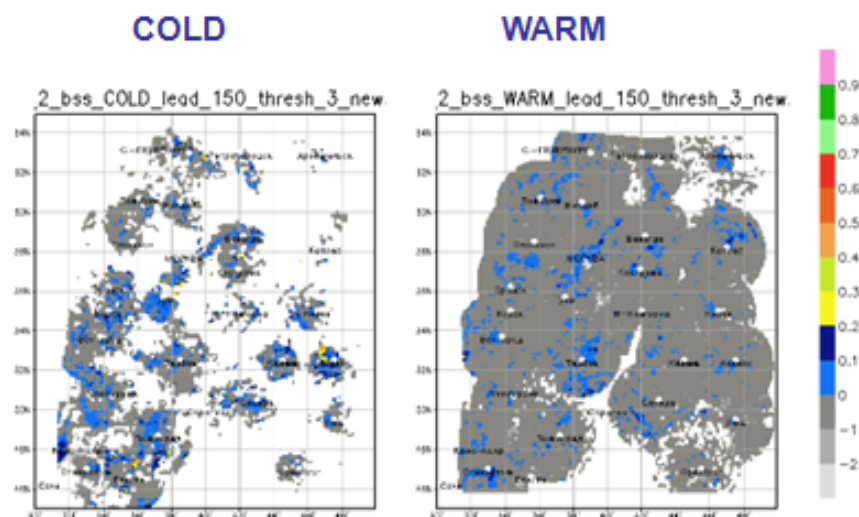
**Пространственное распределение показателя BSS по 10%-м квантилям  
в теплый период с указанием количества значащих чисел (допусков, valid)  
в поточечных выборках**

30 мин thresh	0%min	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%max	zeros	valid
0.5	-17.0351	0.2583	0.3763	0.4336	0.4694	0.4966	0.5197	0.5415	0.5640	0.5923	0.7396	9986	31939
1.0	-11.7535	0.0483	0.1941	0.2716	0.3223	0.3613	0.3941	0.4265	0.4600	0.5005	0.7699	10020	31905
2.0	-12.9138	-0.2386	-0.0390	0.0555	0.1255	0.1827	0.2325	0.2810	0.3314	0.3951	0.9800	10441	31484
3.0	-13.2939	-0.4720	-0.2166	-0.0903	-0.0092	0.0578	0.1228	0.1842	0.2498	0.3346	0.9800	11524	30401
<b>60 мин</b>													
0.5	-8.6682	0.0464	0.1582	0.2235	0.2650	0.2974	0.3251	0.3516	0.3804	0.4138	0.6185	10372	31553
1.0	-30.0285	-0.1735	-0.0169	0.0543	0.1067	0.1481	0.1854	0.2199	0.2570	0.3035	0.5304	10397	31528
2.0	-13.2739	-0.4760	-0.2442	-0.1374	-0.0659	-0.0134	0.0322	0.0765	0.1247	0.1858	0.8700	10793	31132
3.0	-7.9224	-0.6470	-0.3856	-0.2558	-0.1707	-0.1050	-0.0498	-0.0016	0.0530	0.1240	0.8900	11768	30157
<b>90 мин</b>													
0.5	-9.4789	-0.0478	0.0519	0.1140	0.1566	0.1900	0.2185	0.2460	0.2758	0.3116	0.5187	10851	31074
1.0	-33.7895	-0.2843	-0.1122	-0.0361	0.0112	0.0498	0.0848	0.1189	0.1553	0.2013	0.5257	10880	31045
2.0	-15.4945	-0.5411	-0.3107	-0.2002	-0.1321	-0.0796	-0.0364	0.0015	0.0430	0.0987	0.3814	11257	30668
3.0	-9.6929	-0.6559	-0.4039	-0.2841	-0.2048	-0.1446	-0.0936	-0.0484	-0.0059	0.0499	0.6899	12227	29698
<b>120 мин</b>													
0.5	-9.4866	-0.1189	-0.0104	0.0455	0.0867	0.1201	0.1487	0.1753	0.2041	0.2421	0.4179	11505	30420
1.0	-34.2997	-0.3439	-0.1637	-0.0832	-0.0359	-0.0011	0.0304	0.0616	0.0939	0.1372	0.4429	11526	30399
2.0	-13.2439	-0.5518	-0.3292	-0.2197	-0.1516	-0.1029	-0.0638	-0.0291	0.0055	0.0520	0.4598	11856	30069
3.0	-7.3823	-0.6113	-0.3890	-0.2757	-0.2026	-0.1501	-0.1042	-0.0651	-0.0273	0.0169	0.5298	12737	29188
<b>150 мин</b>													
0.5	-8.5780	-0.1668	-0.0499	0.0014	0.0400	0.0709	0.0986	0.1254	0.1527	0.1871	0.3609	12222	29703
1.0	-29.9085	-0.3670	-0.1931	-0.1121	-0.0648	-0.0311	-0.0037	0.0237	0.0536	0.0949	0.3350	12244	29681
2.0	-10.1231	-0.5400	-0.3198	-0.2205	-0.1577	-0.1137	-0.0778	-0.0467	-0.0161	0.0217	0.3598	12551	29374
3.0	-6.0119	-0.5798	-0.3640	-0.2618	-0.1963	-0.1472	-0.1075	-0.0720	-0.0392	-0.0037	0.5099	13403	28522

Большие отрицательные значения сигнализируют о выбросах, которые при интерпретации оценок следует "цензурировать" – это около 10 % точек значащих чисел (квантили от 0 % до 10 %). Однако условия расчетов приводят к постепенному снижению с ростом порога количества допусков в холодный период и практически не меняют это количество в теплый период.

Если в середине значений и показателя, и квантилей в обеих таблицах наблюдается относительное сходство, то к концу прогностического срока и к последнему порогу контраст заметно нарастает.

Рис. 23 содержит оценку BSS прогнозов на 150 мин превышения порога 3 мм/ч.



**Рис. 23.** Картография показателя BSS прогноза на 150 мин превышения порога 3 мм/ч в холодный (левая панель) и теплый период (правая панель).

В поле показателя для холодного периода наблюдается отчетливое скопление числовых значений вокруг локаторов, при этом связность объединенного поля полностью разрушена. В поле показателя качества прогнозов в теплый период нарушения связности нет, но качество прогнозов в ~90 % точек хуже выборочной климатологии (последние строки табл. 16 и 17, см. также значения valid).

37

#### 4.4.3. Площадь под кривой относительной оперативной характеристики (ROCA)

Зависимость доли попаданий от доли ложных тревог известна в верификации прогнозов под названием *относительной оперативной характеристики* OOX (relative operating characteristic, ROC). Интегральной оценкой полезности категорийного прогноза считается площадь под графиком этой зависимости (ROCA, ROC-Area, площадь под ROC-кривой). ROC-кривая и ROCA рассчитаны с помощью функций `verify()` и `roca()` математического пакета `verification` языка R-project.

Для корректной оценки указанных характеристик требуется выполнение дополнительного условия на последовательность пар "наблюдение – вероятность" в виде  $\{0,1\} - \{p\}$ , где  $p$  – оценка вероятности события по ансамблю. Это условие состоит в некотором максимальном для заданного объема выборки значении рангового критерия Вилкоксона, используемого для расчета доверительных интервалов на точках кривой OOX. Выборка не проходит проверку критерием Вилкоксона при слишком малом объеме и/или при критическом отсутствии ненулевых значений оценок вероятности и единиц в бинарном представлении наблюдений. В последнем случае речь идет о так называемой "проблеме

совпадений" ("tie problem"). Путем экспериментов с архивными данными для обоих периодов было установлено, что критерий Вилкоксона почти всегда рассчитывается при допуске в выборку не менее 10 ненулевых значений хотя бы в одном из членов пары  $\{0,1\}$  –  $\{p\}$ . Это условие, уменьшающее количество допустимых выборок, было использовано в программе формирования выборок для построения кривой ROC.

Рассмотрим картографию площади под кривой ROC (рис. 24 и 25) и соответствующие числовые данные (табл. 18 и 19).

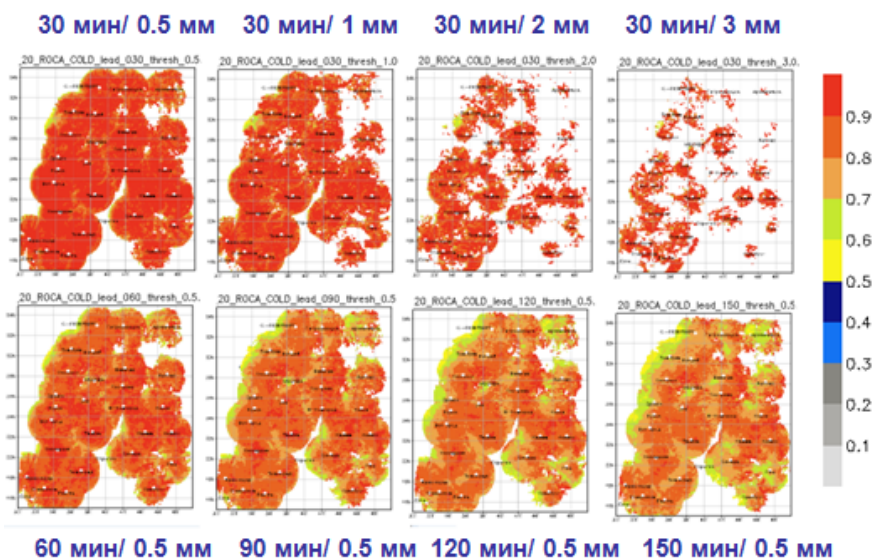


Рис. 24. Картография показателя ROCA прогнозов в холодный период.

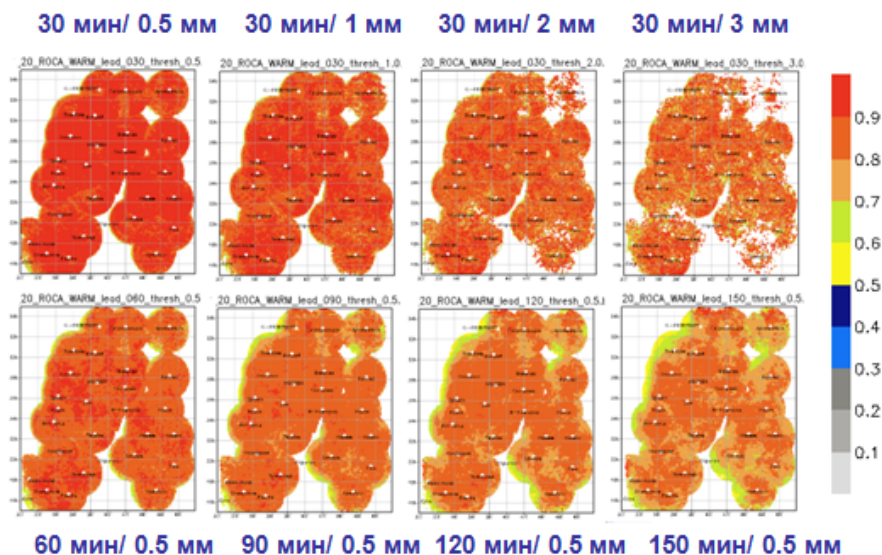


Рис. 25. Картография показателя ROCA прогнозов в теплый период.

По верхнему ряду рис. 24 получасового прогноза для выделенных порогов видна знакомая картина разрушения пространственной структуры с ростом порога; при этом столь же заметны сужающиеся очаги около локаторов. Значений меньше 0.5 не просматривается на

всех картах, включая нижний ряд панелей. При росте заблаговременности прогноза превышения 0.5 мм нет разрушения объединенной карты показателя, но видны явные граничные эффекты на западной стороне зон обзора большинства локаторов.

В панелях для теплого периода (рис. 25) разрушение пространственной структуры с ростом порога невелико; значений меньше 0.5 не просматривается; основной диапазон показателя – не менее 0.7. Сходно наличие явных граничных эффектов на западной стороне зон обзора.

Рассмотрим соответствующие табличные данные, выделив зеленым цветом "хороший прогноз"  $ROCA > 0.8$  и синим цветом "полезный прогноз"  $ROCA > 0.7$  [4].

В табл. 18 соотношение хороших и полезных прогнозов равно 111/163, полезные прогнозы занимают больше половины территории по всем заблаговременностям и порогам. Следует обратить внимание на количество точек с отсутствующими (от 10592 до 36655) и значащими данными (от 31333 до 5270), при этом объемы условных выборок не учитываются.

Таблица 18

**Пространственное распределение показателя ROCA по 10%-ным квантилям в теплый период с указанием количества значащих чисел (допусков, valid) в поточечных выборках в холодный период**

30 мин thresh	0%min	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%max	Nas	valid
0.5	0.5050	0.8060	0.8640	0.8910	0.9080	0.9210	0.9310	0.9410	0.9520	0.9670	1.0000	10592	31333
1.0	0.5160	0.7500	0.8320	0.8640	0.8870	0.9065	0.9240	0.9420	0.9670	0.9990	1.0000	14064	27861
2.0	0.5370	0.7490	0.7990	0.8330	0.8740	0.9150	0.9530	0.9990	1.0000	1.0000	1.0000	22797	19128
3.0	0.5250	0.7490	0.7686	0.8330	0.8990	0.9980	0.9990	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	29559	12366
60 мин													
0.5	0.5090	0.7370	0.7920	0.8270	0.8480	0.8650	0.8790	0.8940	0.9090	0.9290	1.0000	11374	30551
1.0	0.5130	0.6890	0.7470	0.7820	0.8110	0.8320	0.8570	0.8780	0.9060	0.9660	1.0000	15152	26773
2.0	0.5160	0.6640	0.7190	0.7480	0.7830	0.8290	0.8550	0.8980	0.9970	0.9990	1.0000	24618	17307
3.0	0.5190	0.6650	0.7436	0.7490	0.7710	0.8320	0.8848	0.9980	0.9990	1.0000	1.0000	31617	10308
90 мин													
0.5	0.5000	0.6920	0.7480	0.7860	0.8110	0.8310	0.8500	0.8670	0.8840	0.9090	1.0000	11067	30858
1.0	0.5140	0.6530	0.6970	0.7410	0.7600	0.7890	0.8160	0.8390	0.8700	0.9200	1.0000	15721	26204
2.0	0.5140	0.6220	0.6640	0.7030	0.7460	0.7490	0.7960	0.8320	0.8990	0.9980	1.0000	26045	15880
3.0	0.5110	0.6230	0.6650	0.6990	0.7480	0.7490	0.8290	0.8740	0.9980	0.9990	1.0000	33420	8505
120 мин													
0.5	0.5030	0.6670	0.7240	0.7570	0.7850	0.8080	0.8270	0.8460	0.8660	0.8940	1.0000	11442	30483
1.0	0.5100	0.6220	0.6690	0.7060	0.7390	0.7590	0.7880	0.8160	0.8450	0.8990	1.0000	16634	25291
2.0	0.5120	0.5980	0.6350	0.6640	0.6970	0.7440	0.7480	0.7980	0.8580	0.9960	1.0000	27689	14236
3.0	0.5090	0.5980	0.6240	0.6640	0.6970	0.7470	0.7490	0.8300	0.9960	0.9990	1.0000	35580	6345
150 мин													
0.5	0.5060	0.6570	0.7070	0.7400	0.7660	0.7900	0.8120	0.8310	0.8530	0.8850	1.0000	11509	30416
1.0	0.5070	0.6100	0.6550	0.6860	0.7160	0.7420	0.7640	0.7940	0.8270	0.8940	1.0000	16711	25214
2.0	0.5030	0.5810	0.6200	0.6480	0.6650	0.7100	0.7450	0.7700	0.8310	0.9950	1.0000	28602	13323
3.0	0.5230	0.5950	0.6220	0.6630	0.6650	0.7450	0.7480	0.7990	0.9950	0.9980	1.0000	36655	5270

В табл. 19 соотношение хороших и полезных прогнозов равно 96/157, полезные прогнозы также занимают больше половины территории по выделенным заблаговременностям и порогам.

Как и раньше, при сравнении качества прогнозов по обоим периодам рекомендуется сопоставлять количество точек поля, в которых имелись допустимые выборки для верификации данным показателем. При росте порога (от 0.5 до 3 мм) и заблаговременности (от 30 до 150 мин) количество констант отсутствия в поле в холодный период изменяется от

10592 до 36655, а в теплый – от 9492 до 18951. При этом количество допустимых значений (допусков) в холодный период падает от 31333 до 5270 (почти в 6 раз), а в теплый период – от 32432 до 22974 (в 1.4 раза).

Таблица 19

**Пространственное распределение показателя ROCA по 10%-ным квантилям в теплый период с указанием количества значащих чисел (допусков, valid) в поточечных выборках для теплого периода**

30 мин	0%min	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%max	Nas	valid
thresh													
0.5	0.5160	0.8630	0.8910	0.9040	0.9130	0.9210	0.9270	0.9330	0.9400	0.9490	1.0000	9493	32432
1.0	0.5100	0.8090	0.8500	0.8700	0.8830	0.8940	0.9040	0.9140	0.9240	0.9370	1.0000	9693	32232
2.0	0.5130	0.7470	0.7860	0.8160	0.8350	0.8550	0.8710	0.8870	0.9050	0.9310	1.0000	10986	30939
3.0	0.5210	0.6970	0.7480	0.7740	0.7990	0.8300	0.8460	0.8720	0.8980	0.9420	1.0000	13152	28773
60 мин													
0.5	0.5110	0.7940	0.8340	0.8520	0.8650	0.8750	0.8840	0.8920	0.9010	0.9120	1.0000	9604	32321
1.0	0.5080	0.7310	0.7780	0.8030	0.8200	0.8340	0.8470	0.8590	0.8720	0.8900	1.0000	10019	31906
2.0	0.5100	0.6610	0.7030	0.7390	0.7560	0.7770	0.7960	0.8150	0.8340	0.8660	1.0000	11963	29962
3.0	0.5150	0.6210	0.6630	0.6910	0.7170	0.7450	0.7580	0.7840	0.8130	0.8540	1.0000	15198	26727
90 мин													
0.5	0.5080	0.7480	0.7950	0.8170	0.8310	0.8430	0.8530	0.8620	0.8720	0.8850	1.0000	9711	32214
1.0	0.5040	0.6830	0.7330	0.7590	0.7780	0.7940	0.8080	0.8220	0.8370	0.8560	1.0000	10262	31663
2.0	0.5050	0.6190	0.6600	0.6870	0.7100	0.7300	0.7470	0.7690	0.7920	0.8250	1.0000	12693	29232
3.0	0.5120	0.5890	0.6210	0.6470	0.6640	0.6910	0.7130	0.7420	0.7610	0.8080	1.0000	16364	25561
120 мин													
0.5	0.5020	0.7110	0.7630	0.7890	0.8050	0.8170	0.8280	0.8380	0.8500	0.8650	1.0000	9780	32145
1.0	0.4970	0.6500	0.6970	0.7270	0.7460	0.7630	0.7780	0.7930	0.8100	0.8310	1.0000	10505	31420
2.0	0.5050	0.5930	0.6270	0.6560	0.6770	0.6980	0.7180	0.7390	0.7590	0.7920	1.0000	13295	28630
3.0	0.5110	0.5690	0.5950	0.6190	0.6400	0.6610	0.6820	0.7070	0.7400	0.7710	1.0000	17588	24337
150 мин													
0.5	0.4990	0.6830	0.7380	0.7650	0.7830	0.7960	0.8080	0.8190	0.8310	0.8480	1.0000	9889	32036
1.0	0.4900	0.6240	0.6720	0.7020	0.7230	0.7390	0.7550	0.7700	0.7870	0.8090	1.0000	10740	31185
2.0	0.5040	0.5750	0.6070	0.6310	0.6530	0.6710	0.6910	0.7110	0.7360	0.7640	1.0000	14006	27919
3.0	0.5080	0.5570	0.5790	0.5990	0.6190	0.6370	0.6580	0.6780	0.7060	0.7450	1.0000	18951	22974

**Выводы и обсуждение**

Проведены испытания радиолокационного наукастинга интенсивности осадков в холодный период года. Для сравнения с проведенными ранее результатами испытаний в теплый период года все показатели качества пересчитаны в параллельном режиме на данных накопленных архивов по обоим периодам. В качестве эталонных данных для верификации использованы композитные поля интенсивности осадков, полученные по радарным наблюдениям.

Рассчитаны разнообразные показатели качества для детерминистских и вероятностных прогнозов: средняя абсолютная ошибка (MAE), количество попаданий и правильных отклонений, смещение повторяемостей (BIAS), беспристрастная оценка угроз (ETS), критерий Пирса-Обухова (PSS), индекс экстремальной зависимости (EDI), оценка и критерий Брайера (BS и BSS), площадь под кривой оперативной характеристики (ROCA).

Выходная продукция системы верификации представлена в единообразном формате в виде карт в условных географических координатах и в виде таблиц пространственных 10%-ных квантилей. Такое представление позволяет делать обобщение поточечных оценок на территорию испытаний, не прибегая к специфичным приемам пространственной верификации, и одновременно учитывать (или даже исключать, т. е. цензурировать) возможные выбросы в полях характеристик интенсивности и в полях показателей качества.

Испытания продемонстрировали надежность оперативной системы ансамблевого наукастинга осадков в холодный период.

Сравнительный анализ качества прогнозов для индивидуальных членов ансамбля и для среднего поля по ансамблю выявил в оба периода преимущество (хотя небольшое, но систематическое) прогноза по среднему полю. Данный результат свидетельствует о целесообразности использования ансамблей даже малого объема.

Сравнительный анализ показал более высокое качество прогнозов в холодный период года по всем использованным критериям, кроме, возможно, показателя смещения (BIAS). Однако следует иметь в виду, что объемы выборок для верификации при прогнозах превышения высоких порогов интенсивности на отдаленные сроки в холодный период могут быть на порядок ниже соответствующих объемов выборок в теплый период.

По результатам проведенных испытаний Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета на заседании 16.12.2022 рекомендовала **«внедрить технологию детерминистского и вероятностного наукастинга осадков в ФГБУ "Гидрометцентр России" в качестве основного оперативного метода наукастинга интенсивности осадков на срок до 2.5 часов в холодный период года (ноябрь–март) по Европейской территории России».**

**Основные проблемы**, требующие осмысления и посильного решения, перечислены в статье [10] о результатах испытаний в теплый период года. Верификация результатов испытаний в холодный период оказалась более сложной из-за существенно большего количества поточечных выборок малого объема, формируемых при росте порога превышения и при увеличении заблаговременности. Выделим две наиболее острые проблемы, возникшие при испытаниях системы наукастинга в холодный период.

Во-первых, к статистической неустойчивости оценок качества детерминистских прогнозов добавляется опасность деградации пространственной связности полей интенсивности осадков, особенно в холодный период, что делает невозможным обобщение оценок на всю область прогнозирования. Эта проблема кардинально может быть решена только путем повышения плотности сети ДМРЛ и отчасти с помощью усовершенствования радиолокационного метода измерения осадков в дальней зоне ( $\geq 100$ – $120$  км от ДМРЛ).

Во-вторых, при верификации ансамблевых прогнозов интегральная оценка площади под кривой оперативной характеристики (ROCA) искусственно "раздувается" до высоких значений при одновременном провале качества относительно выборочной средней по показателю Брайера (BSS). Решить данную задачу вполне посильно разработчикам системы наукастинга в Гидрометцентре России: например, можно увеличить объем прогностического

ансамбля и одновременно застраховаться подходящей предварительной статистической проверкой полного набора пар значений "наблюдение – вероятность" в точках поля.

### Список литературы

1. *Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М.* Мезометеорологические процессы. – М.: Изд-во МГУ, 2006. – 101 с.
2. *Грингоф И.Г., Клещенко А.Д.* Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том I. – Обнинск: Росгидромет, 2011. – 808 с. – [https://pogoda-moscow.ru/agr\\_meteo\\_1.pdf](https://pogoda-moscow.ru/agr_meteo_1.pdf)
3. *Кендалл М.Дж., Стьюарт А.* Статистические выводы и связи. – М.: Наука, 1973. – 899 с.
4. *Киктёв Д.Б., Муравьев А.В., Бундель А.Ю.* Методические рекомендации по верификации метеорологических прогнозов. – М.: АМА ПРЕСС, 2021. – 94 с.
5. Методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике: Третья редакция. – М.: Росгидромет, 2019. – 129 с. – [https://method.meteorf.ru/norma/document/dop\\_3red](https://method.meteorf.ru/norma/document/dop_3red).
6. *Муравьев А.В., Киктёв Д.Б., Бундель А.Ю., Дмитриева Т.Г., Смирнов А.В.* Верификация прогнозов метеорологических явлений со значительными воздействиями в районе проведения Олимпиады «Сочи-2014». Часть I // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 9. – С. 31–48.
7. *Муравьев А.В., Киктев Д.Б., Смирнов А.В.* Оперативная технология наукастинга осадков на основе радарных данных и результаты верификации для теплого периода года (май-сентябрь 2017 г.) // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2018. – № 1 (367). – С. 6–38.
8. *Муравьев А.В., Киктев Д.Б., Смирнов А.В., Зайченко М.Ю.* Оперативная технология наукастинга осадков на основе радиолокационных данных и сравнительные результаты точечной верификации для теплого и холодного периодов года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2019. – № 2 (372). – С. 12–40.
9. *Муравьев А.В., Киктев Д.Б., Смирнов А.В.* Усовершенствованная технология радиолокационного наукастинга осадков и результаты верификации в теплый период года (май - сентябрь 2020 г.) // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2021. – Информационный сборник № 48. – С. 13–41.
10. *Муравьев А.В., Киктев Д.Б., Смирнов А.В.* Сравнительная верификация усовершенствованной системы радиолокационного наукастинга осадков с учетом пропусков и при различных методах формирования выборок (по результатам испытаний в теплый период годам май - сентябрь 2017 и 2020 гг.) // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. Росгидромет. – 2022. – Информационный сборник № 49. – С. 3–56.
11. РД 52.27.284–91. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. Методические указания. – СПб.: Гидрометеиздат, 1991. – 150 с.

12. Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений. – Изд. ВМО № 8. Глава 7. Радиолокационные измерения. – 2017. – С. 853-938.
13. СП 50.13330.2012. Свод правил. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – 109 с.
14. Forecast Verification in Atmospheric Science. A Practitioner's Guide: Second Ed. / I. Jolliffe, D. Stephenson (Eds.). – John Wiley & Sons Ltd, 2012. – 274 p.
15. Hogan R.J., Ferro C.A.T., Jolliffe I.T., Stephenson D.B. Equitability revisited: why the “equitable threat score” is not equitable // Weather Forecast. -2010. – No. 25. – P. 710–726.
16. Skamarock W.C. Evaluating mesoscale NWP models using kinetic energy spectra // Mon. Wea. Rev. – 2004. – Vol. 132. – P. 3019–3032.
17. Wilks D.S. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. – Elsevier, 2019. – 816 p.

*В.Г. Мизяк<sup>1</sup>, К.А. Алипова<sup>1</sup>, М.А. Толстых<sup>2,1</sup>, В.С. Розутов<sup>1</sup>*

**РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЕРАТИВНЫХ ИСПЫТАНИЙ  
ГЛОБАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ  
АНСАМБЛЕВОГО СРЕДНЕСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ПОГОДЫ  
НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ПЛАВ**

*<sup>1</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр*

*Российской Федерации, г. Москва;*

*<sup>2</sup> Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, г. Москва*

**1. Краткое описание модели ПЛАВ и локального ансамблевого фильтра Калмана**

**1.1. Локальный ансамблевый фильтр Калмана с переходом в пространство ансамбля**

44

Алгоритм системы усвоения данных на основе локального ансамблевого фильтра Калмана с преобразованием ансамбля (фильтр LETKF) предложен в [17]. Реализация систем усвоения на основе алгоритма LETKF описана в [26].

Алгоритм состоит в последовательном расчете по формулам (1) – (3):

$$\bar{x}^a = \bar{x}^b + X^b P^a (y - H\bar{x}^b)^T R^{-1} (y - H\bar{x}^b), \quad (1)$$

$$X^a = X^b [(N_f - 1)P^a]^{1/2}, \quad (2)$$

$$P^a = [(N_f - 1)I + (HX^b)^T R^{-1} (HX^b)]^{-1}, \quad (3)$$

где  $P^a$  – матрица ковариации анализа в пространстве ансамбля первых приближений;

$y$  – вектор наблюдений размерности  $N_o$ ;

$\{x_1^b, \dots, x_{N_f}^b\}$  – ансамбль первого приближения из  $N_f$  векторов прогноза размерности  $N_a$ ,

полученных на предыдущем шаге цикла усвоения;

$X^b = \{x_1^b - \bar{x}^b, \dots, x_{N_f}^b - \bar{x}^b\}$  – матрица отклонений от среднего первых приближений,

где  $\bar{x}^b$  – среднее по ансамблю первое приближение;

$X^a = \{x_1^a - \bar{x}^a, \dots, x_{N_a}^a - \bar{x}^a\}$  – матрица отклонений от среднего анализ;

$\bar{x}^a$  – средний анализ;  $R$  – матрица ковариации ошибок наблюдений;

$H$  – оператор наблюдений, переводящий любой вектор состояния  $x$ , принадлежащий «модельному» пространству размерности  $N_a$ , в вектор наблюдений  $y$ , принадлежащий пространству наблюдений размерности  $N_o$ :  $y = Hx + a$ .

Фильтр LETKF работает на согласованной с моделью ПЛАВ сетке. В вектор состояния атмосферы фильтра LETKF входят температура, относительная влажность, зональная и меридиональная скорость ветра для каждого узла сетки в свободной атмосфере. Отличие от атмосферных переменных модели ПЛАВ – использование относительной влажности вместо удельной. Кроме того, в вектор состояния атмосферы фильтра LETKF входят давление на поверхности, температура и относительная влажность на высоте 2 метра.

Размер ансамбля легко масштабируется и ограничен в основном объемом доступных вычислительных ресурсов.

Система усвоения обрабатывает наблюдения на сети метеостанций, аэрологические, самолетные и спутниковые наблюдения скорости ветра AMV.

Решение ( $\bar{x}^a$  и  $X^a$ ) в LETKF вычисляется локально. Вычисления производятся независимо для каждого узла сетки с использованием своего набора локальных наблюдений, находящихся в пределах заранее заданного радиуса влияния от выбранного узла. Такая локализация позволяет легко реализовать параллельные вычисления. Кроме того, локализация позволяет избежать влияния ложных корреляций между ошибками первых приближений в удаленных друг от друга узлах. Ложные корреляции могут возникать при использовании оценки матрицы ковариации по ансамблю ограниченного размера.

В данной реализации фильтра [26] вычисления производятся независимо для каждого узла сетки по широте, долготе и высоте, используя наблюдения, попадающие в локальную область – цилиндр заданного радиуса и высоты, построенный вокруг выбранного узла.

Для увеличения разброса ансамбля применяется мультипликативная и аддитивная инфляция.

Сначала мультипликативная инфляция увеличивает разброс ансамбля, затем к рассчитанным с ее учетом элементам ансамбля добавляется сгенерированный шум (аддитивная инфляция).

Мультипликативная инфляция реализована следующим образом: матрица ковариации ошибок первого приближения умножается на коэффициент  $\rho$ , больший единицы, и формула (3) приобретает вид:

$$P^a = [(N_f - 1)\rho^{-1}I + (HX^b)^T R^{-1}(HX^b)]^{-1}. \quad (4)$$

При использовании аддитивной инфляции к полученным участникам ансамбля  $X^a$  прибавляется случайный шум, параметризующий погрешность модели:

$$(x_i^a)_{inf} = x_i^a + \varepsilon, \quad (5)$$

где  $x_i^a$  – столбцы матрицы  $X^a$ , полученные в (2);

$i$  – номер участника ансамбля;

$\varepsilon$  – случайный шум;

$\left[ (x_1^a)_{inf}, \dots, (x_{N_f}^a)_{inf} \right]$  – итоговый ансамбль анализов после применения инфляции.

Расчет аддитивной инфляции выполняется по формуле:

$$s(h, p) = \sum r_{nm}(h, p) Y_{nm}, \quad (6)$$

где  $Y_{nm}$  – сферические гармоники степени  $n$  и порядка  $m$  [19];

$h, p$  – номер модельного уровня и номер модельной переменной.

Коэффициенты  $r_{nm}$  – сгенерированные псевдослучайные числа с гауссовым распределением, умноженные на заданную функцию от номера модельного уровня по вертикали. Такие  $r_{nm}$  некоррелированы для разных  $m, n$  и  $p$  и имеют заданную корреляцию по вертикали [24]. Дисперсии величин  $r_{nm}$  задаются константами так, чтобы полученный шум имел заданный радиус корреляции по горизонтали и вертикали и заданную дисперсию. Радиус корреляции и дисперсия сгенерированного шума настраиваются в зависимости от модельного уровня  $h$ , широты и переменной  $p$ .

## 1.2. Центрирование ансамбля анализов

Для повышения точности ансамблевого прогноза привлекается дополнительная информация – оперативные анализы Гидрометцентра России.

Пусть  $\{x_1^a, \dots, x_{N_f}^a\}$  – ансамбль анализов, сгенерированный ансамблевой системой

усвоения на основе LETKF,  $\bar{x}^a = \frac{\sum_1^{N_f} x_1^a}{N_f}$  – средний по ансамблю анализ. Пусть  $x^{op}$  – оперативный анализ Гидрометцентра. Тогда элементы центрированного ансамбля  $x_i^{ac}$  можно получить следующим образом:

$$x_i^{ac} = x_i^a + (x^{op} - \bar{x}^a). \quad (7)$$

Оперативный анализ Гидрометцентра задан на  $p$ -уровнях на сетке с шагом 0,5 градуса по широте и долготе. Для использования в блоке центрирования оперативный анализ Гидрометцентра сначала интерполируется на модельную сетку, затем вычисляется центрированный ансамбль анализов.

### 1.3. Модель атмосферы ПЛАВ

Глобальная полулагранжева модель атмосферы ПЛАВ (от ПолуЛагранжева, основанная на уравнении Абсолютной завихренности, в английском варианте – SL-AV) разработана в Институте вычислительной математики РАН и Гидрометцентре России.

Модель ПЛАВ состоит из блока решения уравнений динамики атмосферы (далее – динамического ядра) собственной разработки и набора параметризаций процессов подсеточного масштаба, в основном заимствованных.

Особенностями динамического блока являются использование вертикальной компоненты абсолютной завихренности и дивергенции в качестве прогностических переменных, а также применение конечных разностей четвертого порядка на несмещенной сетке для аппроксимации неадвективных слагаемых уравнений. Модельная сетка допускает переменное разрешение по широте [28], именно такой вариант применяется в описываемых далее численных экспериментах. С 2017 года во всех версиях модели применяется гибридная вертикальная координата [10].

Мы используем полунявную схему интегрирования по времени [4] и полулагранжев подход к дискретизации адвективных членов уравнений [27]. Данное сочетание позволяет использовать шаги по времени значительно больше ограничения, определяемого из условия устойчивости Куранта. Практически можно использовать шаг по времени в 3–5 раз больше, чем максимально возможный при использовании эйлеровой схемы расчета адвективных членов и/или явной схемы интегрирования по времени, однако требуется решение задачи типа Гельмгольца на каждом шаге по времени. Используется неразнесенная (несмещенная) сетка по горизонтали. Таким образом, для полулагранжевой схемы расчета адвекции необходимо вычисление только одного семейства обратных траекторий (при использовании смещенной сетки типа «С» [3] требуется три семейства траекторий). Кроме того, точность расчета траекторий на несмещенной сетке выше, чем на смещенной, так как обе компоненты горизонтальной скорости ветра в одних и тех же узлах, следовательно, требуется меньше интерполяций.

Малая численная дисперсия инерционно-гравитационных волн и волн Россби на несмещенной сетке достигается за счет использования в качестве прогностических

переменных вертикальной компоненты относительной завихренности и горизонтальной дивергенции поля скорости ветра (согласно [25]). Это требует восстановления скорости горизонтального ветра по завихренности и дивергенции на каждом шаге по времени. Данная задача эффективно и с высокой точностью решается прямым обращением конечно-разностных определений относительной завихренности и дивергенции [31].

Для вычисления градиента, дивергенции и завихренности используются конечно-разностные формулы четвертого порядка. Уравнение Гельмгольца в модели ПЛАВ решается прямым методом с использованием быстрого преобразования Фурье по долготе. Подробное описание динамического блока модели приведено в [7, 28].

Эффект процессов, происходящих на масштабе более мелком, чем масштаб сетки (например, глубокой конвекции), во всех гидродинамических моделях описывается с помощью известных в моделях значений термодинамических параметров атмосферы на масштабе сетки и ряда введенных из физических соображений зависимостей и параметров. Используемое в моделях описание этих процессов принято называть параметризациями.

В настоящее время блок параметризаций модели ПЛАВ можно условно разделить на три основных части:

– радиационные процессы в атмосфере: применяются свободно распространяемые пакеты CLIRAD SW [13, 29] и RRTMG LW [21] для коротко- и длинноволновой радиации соответственно;

– расчет тепло- и влагообмена в почве с учетом фазовых состояний воды. Эта параметризация описана в следующем разделе;

– описание всех остальных процессов подсеточного масштаба в атмосфере (глубокая и мелкая конвекция, планетарный пограничный слой, гравитационно-волновое сопротивление, образование и выпадение осадков, облачность и пр.) и на поверхности Земли (параметризация тепло- и влагообмена с подстилающей поверхностью с учетом типа растительности, наличия снега и пр.) В этих параметризациях применяются алгоритмы, которые были разработаны под руководством Ж.-Ф. Желена консорциумом по мезомасштабному прогнозу погоды ACCORD /LACE, также называемые ALARO [30]. Эти алгоритмы были адаптированы и уточнены авторами данной статьи.

Для повышения точности описания радиационных потоков в модели ПЛАВ авторами была разработана новая параметризация морских слоисто-кучевых облаков, представленная в [8]. Анализ спутниковых данных показывает, что общий вклад этих облаков в среднегодовой радиационный баланс на верхней границе атмосферы в средних широтах вблизи западного побережья Африки, Австралии, Северной и Южной Америки составляет 50–70 Вт/м<sup>2</sup> [18].

Важной параметризацией процессов в стратосфере, добавленной в модель, является параметризация сопротивления гравитационных волн конвективного происхождения [16]. Более подробное описание алгоритмов параметризаций см. [7].

#### 1.4. Блок подготовки почвенных переменных

Блок подготовки почвенных переменных выполняет усвоение приземных наблюдений температуры и влажности на сети метеостанций, вычисляя поля приземной температуры и относительной влажности. Алгоритм усвоения основан на схеме оптимальной интерполяции.

Задаваемая для расчета анализа ковариационная матрица ошибок содержит зависимость от расстояния по горизонтали и от разности высот. Функция корреляции имеет следующий вид:

$$\mu_{ij} = \exp\left(\frac{-1}{2} \left[ \left(\frac{r_{ij}}{R}\right)^2 + \left(\frac{z_{ij}}{Z}\right)^2 \right]\right), \quad (8)$$

где  $r_{ij}$  — расстояние между точками  $i$  и  $j$ ;  $z_{ij}$  — разность высот между точками  $i$  и  $j$ ;

$R$  — коэффициент, задающий радиус корреляции;

$Z$  — максимальная разность высоты коррелирующих между собой точек.

В реализованном анализе возможно задание различных радиусов корреляции для разных широт, а также различных радиусов корреляции для океана и суши. Радиусы корреляции задаются отдельно для «широтных полос» на суше и для океана. Затем инкременты анализов используются для инициализации температуры и влагосодержания почвы [5].

Этот блок позволяет инициализировать при запуске модели ПЛАВ приземную температуру, влажность и почвенные переменные (поверхностную температуру почвы, температуру глубинного слоя, влагосодержание приповерхностного и глубинного слоя). Блок усвоения почвенных характеристик согласован с применяемой в ПЛАВ параметризацией процессов на поверхности суши с учетом растительности [11, 12, 22] (ISBA, Interaction Soil Biosphere Atmosphere).

В блоке усвоения почвенных переменных в виду отсутствия оперативных наблюдений для параметров почвы для коррекции значений почвенных переменных в каждой точке горизонтальной сетки используются инкременты анализа температуры и влажности на высоте 2 метра. Реализована схема коррекции почвенных переменных, предложенная в [15].

Метод коррекции температуры почвы основан на вычислении инкремента анализа температуры на высоте 2 метров в каждой точке сетки:

$$\Delta T_s = \Delta T_{2m}; \quad \Delta T_p = \frac{\Delta T_{2m}}{\Delta z},$$

где  $\Delta$  обозначает инкремент, т. е. разность значений анализа и значений первого приближения (6-часовой прогноз, стартовавший 6 часов назад).

Коррекция влагосодержания поверхностного слоя почвы  $\omega_s$  и основного слоя почвы  $\omega_d$  линейно вычисляется из разности поля первого приближения и поля анализа для приземных переменных посредством оптимальной интерполяции:

$$\Delta\omega_s = \alpha_s^T \Delta T_{2m} + \alpha_s^H \Delta RH_{2m},$$

$$\Delta\omega_p = \alpha_p^T \Delta T_{2m} + \alpha_p^H \Delta RH_{2m},$$

где  $\alpha_s^T$ ,  $\alpha_s^H$ ,  $\alpha_p^T$ ,  $\alpha_p^H$  – оптимальные коэффициенты, минимизирующие среднеквадратичные ошибки температуры и относительной влажности на уровне 2 м, которые зависят от структуры почвы, локального солнечного времени и характеристик подстилающей поверхности.

Для анализа влагосодержания глубинного слоя почвы в применяемой оперативно параметризации ISBA также используется реализация упрощенного расширенного фильтра Калмана (Simplified Extended Kalman Filter – SEKF) [2].

## 1.5. Блок верификации

Блок верификации позволяет сравнивать полученные ансамбли прогнозов и анализов с фактическим состоянием атмосферы. В качестве фактического состояния атмосферы используются оперативные анализы Гидрометцентра России.

Блок верификации позволяет оценивать среднюю и среднеквадратичную ошибку ансамблевого прогноза, оценивать относительную рабочую характеристику (Relative operating characteristic – ROC score), оценки Брайера и корреляции аномалий. Все оценки рассчитываются в соответствии с рекомендациями ВМО, изложенными в [20].

Кроме этого, блок верификации позволяет рассчитывать отклонение ансамбля анализов и первых приближений от наблюдений. Рассчитываются средние и среднеквадратичные ошибки среднего по ансамблю прогноза и разбросы ансамбля для всех используемых типов наблюдений.

## 2. Система ансамблевого прогноза

Гидрометцентром России совместно с ИВМ РАН разработана технология глобального ансамблевого среднесрочного прогноза. Технология ансамблевого прогноза построена на базе глобальной полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ2018, которая запускается для

каждого элемента ансамбля начальных данных, формируемого с использованием блока генерации возмущений начальных данных. Блок генерации начальных возмущений включен в состав ансамблевой системы усвоения данных.

Основными компонентами системы являются разрабатываемые в лаборатории система усвоения данных на основе Локального ансамблевого фильтра Калмана с переходом в пространство ансамбля (LETKF) и глобальная полулагранжева модель атмосферы ПЛАВ2018, описание которых приводится в разделе 1.

Все компоненты системы ансамблевого прогноза (САП) работают на одной и той же сетке. За основу взята модельная сетка ПЛАВ.

## **2.1. Особенности реализации системы ансамблевого прогноза**

Система ансамблевого прогноза работает циклически с шагом цикла 6 часов. Система состоит из следующих компонент:

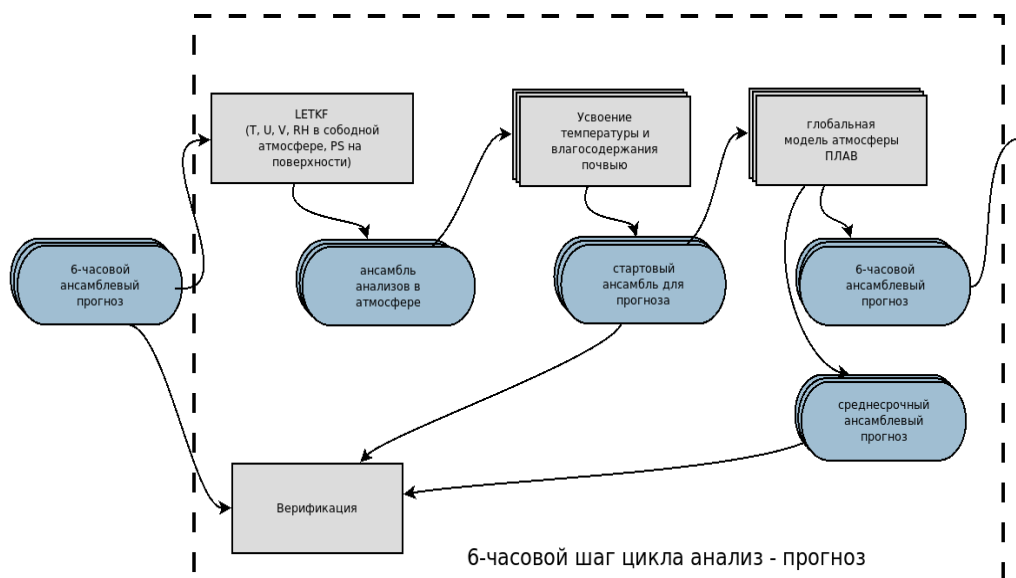
- блок подготовки стартового ансамбля на основе алгоритма LETKF,
- блок подготовки почвенных переменных,
- блок центрирования,
- полулагранжева модель атмосферы (ПЛАВ),
- блок верификации.

Все блоки работают на сетке модели ПЛАВ2018. Модель ПЛАВ2018 имеет 96 уровней по вертикали (до уровня 0,04 гПа), разрешение по долготе составляет 0,9 градуса, по широте – 0,72 градуса. По горизонтали сетка регулярная широтно-долготная. По вертикали – гибридная вертикальная координата.

В модели в качестве переменной влажности используется удельная влажность, в остальных блоках – относительная влажность.

Блок подготовки стартового ансамбля может работать в цикле автономно, используя лишь первое приближение, полученное моделью ПЛАВ, и наблюдения. Схема автономной работы в цикле приведена на рис. 1. Однако большая часть спутниковых наблюдений, несущих значительный объем информации о состоянии атмосферы, в настоящее время никак не учитываются. Это приводит к повышенной погрешности анализов при автономной работе системы усвоения (особенно в Южном полушарии, где число усваиваемых наблюдений невелико).

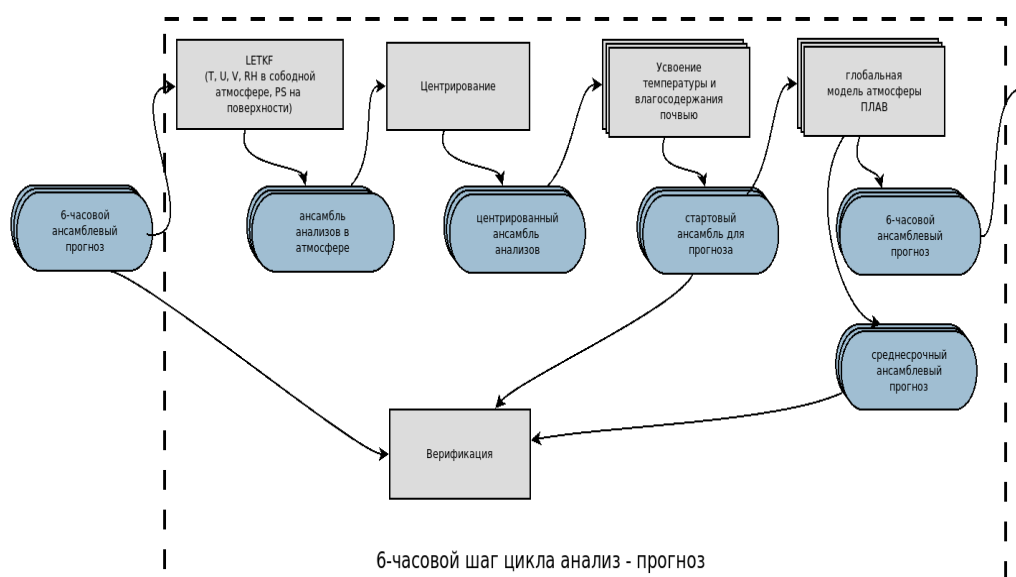
Для повышения точности анализа при циклическом усвоении была привлечена дополнительная информация – оперативные анализы Гидрометцентра России [9], заданные на  $p$ -уровнях с пространственным разрешением 0,5 градуса по долготе и широте.



**Рис. 1.** Схема автономной работы в цикле системы ансамблевого прогноза.

В блоке центрирования ансамбль анализов модифицируется так, чтобы средний по ансамблю анализ совпал с оперативным анализом Гидрометцентра России с сохранением отклонений отдельных анализов из ансамбля от среднего по ансамблю анализа.

Таким образом, среднеквадратичная ошибка ансамблевого прогноза определяется оперативным анализом Гидрометцентра России, а разбросы ансамблей – системой усвоения LETKF. Это приводит к завышению разбросов в тех областях, где количество усваиваемых наблюдений оперативной системой усвоения существенно выше, чем в системе LETKF. Схема работы системы ансамблевого прогноза с центрированием на оперативные анализы Гидрометцентра приведена на рис. 2.



**Рис. 2.** Схема работы в цикле системы ансамблевого прогноза с центрированием на оперативные анализы Гидрометцентра России.

## 2.2. Модель ПЛАВ2018

Для расчета ансамблевого прогноза используется полулагранжева глобальная конечно-разностная модель общей циркуляции атмосферы ПЛАВ2018. Модель разработана в Институте вычислительной математики РАН и Гидрометцентре России [6, 7].

Модель ПЛАВ2018 представляет собой усовершенствованную версию глобальной оперативной модели ПЛАВ-20, имеющей более низкое (по сравнению с ПЛАВ20) пространственное разрешение. Усовершенствования состоят в основном в более новых версиях блока описания процессов подсеточного масштаба.

Особенностями атмосферной модели ПЛАВ являются применение конечных разностей четвертого порядка на несмещенной сетке для аппроксимации неадвективных слагаемых уравнений и использование вертикальной компоненты абсолютного вихря и дивергенции в качестве прогностических переменных.

Модель использует набор параметризаций процессов подсеточного масштаба (коротко- и длинноволнового излучения, глубокой и мелкой конвекции, процессов в пограничном слое атмосферы, трения гравитационных волн, обмена тепла и влаги с поверхностью), разработанных международным консорциумом ALADIN/LACE [14]. Применяется параметризация физических процессов подсеточного масштаба на поверхности суши с учетом растительности ISBA (Interaction Soil Biosphere Atmosphere) [22, 23].

Остальные блоки системы ансамблевого прогноза (система усвоения на основе фильтра LETKF, блок центрирования, блок усвоения почвенных переменных) используют согласованную с моделью горизонтальную сетку, вертикальную координату и количество вертикальных уровней.

## 2.3. Результаты оперативных испытаний системы ансамблевого прогноза

Оперативные испытания системы ансамблевого прогноза проводились сотрудниками лаборатории глобальных численных прогнозов с декабря 2020 года.

Оценка технологии ансамблевого прогнозирования на основе модели ПЛАВ была произведена для периода с августа 2021 по январь 2022 года. Среднесрочные прогнозы на 10 суток рассчитывались по исходным данным в срок 00 часов ВСВ. В сроки 06, 12, 18 часов ВСВ рассчитывался только ансамбль первых приближений (6-часовой ансамблевый прогноз).

При выполнении испытаний верифицировались 9 стандартных полей, рекомендованных в руководстве по верификации ансамблевых прогнозов ВМО [20]:

- 1) PMSL – давление на уровне моря,

- 2) H500 – высота поверхности 500 гПа,
- 3) T2m – приповерхностная температура (температура на высоте 2 метра над поверхностью),
- 4) T250 – температура на уровне 250 гПа,
- 5) T850 – температура на уровне 850 гПа,
- 6) U250 – зональная компонента скорости ветра на уровне 250 гПа,
- 7) U850 – зональная компонента скорости ветра на уровне 850 гПа,
- 8) V250 – меридиональная компонента скорости ветра на уровне 250 гПа,
- 9) V850 – меридиональная компонента скорости ветра на уровне 850 гПа.

Оценки проводились по полям оперативного объективного анализа Гидрометцентра России (на сетке с шагом 1,5 градуса по широте и долготе). Для каждого из полей рассчитывались оценки Брайера, относительные рабочие характеристики (ROC score – Receiver Operating Characteristic) и площади под ROC кривыми для Северного полушария (20–90° с. ш.), Южного полушария (20–90° ю. ш.) и в тропиках (20° ю. ш. – 20° с. ш.) для положительных аномалий более 2, 1,5 и 1 стандартного отклонения, отрицательных аномалий менее 2, 1,5 и 1 стандартного отклонения.

Ансамблевые показатели успешности прогнозов рассчитываются следующим образом.

- 1) *Показатель упорядоченной непрерывной вероятности* (анг. Continuous ranked probability score – CRPS)

Формула для вычисления:

$$CRPS = \int_{-\infty}^{\infty} (P_{forecast}(x) - P_{obs}(x)) dx, \quad (A.1)$$

где  $x$  – значение переменной, для которой считается оценка;  $P_{forecast}$  – оценка вероятности спрогнозированного значения;  $P_{obs}$  – оценка вероятности наблюдаемого значения.

В случае непрерывных величин CRPS меряет интегральную разность между плотностями вероятностей спрогнозированной и наблюдаемой величин. В идеальном случае равна нулю. Имеет размерность оцениваемой величины. Совпадает с абсолютной ошибкой в случае детерминированного прогноза.

- 2) *Оценка Брайера* (анг. Brier Score – BS)

Формула для вычисления:

$$BS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - o_i)^2, \quad (A.2)$$

где  $N$  – количество всех наблюдений;  $p_i$  – оценка вероятности наступления события;  $o_i$  – исход (0 – событие не наступило, 1 – событие наступило).

Меряет средний квадрат вероятностной ошибки. В идеальном случае равна нулю.

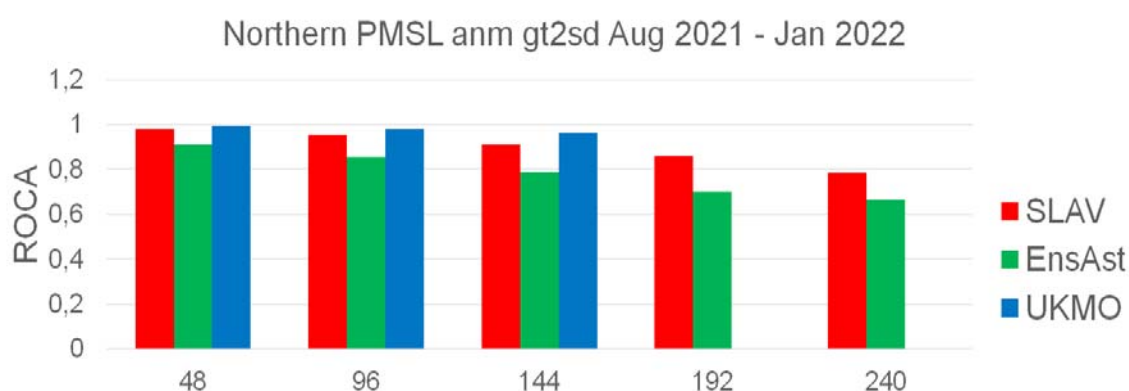
### 3) *Диаграммы надежности* (анг. Reliability diagram – RD)

Строятся путем нанесения для всех вероятностных категорий по оси X спрогнозированной вероятности события, а по оси Y частоты появления события. Показывает, насколько хорошо спрогнозированная вероятность события соответствует наблюдаемой частоте его появления.

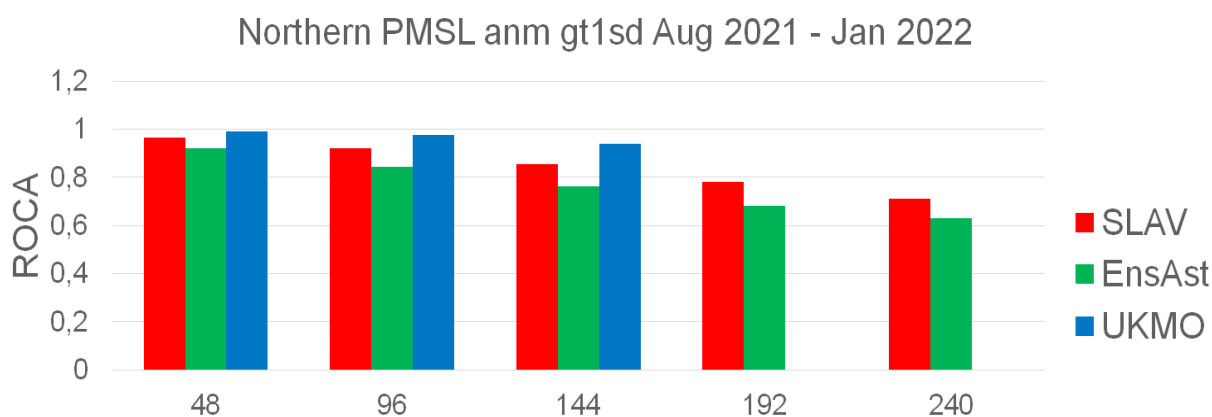
### 4) *Сравнительные оперативные характеристики* (анг. Relative Operating Characteristic – ROC)

На график наносятся доля истинно положительных примеров (по оси Y) и соответствующие доли ложно положительных примеров (по оси X) для некоторого события, посчитанные по многим исходам в пределах одного региона для какого-то определенного периода. Прогноз события тем лучше, чем ближе к верхнему левому углу на графике. В этом случае площадь под кривой (анг. ROC area – ROCA) стремится к единице.

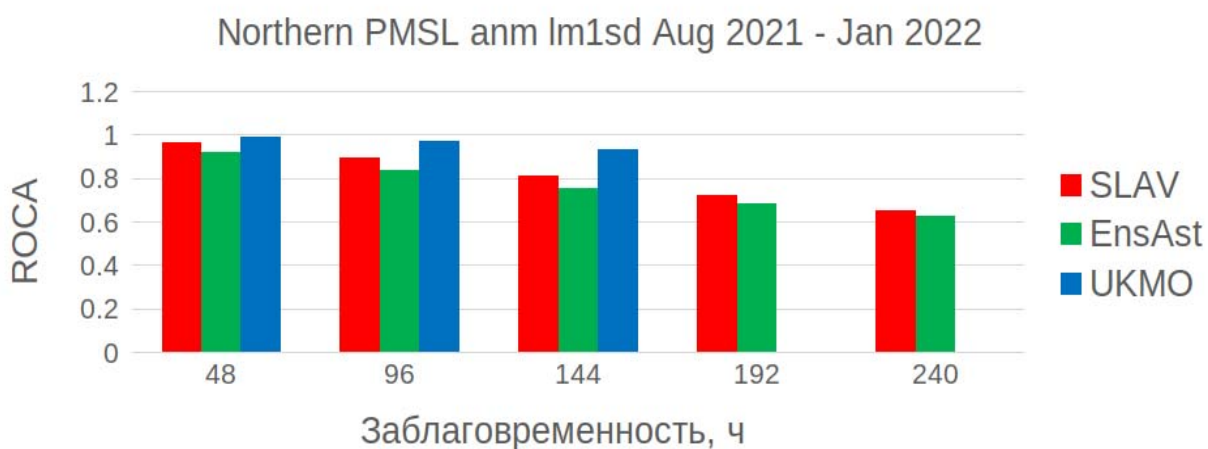
На рис. 3–10 приведены площади под ROC кривыми, полученные по результатам ансамблевых прогнозов полей давления на уровне моря (рис. 3–6), высоты поверхности 500 гПа (рис. 7–10) в зависимости от заблаговременности прогноза (приведены результаты для заблаговременности прогнозов 2, 4, 6, 8, 10 суток – заблаговременности прогнозов приведены в часах на горизонтальной шкале). Результаты рассчитаны для Северного полушария. ROC кривые и площади под кривыми рассчитывались для положительных аномалий более 2 стандартных отклонений (рис. 3, 7), более 1 стандартного отклонения (рис. 4, 8) и отрицательных аномалий менее 2 стандартных отклонений (рис. 5, 9) и менее 1 стандартного отклонения (рис. 6, 10).



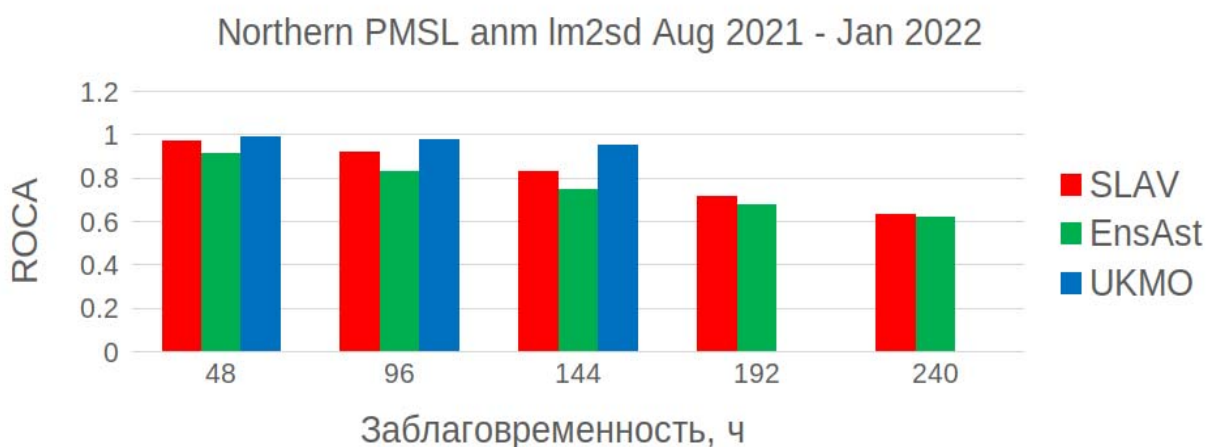
**Рис. 3.** Площадь под ROC кривой положительной аномалии более 2 стандартных отклонений давления на уровне моря в Северном полушарии.



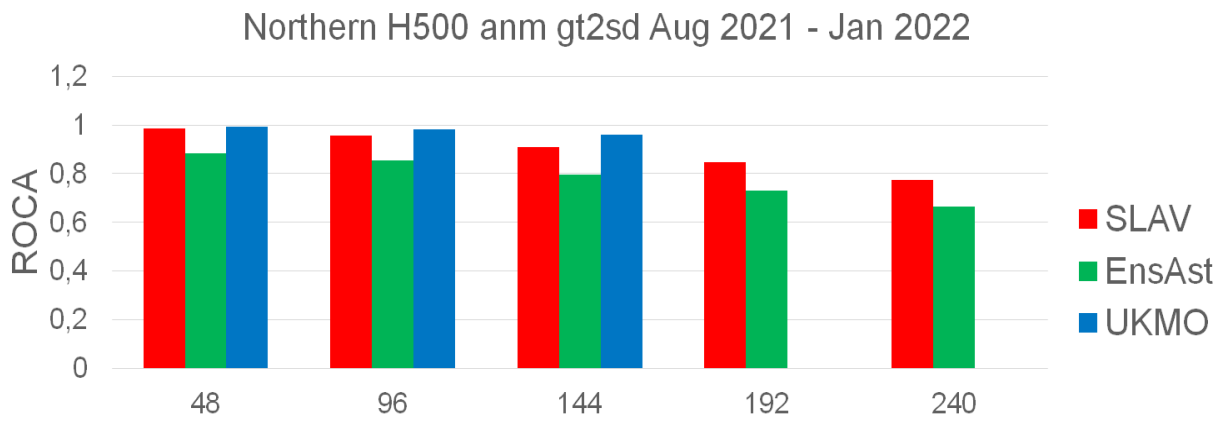
**Рис. 4.** Площадь под ROC кривой положительной аномалии более 1 стандартного отклонения давления на уровне моря в Северном полушарии.



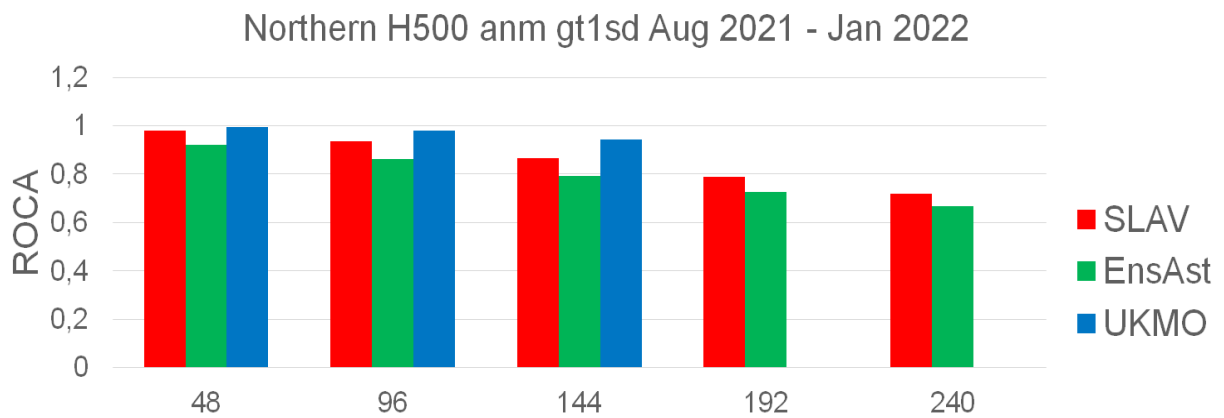
**Рис. 5.** Площадь под ROC кривой отрицательной аномалии менее 1 стандартного отклонения давления на уровне моря в Северном полушарии.



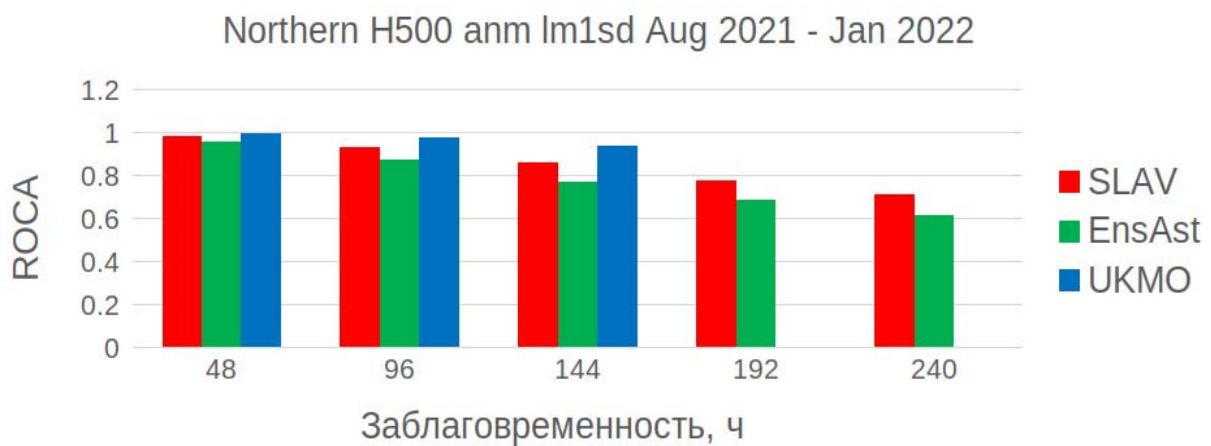
**Рис. 6.** Площадь под ROC кривой отрицательной аномалий менее 2 стандартных отклонений давления на уровне моря в Северном полушарии.



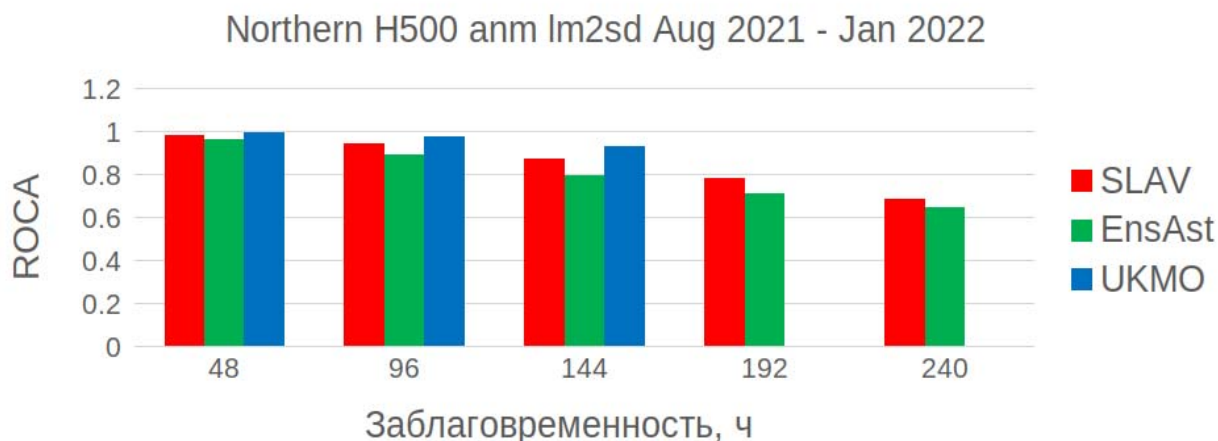
**Рис. 7.** Площадь под ROC кривой положительных аномалий более 2 стандартных отклонений высоты поверхности 500 гПа в Северном полушарии.



**Рис. 8.** Площадь под ROC кривой положительных аномалий более 1 стандартного отклонения высоты поверхности 500 гПа в Северном полушарии



**Рис. 9.** Площадь под ROC кривой отрицательных аномалий менее 1 стандартного отклонения высоты поверхности 500 гПа в Северном полушарии.



**Рис. 10.** Площадь под ROC кривой отрицательных аномалий менее 2 стандартных отклонений высоты поверхности 500 гПа в Северном полушарии.

Для сравнения вместе с результатами, полученными на испытаниях для САП на основе модели ПЛАВ и ансамблевой системы усвоения на основе LETKF (на рисунках отмечена как SLAV, столбцы красного цвета), приведены площади под ROC кривыми этих же полей, полученные для САП на основе спектральной модели T169L31 [1] (EnsAst, зеленый цвет на рисунках) и площади под ROC кривыми, полученные для системы ансамблевого прогноза UKMO (синий цвет на рисунках). Оценки для систем ансамблевого прогноза UKMO и EnsAst были взяты с сайта Главного центра верификации систем ансамблевого прогноза [<http://epsv.kishou.go.jp/EPsV>].

Как видно из рисунков, площади под ROC кривыми поля приземного давления системы ансамблевого прогноза на основе ПЛАВ в Северном полушарии заметно превосходят результаты системы ансамблевого прогноза на основе спектральной модели T169L31, но уступают системе UKMO для всех заблаговременностей прогнозов.

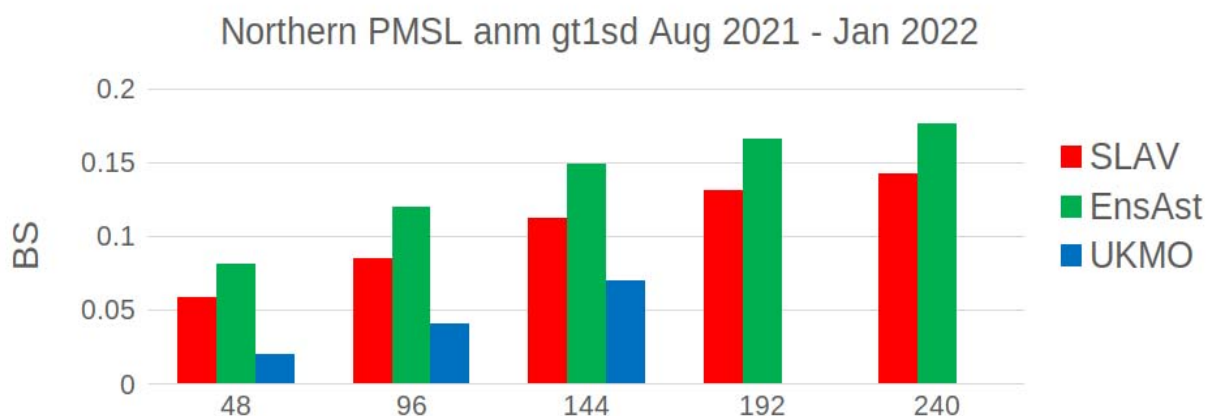
Оценки, рассчитанные по прогнозам САП ПЛАВ для отрицательных аномалий, убывают быстрее, чем оценки прогнозов САП ПЛАВ, рассчитанные для положительных аномалий.

При небольшой заблаговременности прогноза качество прогноза высоты геопотенциала H500 в САП ПЛАВ почти не уступает САП UKMO, но с ростом заблаговременности прогноза качество прогнозов САП ПЛАВ убывает быстрее.

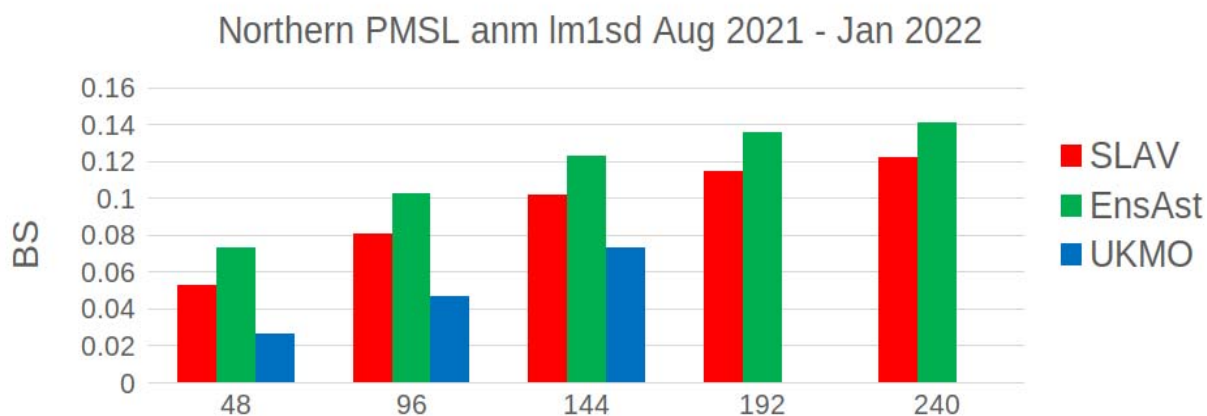
На рис. 11 и 12 приведены оценки Брайера, рассчитанные по результатам ансамблевых прогнозов полей давления на уровне моря в зависимости от заблаговременности прогноза (приведены результаты для заблаговременности прогнозов 2, 4, 6, 8, 10 суток – заблаговременности прогнозов приведены в часах на горизонтальной шкале). Для сравнения вместе с результатами, полученными на испытаниях для описываемой в данной работе

системы ансамблевого прогноза (на рисунках отмечена как SLAV, столбцы красного цвета), приведены оценки Брайера этих же полей, полученные для САП Гидрометцентра на основе спектральной модели [1] (EnsAst, зеленый цвет на рисунках) и оценки Брайера, полученные для системы ансамблевого прогноза UKMO (синий цвет на рисунках). Оценки Брайера для систем ансамблевого прогноза UKMO и EnsAst были взяты с сайта Главного центра верификации систем ансамблевого прогноза [<http://epsv.kishou.go.jp/EPsv>].

Для заблаговременностей прогнозов 8 и 10 суток оценки Брайера системы ансамблевого прогноза UKMO не приведены, так как они отсутствуют на сайте центра верификации.



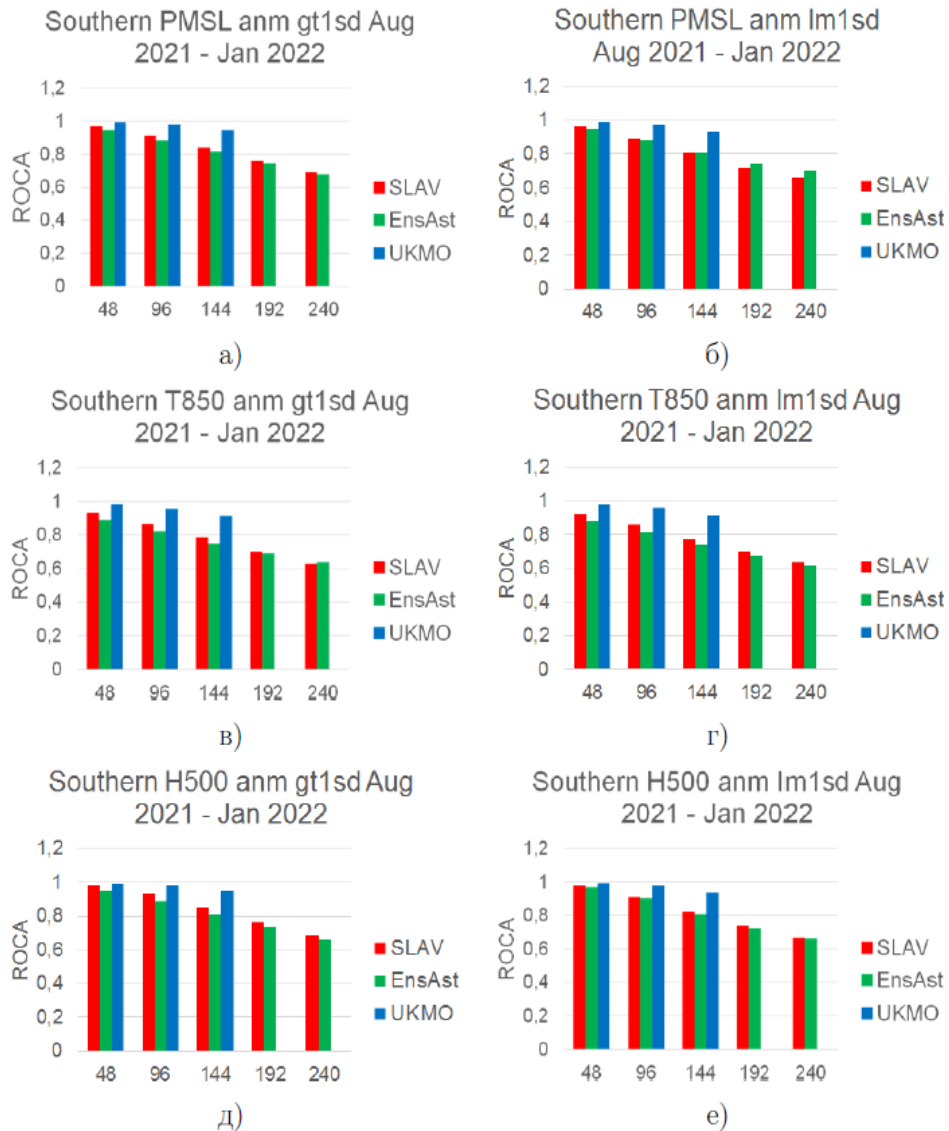
**Рис. 11.** Оценки Брайера положительных аномалий более 1 стандартного отклонения давления на уровне моря в Северном полушарии.



**Рис. 12.** Оценки Брайера отрицательных аномалий менее 1 стандартного отклонения давления на уровне моря р0 в Северном полушарии.

Как видно из рисунков, показатели Брайера поля приземного давления системы ансамблевого прогноза на основе модели ПЛАВ в Северном полушарии заметно превосходят результаты системы на основе спектральной модели T169L31, но уступают системе UKMO для всех заблаговременностей прогнозов.

На рис. 13 приведены площади под ROC кривыми, полученные по результатам ансамблевых прогнозов в Южном полушарии (20–90° ю. ш.) в зависимости от заблаговременности прогноза (приведены результаты для заблаговременности прогнозов 2, 4, 6, 8, 10 суток – заблаговременности прогнозов приведены в часах на горизонтальной шкале).



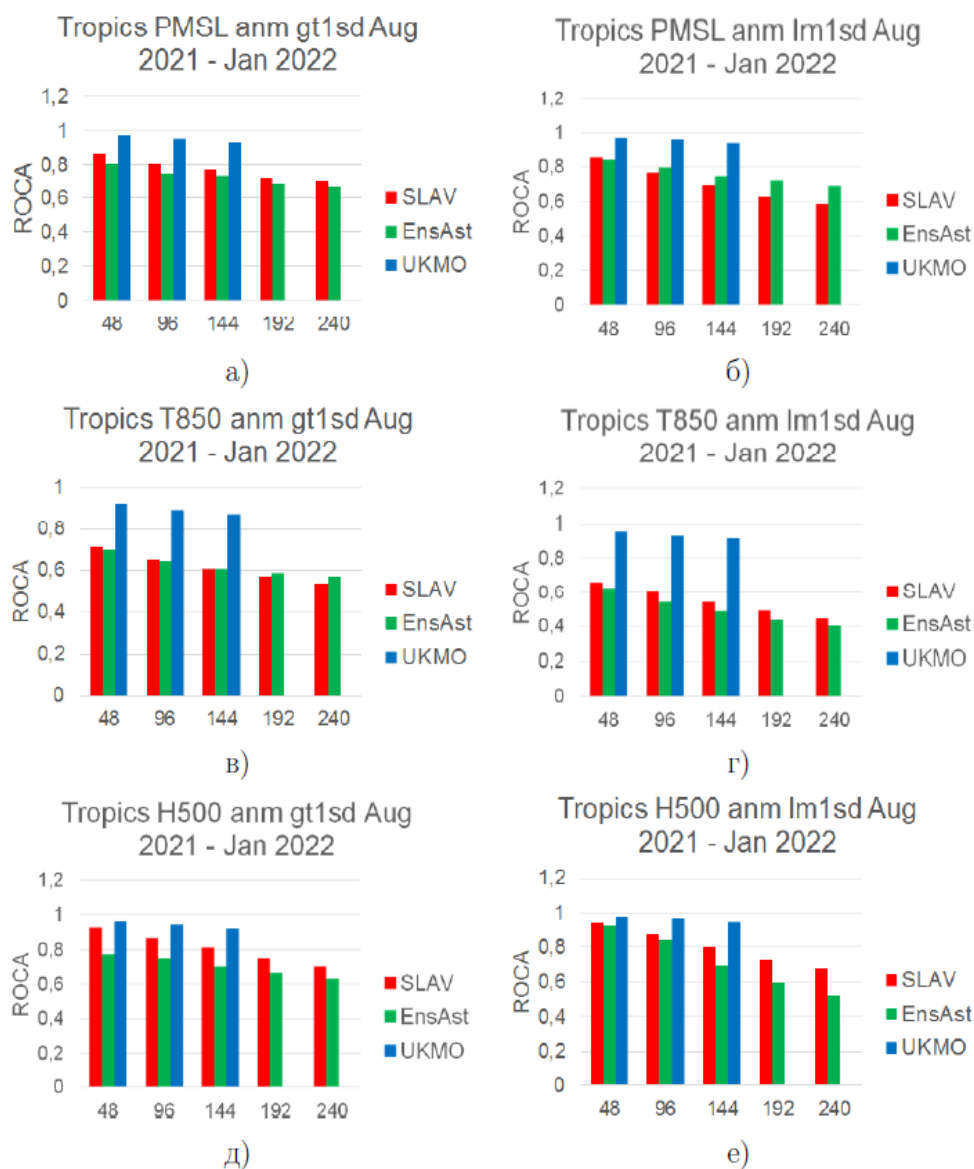
**Рис. 13.** Площади под ROC кривыми, рассчитанные для положительных аномалий более 1 стандартного отклонения (а, в, д) и отрицательных аномалий менее 1 стандартного отклонения (б, г, е) полей приземного давления (а, б), температуры на уровне 850гПа (в, г) и высоты поверхности H500 (д, е) в Южном полушарии по результатам ансамблевых прогнозов САП ПЛАВ (красные столбцы), САП на основе спектральной модели T169L31 (зеленые столбцы) и САП UKMO (синие столбцы). На горизонтальной шкале – заблаговременность прогноза в часах.

ROC кривые строились для положительных аномалий больше 1 стандартного отклонения (рис. 13а, в, д) и отрицательных аномалий менее 1 стандартного отклонения (рис. 13б, г, е) для ансамблевых прогнозов полей приземного давления, температуры на

уровне 850 гПа и высоты поверхности 500 гПа. Для сравнения вместе с результатами, полученными на испытаниях для описываемой в данной работе системы ансамблевого прогноза (на рисунках отмечена как SLAV, столбцы красного цвета), приведены площади под ROC кривыми этих же полей, полученные с использованием САП Гидрометцентра России на основе спектральной модели [1] (EnsAst, зеленый цвет на рисунках) и площади под ROC кривыми, полученные для системы ансамблевого прогноза UKMO (синий цвет на рисунках). Оценки для систем ансамблевого прогноза UKMO и EnsAst были взяты с сайта Главного центра верификации систем ансамблевого прогноза [<http://epsv.kishou.go.jp/EPsv>].

На рисунках видно, что в Южном полушарии ансамблевые прогнозы ПЛАВ превосходят ансамблевые прогнозы на основе спектральной модели T169L31, но уступают прогнозам UKMO (исключение – отрицательные аномалии менее 1 стандартного отклонения поля приземного давления (PMSL на рисунках) при заблаговременности прогноза 8 и 10 суток). Качество прогнозов ПЛАВ с ростом заблаговременности прогноза убывает быстрее, чем в системе UKMO. Для всех заблаговременностей и всех полей ансамблевый прогноз САП UKMO превосходит по качеству САП ПЛАВ. С ростом заблаговременности прогноза качество прогнозов САП ПЛАВ убывает быстрее. Наиболее заметна разница в качестве прогнозов для поля T850. Этот недостаток может быть частично связан с недостаточным пространственным разрешением модели ПЛАВ2018. Качество прогнозов САП ПЛАВ убывает с ростом заблаговременности прогноза немного быстрее, чем САП на основе спектральной модели T169L31.

На рис. 14 приведены площади под ROC кривыми, полученные по результатам ансамблевых прогнозов в тропиках ( $20^{\circ}$  ю. ш. –  $20^{\circ}$  с. ш.) в зависимости от заблаговременности прогноза (приведены результаты для заблаговременности прогнозов 2, 4, 6, 8, 10 суток – заблаговременности прогнозов приведены в часах на горизонтальной шкале). ROC кривые строились для положительных аномалий более 1 стандартного отклонения (рис. 14а, в, д) и отрицательных аномалий меньше 1 стандартного отклонения (рис. 14 б, г, е) для ансамблевых прогнозов полей приземного давления, температуры на уровне 850 гПа и высоты поверхности 500 гПа. Для сравнения вместе с результатами, полученными на испытаниях для описываемой в данной работе системы ансамблевого прогноза (на рисунках отмечена как SLAV, столбцы красного цвета) приведены площади под ROC кривыми этих же полей, полученные с использованием САП Гидрометцентра России на основе спектральной модели [1] (EnsAst, зеленый цвет на рисунках) и площади под ROC кривыми, полученные для системы ансамблевого прогноза UKMO (синий цвет на рисунках). Оценки для систем ансамблевого прогноза UKMO и EnsAst были взяты с сайта Главного центра верификации систем ансамблевого прогноза [<http://epsv.kishou.go.jp/EPsv>].



**Рис. 14.** Площади под ROC кривыми, рассчитанные для положительных аномалий величиной более 1 стандартного отклонения (а, в, д) и менее 1 стандартного отклонения (б, г, е) полей приземного давления (а, б), температуры на уровне 850гПа (в, г) и высоты поверхности H500 (д, е) в тропиках по результатам ансамблевых прогнозов САП ПЛАВ (красные столбцы), САП на основе спектральной модели T169L31 (зеленые столбцы) и САП UKMO (синие столбцы).  
На горизонтальной шкале – заблаговременность прогноза в часах.

Как видно на рисунках, в тропиках ансамблевые прогнозы САП на основе ПЛАВ заметно уступают прогнозам САП UKMO для всех заблаговременностей и всех приведенных переменных. Особенно заметна разница в качестве прогнозов поля T850, что может объясняться недостаточным пространственным разрешением модели ПЛАВ2018. Площади под ROC кривыми прогноза САП ПЛАВ поля H500 почти не уступает прогнозу САП UKMO при небольшой заблаговременности прогноза (меньше 2 суток), но качество прогноза САП ПЛАВ быстро убывает с ростом заблаговременности. Площади под ROC кривыми прогнозов САП ПЛАВ убывают быстрее, чем в САП на основе спектральной модели T169L31.

## Выводы

В период испытаний производилось сравнение успешности ансамблевых прогнозов по модели ПЛАВ2018 с успешностью ансамблевых прогнозов по глобальной спектральной модели Гидрометцентра России Т169L31, а также с прогнозами зарубежных метеоцентров (английского УКМО). Испытания показали высокую надежность функционирования созданной технологии ансамблевых прогнозов на базе модели ПЛАВ2018 и системы усвоения данных с использованием ансамблевого фильтра Калмана.

Результаты показывают существенно более высокую успешность прогноза для полей геопотенциала, температуры, давления на уровне моря, рассчитываемых системой на основе модели ПЛАВ2018, для всех заблаговременностей, уровней, территорий, метрик детерминистических и вероятностных оценок (за редкими исключениями) по сравнению с системой ансамблевого прогнозирования на базе спектральной модели Т169L31.

Успешность вероятностных прогнозов по созданной технологии ансамблевых прогнозов на базе модели ПЛАВ2018 для внетропической части Северного и Южного полушарий для ряда заблаговременностей прогноза (для отдельных регионов и оцениваемых переменных) сопоставима с успешностью вероятностных прогнозов по модели УКМО по критерию ROCA, но уступает прогнозам УКМО для других заблаговременностей и существенно уступает им в тропиках.

Точность вероятностных прогнозов по созданной технологии ансамблевых прогнозов на базе модели ПЛАВ2018 по оценке Брайера в большинстве случаев уступает точности прогнозов технологии УКМО.

Решение ЦМКП от 9 июня 2022 г.:

- внедрить метод ансамблевого прогноза на основе ПЛАВ2018 в качестве вспомогательного метода среднесрочного прогноза;
- авторам продолжить работу по усовершенствованию технологии ансамблевых прогнозов на базе модели ПЛАВ.

## Список литературы

1. Астахова Е.Д., Бундель А.Ю., Багров А.Н., Розинкина И.А., Пономарева Т.Я., Рузанова И.В., Цветков В.И. Система ансамблевого глобального прогноза метеорологических полей с заблаговременностью до 240 часов: результаты оперативных испытаний // Труды Гидрометцентра России. – 2016. – № 43. – С. 63–79.
2. Махнорылова С.В., Толстых М.А. Усвоение косвенных данных о влагосодержании почвы методом упрощенного расширенного фильтра Калмана в модели среднесрочного прогноза ПЛАВ // Метеорология и гидрология. – 2017. – № 6. – С. 55–67.

3. Мезингер Ф., Аракава А. Численные методы, используемые в атмосферных моделях. Т.1 // Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 89 с.
4. Робер А. Полуявный метод // Численные методы, используемые в атмосферных моделях. Т.2: пер. с англ. под ред. В.П. Садокова. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – С. 302–315.
5. Толстых М.А., Богословский Н.Н., Шляева А.В., Мизяк В.Г. Оперативная технология расчета глобальных прогнозов с помощью полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С. 170–180.
6. Толстых М.А., Желен Ж.Ф., Володин Е.М., Богословский Н.Н. и др. Разработка многомасштабной версии глобальной модели атмосферы ПЛАВ // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 6. – С. 25–35.
7. Толстых М.А., Шашкин В.В., Фадеев Р.Ю., Шляева А.В., Мизяк В.Г., Розутов В.С., Богословский Н.Н., Гойман Г.С., Махнорылова С.В., Юрова А.Ю. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза / Рецензент д.ф.-м.н. А.В. Старченко. – М.: Триада лтд, 2017. – 166 с.
8. Фадеев Р.Ю., Толстых М.А., Володин Е.М. Климатическая версия модели атмосферы ПЛАВ: разработка и первые результаты // Метеорология и гидрология. – 2019. – № 1. – С. 22–35.
9. Цырульников М.Д., Свиренко П.И., Гайфулин Д.Р., Горбунов М.Е., Багров А.Н. Новая технология циклического усвоения данных на основе схемы анализа 3D-var // Труды Гидрометцентра России. – 2016. – № 43. – С. 3–12.
10. Шашкин В.В., Толстых М.А., Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н. Версия модели атмосферы ПЛАВ в гибридной системе координат по вертикали // Метеорология и гидрология. – 2017. – № 9. – С. 24–35.
11. Bazile E., Haiti M.El, Bogatchev A., Spiridonov V. Improvement of the snow parameterization in ARPEGE/ALADIN. Proceedings of SRNWP // HIRLAM Workshop on Surface Processes, Turbulence and Mountain Effects; Madrid, 22–24 October 2001. – January 2002.
12. Boone A., Masson V., Meyers T., Noilhan J. The influence of the inclusion of soil freezing on simulations by a soil-vegetation-atmosphere transfer scheme // J. Appl. Meteor. – 2000. – Vol. 9. – P. 1544–1569.
13. Chou M.-D., Suarez M.J. A solar radiation parameterization (CLIRAD-SW) for atmospheric studies // NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD (NASA Tech. Memo. 10460). – 1999. – Vol. 15. – 48 p.
14. Geleyn J.-F. , Bazile E. , Bougeault P., Deque M. , Ivanovici V., Joly A., Labbe L., Piedelievre J.-P., Piriou J.-M., Royer J.-F. Atmospheric parameterization schemes in Meteo-France's ARPEGE N.W.P. model // Parameterization of subgrid-scale physical processes, ECMWF Seminar proceedings. – Reading, UK. – 1994. – P. 385–402.
15. Giard D., Bazile E. Implementation of a new assimilation scheme for soil and surface variables in a global NWP model // Mon. Wea. Rev. – 2000. – Vol. 128. – P. 997–1015.
16. Hines C.O. Doppler-spread parameterization of gravity-wave momentum deposition in the middle atmosphere. Part 1: Basic formulation // J. Atm. & Solar-Terrestrial Phys. – 1997. – Vol. 59, № 4. – P. 371–386.

17. *Hunt B.R., Kostelich E.J., Szunyogh I.* Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. – 2007. – № 230(1–2). – P. 112–126.
18. *Loeb N.G., Wielicki B.A., Doelling D.R., Smith G.L., Keyes D.F., Kato S., Manalo-Smith N., Wong Takmeng.* Toward optimal closure of the Earth's top-of-atmosphere radiation budget // *J. Climate*. – 2009. – Vol. 22. – P. 748–766.
19. *Machenhauer B.* Spectral Methods // Seminar on Numerical Methods in Atmospheric Models. – ECMWF, Reading, UK. – 1991. – P. 3–85.
20. Manual on the Global Data-processing and Forecasting System. // Annex IV to the WMO Technical Regulations. – 2019. – Updated in 2021. – Vol. 485.
21. *Mlawer E.J., Taubman S.J., Brown P.D., Iacono M.J., Clough S.A.* RRTM, a validated correlated-k model for the longwave // *J. Geophys. Res.* – 1997. – Vol. 102, № 16. – P. 663–682.
22. *Noilhan J., Mahfouf J.-F.* The ISBA land surface parameterization scheme // *Global Planet. Change*. – 1996. – Vol. 13, № 1–4. – P. 145–159.
23. *Noilhan J., Planton S.* A simple parameterization of land surface processes for meteorological models // *Mon. Wea. Rev.* – 1989. – Vol. 117. – P. 536–549.
24. *Palmer T., Buizza R., Doblas-Reyes F. et al.* Stochastic Parametrization and Model Uncertainty // Technical Memoranda. – ECMWF. – 2009. – Vol. 598. – P. 1–42.
25. *Randall D.A.* Geostrophic adjustment and the finite-difference shallow water equations // *Mon. Wea. Rev.* – 1991. – Vol. 122. – P. 1371–1377.
26. *Shlyayeva A., Tolstykh M., Mizyak V., Rogutov V.* Local ensemble transform Kalman filter data assimilation system for the global semi-Lagrangian atmospheric model // *Russ. J. Num. An. & Math. Mod.* – 2013. – Vol. 28, № 4. – P. 419–441.
27. *Staniforth A., Côté J.* Semi-Lagrangian integration schemes for atmospheric models – A review // *Mon. Wea. Rev.* – 1991. – Vol. 119. – P. 2206–2223.
28. *Tolstykh M., Shashkin V., Fadeev R., Goyman G.* Vorticity-divergence semi-Lagrangian global atmospheric model SL-AV20: dynamical core // *Geosci. Model Dev.* – 2017. – Vol. 10. – P. 1961–1983.
29. *Tarasova T., Fomin B.* The Use of New Parameterizations for Gaseous Absorption in the CLIRAD-SW Solar Radiation Code for Models // *J. Atmos. Oceanic Techn.* – 2007. – Vol. 24, № 6. – P. 1157–1162.
30. *Termonia P., Fischer C., Bazile E., Bouysse F., Brozková R., Bénard P., Bochenek B., Degrauwe D., Derková M., Khatib R. E., Hamdi R., Mašek J., Pottier P., Pristov N., Seity, Y.; Smoliková P., Španiel O., Tudor M., Wang Y., Wittmann C., Joly A.* The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1 // *Geosci. Mod. Devel.* – 2018. – Vol. 11. – P. 257–281.
31. *Tolstykh M., Shashkin V.* Vorticity-divergence mass-conserving semi-Lagrangian shallow-water model using the reduced grid on the sphere // *J. Comput. Phys.* – 2012. – Vol. 231 – P. 4205–4233.

**ТЕХНОЛОГИЯ ПРОГНОЗА  
ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРИСЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ  
НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ  
АНСАМБЛЕЙ ДОЛГОСРОЧНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ  
ПРОГНОЗОВ МОДЕЛИ ПЛАВ ГИДРОМЕТЦЕНТРА РОССИИ**

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва*

**Введение**

В ФГБУ «Гидрометцентр России» выпуск глобальных ансамблевых прогнозов с заблаговременностью до 4 месяцев осуществляется на базе модели общей циркуляции атмосферы ПЛАВ.

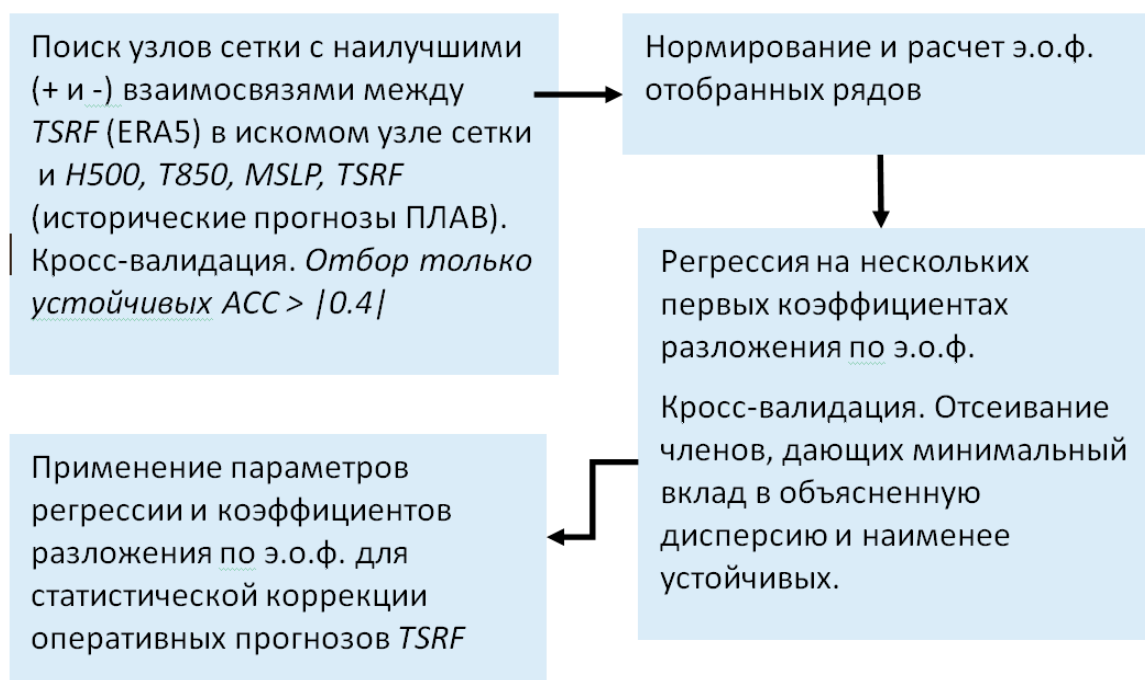
66

Качество долгосрочных гидродинамических прогнозов зависит от сезона, региона, режима атмосферной циркуляции и многих других факторов и уменьшается с увеличением заблаговременности. Это в первую очередь связано с ослаблением влияния начального состояния. Одним из путей повышения качества гидродинамических прогнозов является постпроцессинг ансамблевых прогнозов модели, который включает в себя устранение систематических ошибок модели и статистическую коррекцию (СК) результатов расчетов по модели.

В ФГБУ «Гидрометцентр России» реализована схема СК прогнозов, полученных на базе модели ПЛАВ, с использованием концепции MOS (используется анализ ошибок и внутренних взаимосвязей модельных полей для повышения качества прогностической продукции). Исходной информацией для СК являются поля реанализа ERA5 (поскольку эти поля на изобарических поверхностях используются в качестве начальных данных ПЛАВ) и ретроспективных прогнозов ПЛАВ полей среднемесячных и сезонных значений атмосферного давления на уровне моря (MSLP), геопотенциала поверхности 500 гПа (H500), температуры воздуха на поверхности 850 гПа (T850) и приземной температуры воздуха (TRSF) в регулярной географической сетке. Прогнозировались средние за сезон и детализированные по месяцам аномалии TRSF над территорией Северной Евразии [1].

Отбирались наиболее тесно взаимосвязанные по коэффициенту корреляции аномалий TRSF в узлах сетки по реанализу ERA5 и прогностические значения MSLP, H500, T850 и TRSF в скользящем окне 120 градусов по долготе и 40 градусов по широте. Ряды в узлах сетки, где получены наиболее значимые взаимосвязи, объединялись в одну выборку и представлялись в виде коэффициентов разложения по эмпирическим ортогональным функциям (э.о.ф.). Схема СК за счет поиска наилучших комбинаций коэффициентов разложения предикторов по территории Северной Евразии позволяет на основе исходных прогностических модельных данных выполнить пространственное смещение аномалий в полях предикторов (H500, T850, MSLP), приближаясь к фактическим данным, и затем с помощью регрессионного анализа восстановить поле приземной температуры воздуха в регионе исследования. Схема реализована в информационно-вычислительной системе MATLAB и предназначена для расчета детерминистских сезонных прогнозов с месячной детализацией.

На рис. 1 представлена краткая схема статистической коррекции.



**Рис. 1.** Схема статистической коррекции.

По плану проекта 1.1.3.1 НИТР Росгидромета в период 2017–2019 гг. в ФГБУ «Гидрометцентр России» проводились исследования по статистической коррекции прогнозов температуры воздуха по глобальной модели ПЛАВ072L96 на основе регрессионного подхода с разложением по э.о.ф. Результатом исследований стала схема прогноза на основе статистической коррекции ансамблей долгосрочных гидродинамических прогнозов модели ПЛАВ072L96 Гидрометцентра России.

Результаты, полученные при авторских испытаниях, позволили создать технологию прогноза внутрисезонной изменчивости температуры воздуха на основе статистической коррекции ансамблей долгосрочных гидродинамических прогнозов.

В соответствии с Планом испытания и внедрения новых и усовершенствованных методов (технологий) гидрометеорологических прогнозов Росгидромета испытания разработанной технологии проводились в Северо-Евразийском климатическом центре в оперативном режиме в период с апреля 2020 по июль 2022 года.

### Результаты испытания технологии

Для оценки оперативных прогнозов применялись следующие критерии оценки успешности:

- RMSE – средняя квадратическая ошибка;
- ACC – коэффициент корреляции аномалий прогностических и фактических полей;
- MSSS – мера мастерства (для сравнения с климатическим прогнозом);
- $\rho$  – оценка совпадения по знаку;
- Kss – Показатель Ханссена и Кипера по градациям выше и ниже нормы по территории (аналог показателя ROC для детерминистских прогнозов).

$$K_{ss} = (KS+1)/2,$$

где  $KS = HR - FAR$ ; HR и FAR определяются на основе таблиц сопряженности и характеризуют, соответственно, «долю попаданий» и «долю ложных тревог».

Регионы для оценок успешности прогнозов:

- 1) Северная Евразия (35–75°N, 20–180°E);
- 2) Европейская территория России (40–70°N; 20–60°E);
- 3) Центральная Азия (35–55°N; 50–85°E);
- 4) Сибирь (50–75°N; 60–110°E);
- 5) Северо-Восточная Азия (45–75°N; 110–180°E).

Оценки скорректированных оперативных прогнозов температуры воздуха по модели ПЛАВ в среднем для территории Северной Евразии показали улучшение качества детерминистских прогнозов по сравнению с исходными модельными прогнозами (табл. 1). Следует отметить улучшение качества прогнозов по показателю MSSS. В табл. 2 представлены коэффициенты корреляции аномалий оперативных месячных прогнозов приземной температуры воздуха по модели и с использованием статистической коррекции для районов на территории Северной Евразии.

При этом для прогнозов, стартующих в летние и зимние месяцы, в большинстве районов качество прогнозов с использованием статистической коррекции существенно не изменяется, превышение АСС скорректированных прогнозов над исходными не значимо, в первую очередь над районами с высокой оправдываемостью модельного прогноза.

Существенное улучшение качества прогнозов средних сезонных и месячных аномалий температуры воздуха в Северной Евразии по всем показателям проявляется в переходные сезоны (для прогнозов, стартующих в марте–апреле и сентябре–ноябре). На рис. 2 приведены разности оценок оперативных сезонных прогнозов с использованием статистической коррекции и исходных модельных прогнозов.

Таблица 1

**Результаты оперативных испытаний технологии месячного и сезонного прогнозирования приземной температуры воздуха для территории Северной Евразии**

Критерии оценки успешности	Прогноз	Месячный прогноз				Сезонный прогноз	
		1 мес.	2 мес.	3 мес.	4 мес.	1 сез.	2 сез.
АСС	ПЛАВ	0.35	0.16	0.10	0.12	0.23	0.18
	Коррект.	0.38	0.32	0.24	0.29	0.47	0.41
$\rho$	ПЛАВ	0.28	0.14	0.12	0.11	0.19	0.14
	Коррект.	0.3	0.23	0.18	0.18	0.40	0.34
RMSE	ПЛАВ	2.12	2.40	2.43	2.31	1.85	1.87
	Коррект.	1.89	2.08	2.22	2.09	1.49	1.54
MSSS	ПЛАВ	0.11	0.09	0.03	0.04	0.09	0.06
	Коррект.	0.25	0.23	0.22	0.2	0.27	0.23
Kss	ПЛАВ	0.58	0.58	0.51	0.5	0.56	0.55
	Коррект.	0.67	0.63	0.62	0.59	0.68	0.61

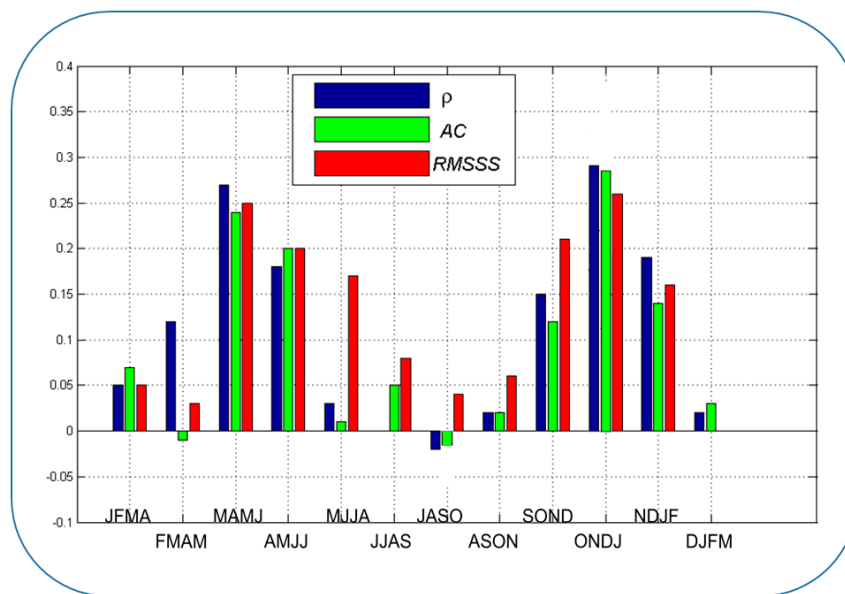
Примечание. ПЛАВ – прогноз по модели ПЛАВ, Коррект. – прогноз с использованием СК.

Таблица 2

**Коэффициенты корреляции аномалий (АСС),  $\rho$  и RMSE оперативных месячных прогнозов приземной температуры воздуха для территории Северной Евразии**

Месяц прогноза	Прогноз	Район				
		Сев. Евр.	ЕТР	Ц. Азия	Сибирь	С-В. Азия
<b>АСС</b>						
1	ПЛАВ	0.16	0.08	0.04	0.14	0.18
	Коррекция	0.31	0.32	-0.01	0.24	0.32
2	ПЛАВ	0.07	0.06	0.01	0.09	0.02
	Коррекция	0.18	0.18	-0.10	0.12	0.22
3	ПЛАВ	0.05	0.08	0.16	-0.03	0.05
	Коррекция	0.11	0.06	-0.11	0.04	0.11
4	ПЛАВ	0.08	0.13	0.12	-0.06	0.13
	Коррекция	0.22	0.20	0.02	0.27	0.24

$\rho$						
1	ПЛАВ	0.15	0.07	-0.01	0.10	0.19
	Коррекция	0.24	0.24	-0.00	0.21	0.19
2	ПЛАВ	0.11	0.10	0.02	0.06	0.05
	Коррекция	0.11	0.13	-0.11	0.02	0.05
3	ПЛАВ	0.11	0.08	0.17	-0.02	0.05
	Коррекция	0.09	0.12	-0.12	-0.01	0.01
4	ПЛАВ	0.11	0.15	0.10	-0.05	0.12
	Коррекция	0.16	0.12	0.03	0.21	0.07
RMSE						
1	ПЛАВ	2.68	2.59	2.29	3.93	2.62
	Коррекция	2.29	2.13	2.48	3.17	2.18
2	ПЛАВ	2.71	2.27	2.12	3.87	2.83
	Коррекция	2.53	2.31	2.52	3.42	2.46
3	ПЛАВ	2.62	2.34	2.10	3.69	2.64
	Коррекция	2.60	2.47	2.63	3.61	2.47
4	ПЛАВ	2.49	2.34	2.18	3.44	2.42
	Коррекция	2.43	2.40	2.31	3.02	2.41



**Рис. 2.** Годовой ход разности оценок оперативных сезонных прогнозов с коррекцией и исходных модельных прогнозов для территории Северной Евразии.

Данные прогнозы важны для гидрометеорологического обеспечения отраслей энергетики, транспорта, лесного и сельского хозяйства. Развитие предложенной схемы может включать коррекцию прогнозов сумм осадков за месяц-сезон [2], а также использование для коррекции прогнозов индексов атмосферной циркуляции.

Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 27 сентября 2022 г. принято решение:

– одобрить работу ФГБУ «Гидрометцентр России» по разработке технологии прогноза внутрисезонной изменчивости температуры воздуха на основе статистической коррекции ансамблей долгосрочных гидродинамических прогнозов модели ПЛАВ072L96 в целях повышения качества долгосрочных метеорологических прогнозов;

– внедрить технологию в практику прогностической работы ФГБУ «Гидрометцентр России» и СЕАКЦ в качестве вспомогательной при составлении метеорологических прогнозов на сезон для территории Северной Евразии;

– продолжить работы по усовершенствованию технологии.

### Список литературы

1. Тищенко В.А., Хан В.М., Толстых М.А., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Гельфан А.Н. Применение статистической коррекции месячных и сезонных детерминистских прогнозов температуры воздуха и осадков по модели ПЛАВ для отдельных районов России // Труды Гидрометцентра России. – 2015. – Вып. 358. – С. 121–132.

2. Тищенко В.А., Хан В.М., Круглова Е.Н., Куликова И.А. Прогнозирование осадков и температуры в бассейне реки Амур на месячных и сезонных интервалах времени // Метеорология и гидрология. – 2019. – № 3. – С. 24–39.

*В.М. Хан, В.А. Тищенко, Р.М. Вильфанд*

**ТЕХНОЛОГИЯ МЕСЯЧНОГО И СЕЗОННОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
ПРИЗЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА  
ПО АРКТИЧЕСКОМУ РЕГИОНУ  
НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ  
АНСАМБЛЕВЫХ ПРОГНОЗОВ ПЛАВ**

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва*

**Введение**

Решение ряда комплексных задач по освоению Арктического региона требует наличие профессиональной прогностической информации на масштабах месяц-сезон [1]. Для Арктического региона в целом качество долгосрочных прогнозов по ведущим прогностическим моделям, включая ПЛАВ, на срок более месяца имеет невысокую успешность. Качество гидродинамических прогнозов по мере увеличения заблаговременности уменьшается. При этом успешность прогнозов варьируется от региона к региону. Один из подходов на пути повышения качества гидродинамических сезонных прогнозов основан на использовании статистической коррекции. В ФГБУ «Гидрометцентр России» в рамках выполнения темы 1.1.2.2 плана НИОКР Росгидромета на 2020–2024 гг. «Развитие технологии специализированных долгосрочных прогнозов в рамках СЕАКЦ» активно развиваются методы статистической коррекции гидродинамических прогнозов по модели ПЛАВ. Наряду с этим стал разрабатываться метод статистической интерпретации ансамблевых прогнозов ПЛАВ по Арктическому региону, начиная с реализации проекта Российского научного фонда (РНФ) по созданию лаборатории гидрометеорологии Арктики (ЛаГАр) в ФГБУ «Гидрометцентр России».

Разработанная «Технология месячного и сезонного прогнозирования приземной температуры воздуха по Арктическому региону на основе статистической интерпретации ансамблевых прогнозов ПЛАВ», в соответствии с Планом испытания и внедрения новых и усовершенствованных методов (технологий) гидрометеорологических прогнозов

Росгидромета, проходила испытания в Северо-Евразийском климатическом центре в оперативном режиме в период с апреля 2020 по июль 2022 года.

Ниже представлена основная информация по протоколу испытания.

**Прогнозируемые характеристики:**

T2m – приземная температура воздуха.

**Заблаговременность и детализация по времени (периоды прогноза):**

4 месяца с заблаговременностью 0–3 месяца.

Сезон (средние за 3 месяца) с нулевой и месячной заблаговременностью.

**Территория и пространственная детализация:**

Территория Арктики по выделенным регионам.

**График выпуска прогнозов:**

Ежемесячно.

**Эталонные массивы данных**

Эталонные (фактические) данные для оценки прогнозов сеточных полей T2m рассчитываются на основе среднесуточных полей реанализа ERA5.

Оценки **эталонного климата** по выделенным регионам для расчета фактических аномалий T2m рассчитываются за период 1991–2015 гг.

**Критерии оценки успешности прогнозов:**

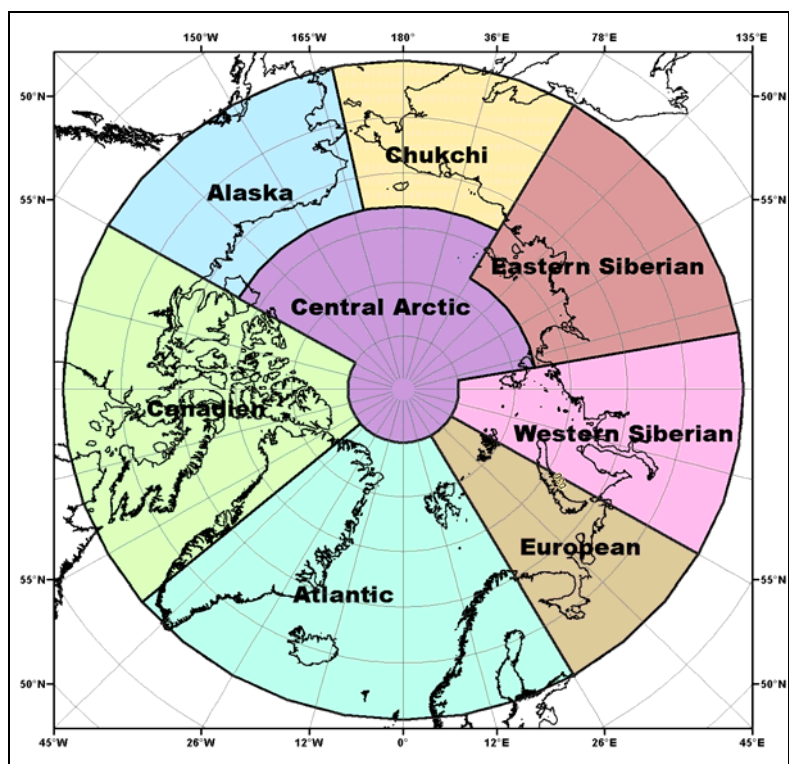
- RMSE – средняя квадратическая ошибка;
- ABSE – абсолютная ошибка;
- ACC – коэффициент корреляции аномалий прогностических и фактических полей;
- MSSS – мера мастерства (для сравнения с климатическим прогнозом);
- $\rho$  – оценка совпадения по знаку.

**Регионы для оценок успешности прогнозов:**

Вся территория Арктического региона (севернее 60° с. ш.), а также районы в северной полярной области (1 – Атлантический; 2 – Североевропейский; 3 – Западносибирский; 4 – Восточносибирский; 5 – Чукотский; 6 – Аляскинский; 7 – Канадский; 8 – Центральная Арктика) для скорректированных прогнозов (рисунок).

Реализация метода статистической интерпретации заключалась в проведении следующих этапов:

1. Осуществлялась двуступенчатая коррекция прогнозов. На первом этапе для каждого прогноза проводилась коррекция T2m на тренд, на втором этапе – коррекция с подходом MOS (model output statistics).



**Рисунок.** Районы в северной полярной области.

2. Нормированные ряды исходных прогнозов раскладывались по эмпирическим ортогональным функциям. Нормирование позволило использовать в одной выборке различные поля.

3. Отбирались компоненты с максимальным вкладом в общую дисперсию.

4. Отбор оптимальных предикторов в схеме осуществлялся в режиме скользящего окна размером 1000×1000 км с пороговыми фильтрами (коэффициент корреляции, значимый на 5%-ном уровне).

5. В режиме кроссвалидации проводился поиск наилучших комбинаций коэффициентов разложения предикторов.

6. Поля температуры воздуха восстанавливались по прогностическим полям H500, T850, SLP, а также по самим значениям температуры, сдвинутым в пространстве относительно искомой точки.

7. В скорректированных прогнозах устранялась систематическая ошибка.

Более подробная информация о методе представлена в [2, 3].

### **Результаты испытаний**

Результаты авторских (табл. 1) и независимых (табл. 2) испытаний технологии месячного и сезонного прогнозирования приземной температуры воздуха по Арктическому

региону на основе статистической интерпретации ансамблевых прогнозов ПЛАВ продемонстрировали, что предложенная статистическая коррекция ансамблевых сезонных прогнозов гидродинамической модели ПЛАВ для региона Арктики позволила существенно улучшить качество прогнозов приземной температуры воздуха в этом регионе. В частности, показано устойчивое преимущество скорректированных месячных и сезонных прогнозов с различной заблаговременностью по показателям ACC, RO, RMSE для регионов Европы, Европейско-Атлантического сектора, Восточной Сибири, Канадского сектора, центральной Арктики с 1 месяца, для всех регионов со 2 по 4 месяца.

Значительное преимущество скорректированных сезонных прогнозов отмечено для всех регионов с нулевой и месячной заблаговременностью.

Таблица 1

**Результаты авторских испытаний технологии месячного и сезонного прогнозирования приземной температуры воздуха (INTP) по Арктическому региону в сравнении с прогнозами ПЛАВ (PLAV)**

Критерии оценки успешности	Прогноз	1-month	2-month	3-month	4-month	1 Season
ACC	PLAV	0.37	0.16	0.11	0.12	0.24
	INTP	0.67	0.61	0.64	0.60	0.59
$\rho$	PLAV	0.29	0.13	0.08	0.10	0.19
	INTP	0.49	0.43	0.47	0.45	0.42
MSSS	PLAV	0.01	0.02	0	0.03	0.05
	INTP	0.29	0.23	0.25	0.25	0.27
KS <sub>scaled</sub>	PLAV	0.60	0.54	0.53	0.55	0.55
	INTP	0.74	0.72	0.73	0.71	0.7

*Примечание.* PLAV – исходные прогнозы ПЛАВ; INTP – скорректированные прогнозы ПЛАВ по предложенному методу; 1-month - 1-й месяц прогноза с 0 заблаговременностью; 2-month - 2-й месяц прогноза с месячной заблаговременностью .....; 1 Season – сезонный прогноз с 0 заблаговременностью за период с 1 по 3 месяц.

Таблица 2

**Результаты независимых испытаний сезонных прогнозов приземной температуры воздуха (Коррект) по отдельным районам Арктики в сравнении с прогнозами ПЛАВ**

Сезон	Прогноз	Район							
		Atlantic	Europe	West.Sib.	East.Sib.	Chukotka	Alaska	Canada	C.Arctic
<b>Коэффициент корреляции аномалий (ACC)</b>									
Сезон 1	ПЛАВ	0.16	0.19	0.27	0.24	0.28	0.24	0.20	0.37
	Коррект	0.46	0.57	0.58	0.54	0.62	0.49	0.45	0.73
Сезон 2	ПЛАВ	0.17	0.05	0.02	0.11	-0.00	0.12	0.22	0.19
	Коррект	0.51	0.49	0.57	0.48	0.59	0.40	0.47	0.73

Оценка оправдываемости по знаку аномалии ( $\rho$ )									
Сезон 1	ПЛАВ	0.09	0.19	0.24	0.23	0.32	0.20	0.17	0.31
	Коррект	0.43	0.58	0.50	0.46	0.64	0.37	0.40	0.74
Сезон 2	ПЛАВ	0.06	0.10	0.06	0.09	0.03	0.15	0.19	0.15
	Коррект	0.49	0.46	0.49	0.38	0.60	0.33	0.43	0.75
Среднее квадратическое отклонение (RMSE)									
Сезон 1	ПЛАВ	1.62	2.49	3.24	2.98	2.57	2.20	1.91	2.61
	Коррект	1.42	2.03	2.64	2.45	1.90	1.84	1.66	1.76
Сезон 2	ПЛАВ	1.61	2.58	3.53	3.07	2.59	2.21	1.95	2.77
	Коррект	1.34	2.14	2.84	2.49	1.79	1.81	1.65	1.73

Для всех регионов статистическая коррекция улучшает результаты сезонного прогноза.

Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 23 декабря 2022 г. принято решение:

- одобрить работу ФГБУ «Гидрометцентр России» по разработке технологии месячного и сезонного прогнозирования приземной температуры воздуха по Арктическому региону на основе статистической интерпретации ансамблевых прогнозов ПЛАВ;

- внедрить технологию месячного и сезонного прогнозирования приземной температуры воздуха по Арктическому региону на основе статистической интерпретации ансамблевых прогнозов ПЛАВ в практику прогностической работы ФГБУ «Гидрометцентр России» и СЕАКЦ в качестве основной при составлении прогнозов приземной температуры воздуха на месяц и сезон для территории Арктики;

- продолжить работы по развитию данной технологии статистической коррекции с использованием ансамблевых сезонных прогнозов по модели Земной системы в рамках выполнения НИР по ВИП ГЗ.

На основании решения ЦМКП от 23 декабря 2022 г. разработанная в ФГБУ «Гидрометцентр России» технология месячного и сезонного прогнозирования приземной температуры воздуха по Арктическому региону на основе статистической интерпретации ансамблевых прогнозов ПЛАВ внедрена в качестве основной в отделе долгосрочных прогнозов погоды и обеспечения функций Северо-Евразийского климатического центра ФГБУ «Гидрометцентр России» при составлении прогнозов приземной температуры воздуха на месяц и сезон для территории Арктики.

Технология продемонстрировала высокую успешность прогнозов приземной температуры воздуха в этом регионе за счет процедуры статистической коррекции ансамблевых сезонных прогнозов гидродинамической модели ПЛАВ.

Внедрение технологии месячного и сезонного прогнозирования приземной температуры воздуха по Арктическому региону на основе статистической интерпретации ансамблевых прогнозов ПЛАВ позволит расширить спектр выпускаемой прогностической продукции в Северо-Евразийском климатическом центре в интересах потребителей.

### Список литературы

1. Вильфанд Р.М., Хан В.М. Некоторые аспекты прогнозирования климатической изменчивости в Арктическом регионе // Арктическое обозрение. – 2019. – № 5. – С. 30–40.

2. Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Тищенко В.А., Хан В.М. Выпуск долгосрочных метеорологических прогнозов по Арктическому региону в рамках деятельности Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) // Труды Гидрометцентра России. – 2016. – Вып. 361. – С. 7–28.

3. Тищенко В.А., Хан В.М., Толстых М.А., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Гельфан А.Н. Применение статистической коррекции для детерминистских месячных и сезонных прогнозов температуры воздуха и осадков по модели ПЛАВ для отдельных районов России // Труды Гидрометцентра России. – 2015. – Вып. 358. – С. 121–132.

## **МЕТОД ПРОГНОЗА УРОЖАЙНОСТИ СЕМЯН ПОДСОЛНЕЧНИКА ПО СУБЪЕКТАМ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ И РОССИИ В ЦЕЛОМ С ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ 3–3,5 МЕСЯЦА**

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва*

Метод прогноза урожайности семян подсолнечника разработан по наземным данным агрометеорологических и метеорологических наблюдений гидрометстанций Росгидромета, урожайность подсолнечника использовалась по данным Росстата в весе после доработки.

Большой спрос на семена подсолнечника внутри страны и на внешних рынках обуславливает необходимость своевременного планирования производства подсолнечника как для самообеспечения регионов, так и для экспортных целей. Разнообразие использования подсолнечника в пищевых целях, а также в промышленности, медицине требует более точного прогноза валовых сборов семян, определения наиболее целесообразной структуры их использования в погодных условиях конкретных лет. Этому способствует большая заблаговременность прогноза (3–3,5 месяца до начала уборки). Актуальность разработки метода обусловлена также необходимостью создания метода, адаптированного к значительно изменившимся в последние десятилетия агроклиматическим условиям и учитывающего внедрение новых сортов и гибридов подсолнечника с большим потенциалом продуктивности.

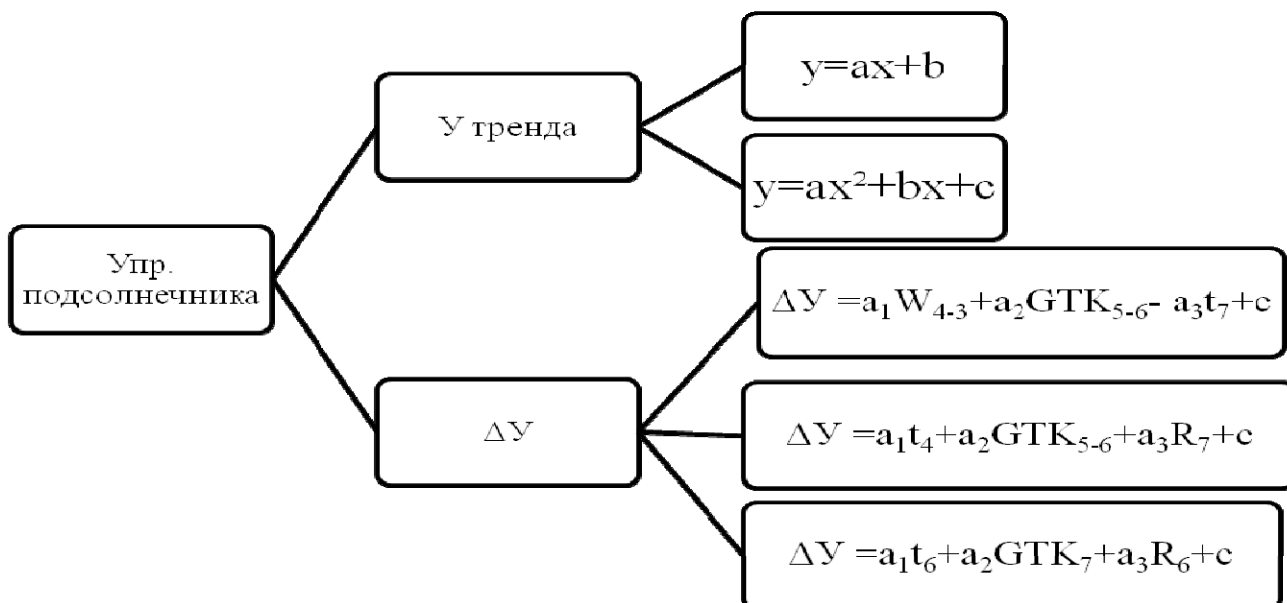
В [1] нами показано, что суммы среднесуточных значений температуры воздуха за период с температурой выше 10 °С почти повсеместно на европейской части России увеличились по сравнению с периодом 1966–1990 гг. на 150–250°С и более. Граница целесообразного возделывания подсолнечника, проходившая в 60–70-е гг. через Курск – Самару в начале 2000-х гг., значительно продвинулась к северу и проходит по южным районам Брянской, Орловской, Рязанской областей и далее по широте Казани, Бугульмы (Республика Татарстан), где появилась возможность возделывания подсолнечника не только скороспелых, но и высокопродуктивных раннеспелых сортов и гибридов,

вегетационный период которых длится 85–90 дней. В указанных субъектах, где ранее подсолнечник на семена практически не возделывался, посевные площади его составляют до 70–140 тыс. га и более. В связи с этим возникает необходимость разработки метода прогноза и для этих районов.

При разработке метода прогноза урожайности семян подсолнечника использован единый методический подход для составления прогнозов и оценок оправдываемости в субъектах Центрального, Приволжского, Южного и Северо-Кавказского федеральных округов, где производится до 93 % валового сбора семян подсолнечника. Анализ временных рядов урожайности за период 2001–2019 гг. показал резкий рост урожайности во всех субъектах этих округов, как и в России в целом (особенно в последние 10–12 лет), обусловленный значительным повышением культуры земледелия: массовым сортообновлением и применением инновационных технологий. Об этом свидетельствуют высокие (0,68–0,78) значения коэффициентов детерминации ( $R^2$ ) в уравнениях рассчитанных трендов.

В связи с этим при разработке метода прогностическая урожайность подсолнечника (Упр) рассматривалась как сумма двух прогнозов: (1) прогноза тенденции урожайности (тренда, Утр), описываемого нами полиномами первой и второй степени, и (2) прогноза аномалий урожайности (отклонений урожайности от тренда,  $\Delta Y$ ), зависящих от метеорологических и агрометеорологических факторов, в наибольшей степени влияющих на урожайность.

Потенциальные предикторы для разрабатываемых прогностических регрессионных моделей для расчета  $\Delta Y$  устанавливались на основе корреляционного анализа, проведенного для каждого субъекта. При этом использовались запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы, температура воздуха, количество осадков, дефицит влажности воздуха, гидротермический коэффициент увлажнения за основной период вегетации подсолнечника (апрель–июль) и по отдельным отрезкам этого периода. В связи с большим разнообразием агроклиматических и погодных условий в субъектах указанных выше округов, в разрабатываемые регрессионные модели для каждого субъекта гидрометеорологические факторы (параметры) входили в различных сочетаниях. Критерием отбора параметров являлось значение коэффициентов корреляции между урожайностью подсолнечника и исследуемыми факторами  $\geq 0,42$ . Схема прогноза урожайности семян подсолнечника по субъектам РФ показана на рисунке. На рисунке обозначено:  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  – коэффициенты регрессии;  $x$  – порядковый номер года;  $t$  – температура воздуха;  $R$  – количество осадков;  $GTK$  – гидротермический коэффициент увлажнения (за месяц или определенные периоды);  $W_{4-3}$  – запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы в третьей декаде апреля.



**Рисунок.** Схема прогноза урожайности семян подсолнечника по субъектам РФ.

Алгоритм автоматизированного расчета прогнозов в субъектах (инструкция) изложен в [3].

В агрометеорологическом обеспечении сельского хозяйства часто ставится задача рассчитать ожидаемую урожайность сельскохозяйственных культур (в нашем случае подсолнечника) по федеральному округу (округам) или России в целом. Задача разработки регрессионной модели для прогноза урожайности подсолнечника по округу решалась с использованием метода главных компонент. Подробно процедура расчетов с использованием этого метода изложена в [5–7]. Прогностическая регрессионная модель для расчета урожайности в целом по Российской Федерации (Урф), также с использованием метода главных компонент, разработана на основе использования урожайности по федеральным округам, выраженной в отклонениях урожайности от средней многолетней (за 2001–2019 гг.) по конкретным округам. Общий вид модели:

$$У_{п.рф} = a_0 \bar{У}_{рф} + a_1 Y_1 + a_2 Y_2 + a_3 Y_3 + a_4 Y_4 + a_5 Y_5,$$

где  $У_{п.рф}$  – ожидаемая урожайность подсолнечника (прогноз) в целом по Российской Федерации;  $\bar{У}_{рф}$  – средняя многолетняя урожайность по Российской Федерации ( $a_0$  – коэффициент);  $Y_{1-5}$  – значения урожайности по федеральным округам в отклонениях от среднего значения (1 – ЦФО, 2 – ПФО, 3 – ЮФО, 4 – СКФО, 5 – СФО);  $a_{1-5}$  – коэффициенты.

Необходимо отметить, что для расчета урожайности по Сибирскому федеральному округу использовалась урожайность по Алтайскому краю, где сосредоточены основные

площади возделывания подсолнечника (до 95–96 % от площади в целом по этому округу). Урожайность по округу практически индентична урожайности по Алтайскому краю. В других субъектах округа подсолнечник на семена практически не возделывается.

Разработанная нами регрессионная модель для прогнозов по Алтайскому краю аналогична моделям, приведенным на рисунке.

Авторские испытания разработанной модели, проведенные по независимым данным в Алтайском крае (за 2019, 2020, 2021 гг.), показали хорошую оправдываемость (88–91 %); оправдываемость инерционного и климатического метода за эти годы была ниже на 2–3 %.

Производственные испытания метода в субъектах европейской части России на независимых материалах за 2019, 2020 и 2021 гг. проводились в оперативных подразделениях УГМС Республики Татарстан, Башкирского, Приволжского, Северо-Кавказского, Крымского и Центрально-Черноземного УГМС, а также авторские испытания на зависимых (2001–2018 гг.) и независимых (2019–2021 гг.) материалах в Гидрометцентре России. Оценка качества (успешности) разработанного метода прогноза урожайности подсолнечника проводилась в соответствии с требованиями [2, 4]; основные результаты представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

**Оправдываемость (%) прогнозов урожайности семян подсолнечника в субъектах за период авторских испытаний по зависимым (2001–2018 гг.) и производственных испытаний по независимым (2019–2021 гг.) данным**

№	Субъект РФ	Оправдываемость, %			
		Испытываемый метод		Инерционный метод	Климатический метод
		I	II		
1	Белгородская область	90	92	86	90
2	Воронежская область	93	94	85	89
3	Курская область	91	93	87	89
4	Липецкая область	92	92	88	89
5	Орловская область	93	94	88	89
6	Тамбовская область	80	81	84	87
<b>Средняя по ЦФО</b>		<b>90</b>	<b>91</b>	<b>86</b>	<b>89</b>
1	Ставропольский край	84	90	80	86
2	Кабардино-Балкарская Республика	94	90	91	90
3	Карачаево-Черкесская Республика	80	86	78	83
<b>Средняя по СКФО</b>		<b>86</b>	<b>89</b>	<b>83</b>	<b>86</b>
1	Краснодарский край	92	89	80	92
2	Ростовская область	91	92	77	90
3	Волгоградская область	92	94	87	92
4	Республика Калмыкия	78	87	67	80
5	Республика Крым	81	79	55	82
<b>Средняя по ЮФО</b>		<b>87</b>	<b>88</b>	<b>73</b>	<b>87</b>

№	Субъект РФ	Оправдываемость, %			
		Испытываемый метод		Инерционный метод	Климатический метод
		I	II		
1	Саратовская область	89	93	87	90
2	Самарская область	89	90	87	91
3	Оренбургская область	90	91	87	90
4	Пензенская область	94	93	85	85
5	Ульяновская область	91	91	81	88
6	Республика Татарстан	93	95	92	88
7	Республика Башкортостан	93	94	89	89
<b>Средняя по ПФО</b>		<b>91</b>	<b>93</b>	<b>87</b>	<b>90</b>

Как следует из табл. 1, оправдываемость испытываемого метода для первого срока составления прогноза (I) в среднем по субъектам Центрального, Южного, Северо-Кавказского и Приволжского федеральных округов составила от 86 до 91 %, для второго срока (II) составления прогноза – от 88 до 93 %. Оправдываемость инерционного прогноза составила в Центральном, Северо-Кавказском и Приволжском федеральных округах 83–87 %, т. е. на 3–4 % ниже, чем по разработанному методу. При этом в республиках Крым и Калмыкия инерционный прогноз не оправдался (оправдываемость 55–67 %), а в среднем по Южному округу оправдываемость составила 73 %. Оправдываемость климатического прогноза составила в среднем 86–90 %, т. е. на 2–4 % ниже, чем по разработанному методу.

Относительные ошибки прогнозов по результатам производственных испытаний в оперативных подразделениях шести указанных выше УГМС на независимых данных за 2019–2021 гг. для первого и второго сроков прогнозов заметно различались (табл. 2).

Так, небольшие ошибки (от 1,9 до 13 %) в первый срок составления прогноза наблюдались в 42 годослучаях (или 67 %) от всех составленных в субъектах прогнозов за 2019–2021 гг.; в 21 годослучае (или 33 %) ошибки превышали 13 %, из них в 4 годослучаях составили от 21,3 до 25,1 %. Такие ошибки были в Республике Калмыкия (2020 г.), Республике Крым (2019, 2020 гг.) и Карачаево-Черкесской Республике (2020 г.). Основной причиной снижения оправдываемости был недоучет засушливых условий [5].

В прогнозах второго срока небольшие ошибки (от 0,8 до 13 %) наблюдались в 46 годослучаях, или 73 % от всех составленных (63) прогнозов, т. е. хороших прогнозов было больше, чем в прогнозах первого срока, а ошибки более 13 % составляли 27 % (т. е. на 6 % ниже, чем для первого срока прогноза). Причем большая ошибка (21,7 %) была только в одном годослучае (в 2019 г. в Республике Крым). Таким образом, можно констатировать, что успешность прогнозов второго срока составления оказалась несколько больше, чем для прогнозов первого срока составления.

**Результаты производственных испытаний  
метода прогноза урожайности семян подсолнечника по субъектам европейской части  
и России в целом с заблаговременностью 3–3,5 месяца**

Субъект федерации	Год испытания	Уфакт (ц/га)	I прогноз			II прогноз		
			Упрогн. (ц/га)	Ошибка отн. (%)	Опр-ть (%)	Упрогн. (ц/га)	Ошибка отн. (%)	Опр-ть (%)
<b>ЦФО</b>								
Белгородская область	2019	31,6	27,6	12,6	87,4	27,8	12,0	88,0
	2020	29,3	25,7	12,2	87,8	28,7	1,9	98,1
	2021	26,0	28,5	9,7	90,3	28,5	9,3	90,7
Воронежская область	2019	28,6	28,0	1,9	98,1	25,3	11,5	88,5
	2020	23,9	24,5	2,5	97,5	25,3	5,8	94,2
	2021	22,2	26,1	17,6	82,4	25,6	15,3	84,7
Курская область	2019	29,9	26,2	12,2	87,8	27,0	9,7	90,3
	2020	28,1	26,2	6,9	93,1	27,5	2,3	97,7
	2021	24,9	28,1	12,8	87,2	28,3	14,0	86,0
Липецкая область	2019	26,7	24,0	10,1	89,9	24,5	8,4	91,6
	2020	25,6	23,9	6,6	93,4	23,1	9,7	90,3
	2021	22,4	25,1	11,9	88,1	24,9	11,2	88,8
Орловская область	2019	27,0	25,7	4,9	95,1	27,4	1,4	98,6
	2020	27,6	25,0	9,5	90,5	26,3	4,6	95,4
	2021	25,0	27,3	9,3	90,7	27,3	9,2	90,8
Тамбовская область	2019	24,3	25,8	6,2	93,8	27,8	14,6	85,4
	2020	22,1	25,5	15,5	84,5	25,6	15,9	84,1
	2021	22,1	26,0	17,6	82,4	25,9	17,0	83,0
<b>СКФО</b>								
Ставропольский край	2019	17,0	19,5	14,8	85,2	18,0	5,7	94,3
	2020	12,8	15,3	19,5	80,5	13,6	6,2	94,8
	2021	18,9	20,6	9,2	90,8	20,4	8,1	91,9
Республика Кабардино-Балкария	2019	18,4	18,7	18,7	81,3	17,7	4,0	96,0
	2020	20,9	19,1	3,1	96,9	16,9	19,3	80,7
	2021	23,5	21,4	12,1	87,9	21,4	9,0	91,0
Республика Карачаево-Черкессия	2019	18,5	16,5	10,8	89,2	17,2	7,0	93,0
	2020	13,5	16,9	25,2	74,8	15,9	18,0	82,0
	2021	20,8	17,7	14,9	85,1	17,6	15,0	85,0
<b>ЮФО</b>								
Краснодарский край	2019	25,1	23,0	8,4	91,6	21,8	13,2	86,8
	2020	19,9	22,9	14,9	85,1	22,7	14,3	85,7
	2021	24,2	22,6	6,7	93,3	21,9	9,5	90,5
Ростовская область	2019	24,6	22,7	7,7	92,2	21,34	13,3	86,7
	2020	18,8	21,6	14,9	85,1	20,68	10,0	90,0
	2021	22,1	22,2	0,5	99,5	21,90	0,9	99,1
Волгоградская область	2019	17,9	15,0	16,5	83,5	15,6	12,9	87,1
	2020	15,3	15,7	2,4	97,6	15,1	1,5	98,5
	2021	15,0	16,0	7,0	93,0	15,6	4,0	96,0
Республика Калмыкия	2019	14,1	12,3	12,8	87,2	12,7	10,2	89,8
	2020	15,3	12,1	20,9	79,1	14,1	7,8	92,2
	2021	17,9	15,2	15,3	84,7	14,6	18,7	81,3
Республика Крым	2019	12,1	9,2	24,0	76,0	9,4	21,9	78,1
	2020	8,7	10,8	24,3	75,7	10,0	14,9	85,1
	2021	14,3	13,8	3,6	96,4	17,4	21,7	78,3

Субъект федерации	Год испытания	Уфакт (ц/га)	I прогноз			II прогноз		
			Упрогн. (ц/га)	Ошибка отн. (%)	Опр-ть (%)	Упрогн. (ц/га)	Ошибка отн. (%)	Опр-ть (%)
<b>ПФО</b>								
Саратовская область	2019	15,6	12,7	18,7	81,3	13,4	14,3	85,7
	2020	12,3	12,7	3,1	96,9	11,5	6,3	93,7
	2021	11,9	13,3	12,1	87,9	12,4	4,2	95,8
Самарская область	2019	16,7	13,8	17,5	82,5	13,8	17,3	82,7
	2020	13,1	13,5	2,7	97,3	13,6	4,0	96,0
	2021	13,6	14,5	6,8	93,2	13,9	2,4	97,6
Оренбургская область	2019	12,8	10,3	19,5	80,5	10,6	17,6	82,9
	2020	10,6	10,9	2,8	97,2	10,2	3,7	96,3
	2021	9,7	11,0	13,8	86,2	10,5	8,2	91,8
Пензенская область	2019	19	18,1	4,8	95,2	17,1	7,5	92,5
	2020	19,2	18,2	5,3	94,7	17,0	11,3	88,7
	2021	17,6	19,5	11,0	89,0	19,5	10,5	89,5
Ульяновская область	2019	16,3	14,1	13,8	86,2	14,1	13,7	86,3
	2020	12,8	14,0	9,0	91,0	14,0	9,5	90,5
	2021	14,5	15,5	7,2	92,8	15,6	7,3	92,7
Республика Татарстан	2019	15,3	12,9	15,6	84,4	14,1	7,8	92,2
	2020	14,3	12,8	10,5	89,5	13,0	9,2	90,8
	2021	14,2	13,0	8,8	91,2	13,0	8,4	91,6
Республика Башкортостан	2019	14,3	12,9	9,7	90,3	14,1	1,3	98,7
	2020	13,9	12,8	7,9	92,1	13,0	6,6	93,4
	2021	12,3	13,0	5,3	94,7	13,0	5,8	94,2
Российская Федерация	2019	18,3	18,2	0,5	100			
	2020	15,9	15,9	0,6	99,4			
	2021	16,2	16,2	1,3	98,8			

Экспериментальная проверка разработанного метода прогноза урожайности подсолнечника в целом для России проводилась в Гидрометцентре России по независимым материалам за 2019–2021 гг. Результаты ее (табл. 2) свидетельствуют о хорошей работоспособности метода, оправдываемость метода составила 99–100 %.

### Рекомендации о внедрении

При рассмотрении результатов испытания разработанного метода прогноза урожайности семян подсолнечника Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета рекомендует:

– внедрить метод прогноза урожайности семян подсолнечника по субъектам европейской части и России в целом с заблаговременностью 3–3,5 месяца в ФГБУ «Гидрометцентр России» в качестве основного метода;

– в соответствии с решениями Технических советов УГМС использовать метод для составления прогноза урожайности семян подсолнечника в качестве основного метода в

субъектах на территории деятельности Башкирского, Приволжского Крымского, Центрально-Черноземного УГМС, УГМС Республики Татарстан и Северо-Кавказского УГМС (Волгоградская, Ростовская области, Краснодарский, Ставропольский края, Кабардино-Балкарская Республика).

– в соответствии с решениями Технических советов УГМС использовать метод для составления прогноза урожайности семян подсолнечника в качестве вспомогательного метода в Карачаево-Черкесской Республике и Республике Калмыкия (Северо-Кавказское УГМС).

### Список литературы

1. Вильфанд Р.М., Страшная А.И., Береза О.В. О динамике агроклиматических показателей условий сева, зимовки и формирования урожая основных зерновых культур // Труды Гидрометцентра России. – 2016. – Вып. 360. – С. 45–78.

2. Инструкция по оценке оправдываемости агрометеорологических прогнозов. – М.: Гидрометеиздат, 1983. – 7 с.

3. Методические указания по составлению прогноза урожайности семян подсолнечника по субъектам европейской части России (проект). – М., 2020. – 29 с.

4. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиографических прогнозов. – М.: Гидрометеиздат, 1991. – С. 98–107.

5. Страшная А.И., Береза О.В., Кланг П.С. Агрометеорологические условия и прогнозирование урожайности семян подсолнечника в Центральном федеральном округе // Труды Гидрометцентра России. – 2019. – № 3 (373). – С. 121–138.

6. Страшная А.И., Береза О.В., Тищенко В.А. Влияние агрометеорологических условий на урожайность семян подсолнечника в Южном федеральном округе // Труды Гидрометцентра России. – 2017. – Вып. 364. – С. 203–219.

3. Страшная А.И., Богомолова Н.А., Тищенко В.А., Павлова К.И., Тебугев Х.Х. Агрометеорологические условия и прогнозирование урожайности семян подсолнечника в Приволжском федеральном округе // Труды Гидрометцентра России. – 2016. – Вып. 359. – С. 142–160.

8. Уланова Е.С., Страшная А.И. Засухи в России и их влияние на урожайность зерновых культур // Труды ВНИИСХМ. – 2000. – Вып. 33. – С. 64–83.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ  
МЕТОДОВ ПРОГНОЗА УРОЖАЙНОСТИ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ  
ПО АДМИНИСТРАТИВНЫМ РАЙОНАМ  
КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ**

*<sup>1</sup> Новосибирский Государственный Аграрный Университет, г. Новосибирск;*

*<sup>2</sup> Сибирский научно-исследовательский гидрометеорологический институт, г. Новосибирск;*

*<sup>3</sup> Гидрометцентр ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС», г. Новосибирск*

Метод прогноза урожайности яровой пшеницы по административным районам Кемеровской области разработан в рамках выполнения темы 1.1.7.1 Плана НИОКР Росгидромета на 2019 год.

Испытания методов проводились по 17 административным районам Кемеровской области, для каждого района разработано по 4 модели, позволяющих прогнозировать урожайность яровой пшеницы на сроки 23 июня и 23 июля. Агрометеорологические параметры выбирались из материалов наблюдений гидрометеорологических станций.

Как известно, у каждой сельскохозяйственной культуры свои требования к условиям среды, причем эти требования не остаются постоянными на протяжении всего вегетационного цикла, а меняются в зависимости от фаз развития. Авторами исследовалось влияние температуры воздуха, осадков, дефицита влажности воздуха на урожайность яровой пшеницы в административных районах Кемеровской области. Широко использованы комплексные показатели тепло- и влагообеспеченности: коэффициенты увлажнения по Н.В. Гулиновой, Д.А. Бринкену и С.А. Сапожниковой, а также гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова и т. д. [1, 2].

Наиболее значимые показатели были включены в физико-статистические модели для расчета урожайности яровой пшеницы по административным районам Кемеровской области. Разработка методов выполнялась с ориентацией на принятые в Росгидромете оперативные сроки составления прогноза урожайности яровой пшеницы (предварительного – 21–23 июня, 21–23 июля – уточненного) и соответствующие критерии оправдываемости [2].

Для выполнения расчетов был разработан пакет программ для персонального компьютера и материалы информационного обеспечения: программа расчета прогноза урожайности яровой пшеницы по административным районам Кемеровской области и программа оценки прогноза.

Авторские испытания метода прогноза урожайности проводились на независимом материале 2015–2017 гг., производственные испытания – в 2018–2021 гг. в отделе агрометеорологических прогнозов Гидрометцентра.

Оценка успешности методов прогноза урожайности яровой пшеницы проводилась согласно Методическим указаниям [3]. Ввиду отсутствия разработанных методов прогноза среднерайонной урожайности яровой пшеницы, сравнительная оценка успешности испытываемых методов осуществлялась с инерционным и климатологическим прогнозами.

С целью получения более достоверных выводов об испытываемых методах были проанализированы результаты оправдываемости прогнозов за период авторских (2015–2017 гг.) и оперативных (2018–2021 гг.) испытаний. Было проверено по две физико-статистические модели на два срока: 21–23 июня и 21–23 июля.

### **Результаты испытаний методов по административным районам Кемеровской области**

87

По результатам авторской проверки (2015–2017 гг.) методические прогнозы урожайности яровой пшеницы по административным районам Кемеровской области по всем моделям в течение трех лет обеспечили хороший результат – средняя оправдываемость по величине относительной ошибки составила 86,4–97,6 % (табл. 1 и 2). Авторские испытания выявили явное преимущество разработанного метода. Так, за период авторских испытаний 96 % всех составленных методических прогнозов оправдались. Оправдываемость метода составила 100 %, лишь в Яшкинском районе из 3 составленных удачными были 2, оправдываемость метода 67 %.

В годы производственных испытаний (2018–2021 гг.) методические прогнозы урожайности яровой пшеницы по административным районам Кемеровской области по всем моделям оправдались хуже, средняя их оправдываемость по величине относительной ошибки составила 80 %. По большинству районов оправдываемость в годы производственных испытаний как предварительных, так и уточненных прогнозов оказалась ниже, чем в годы авторских испытаний, на 3–18 %, а по Тяжинскому, Яшкинскому, Ижморскому, Юргинскому, Кемеровскому, Крапивинскому, Гурьевскому, Прокопьевскому и Новокузнецкому районам – на 20–42 %.

**Оправдываемость прогнозов урожайности яровой пшеницы по административным районам Кемеровской области, предварительный прогноз (по величине относительной ошибки)**

Район	№ модели	Методические прогнозы, оправдываемость, %			Инерционный	Климатологический
		Авторские испытания 2015-2017 гг.	Производственные испытания 2018-2021 гг.	Средняя оправдываемость (%) 2015-2021гг.		
Мариинский	1	97,6	87,2	91,6	89,7	81,1
	2	96,5	87,9	91,6	89,7	81,1
Тяжинский	1	94,2	65,7	74,8	79,6	71
	2	96,4	63,2	77,4	79,6	71
Тисульский	1	92,2	78,3	86,3	82,1	82,1
	2	90,3	73,4	80,6	82,1	82,1
Яшкинский	1	86,3	58,1	70,2	70,6	47
	2	87,8	56,6	70	70,6	47
Яйский	1	91,3	91,4	91,4	92,7	88,3
	2	89,1	89,6	89,4	92,7	88,3
Ижморский	1	91,3	68	78	78	69,9
	2	90,7	66,5	76,9	78	69,9
Чебулинский	1	94	78,8	85,3	84,3	69
	2	83,7	77,7	80,2	84,3	69
Юргинский	1	90,4	66,8	76,9	88,5	79
	2	91,6	67,4	77,8	88,5	79
Топкинский	1	95,6	85,5	89,8	94,2	85,4
	2	96	81,6	88	94,2	85,4
Кемеровский	1	91,8	69,1	79,9	89,9	78,7
	2	88,3	69,2	79,1	89,9	78,7
Крапивинский	1	95,4	67,5	79,5	85,6	79,6
	2	94,5	72,5	82	85,6	79,6
Промышленный	1	89,8	79,9	84,2	84,1	77,6
	2	90,2	82	85,5	84,1	77,6
Ленинск-Кузнецкий	1	83	81,4	82,1	82,5	75,8
	2	86	80	82,6	82,5	75,8
Гурьевский	1	84,5	60,7	70,9	74,5	60,6
	2	86,1	63,8	73,4	74,5	60,6
Беловский	1	86,3	69,2	76,5	79,6	77,4
	2	86,1	68,6	76,2	79,6	77,4
Прокопьевский	1	88,2	67,2	76,2	87,2	75,7
	2	90,6	68,5	78	87,2	75,7
Новокузнецкий	1	90,4	75,6	82	82,8	77,4
	2	94,2	70,3	81,6	82,8	77,4

**Оправдываемость прогнозов урожайности яровой пшеницы по административным  
районам Кемеровской области, уточненный прогноз  
(по величине относительной ошибки)**

Район	№ модели	Методические прогнозы, оправдываемость, %			Инерционный	Климатологический
		Авторские испытания 2015-2017 гг.	Производственные испытания 2018-2021 гг.	Средняя оправдываемость (%) 2015-2021гг.		
Мариинский	3	95	86,7	90,3	89,7	81,1
	4	95,8	87,5	91,1	89,7	81,1
Тяжинский	3	94,7	65,7	78,1	79,6	71
	4	94,6	61,8	76,9	79,6	71
Тисульский	3	89,6	72,8	80,1	82,1	82,1
	4	91,5	72,1	80,5	82,1	82,1
Яшкинский	3	88,7	49,8	65,9	70,6	47
	4	90	47,6	65,8	70,6	47
Яйский	3	85,6	85,5	85,5	92,7	88,3
	4	88,4	88,8	88,7	92,7	88,3
Ижморский	3	91,3	67,7	77,8	78	69,9
	4	87,7	64,7	74,6	78	69,9
Чебулинский	3	92,7	78,6	84,6	84,3	69
	4	82,8	75,2	78,5	84,3	69
Юргинский	3	92,9	71	80,4	88,5	79
	4	93,3	72,9	81,6	88,5	79
Топкинский	3	91,9	88,6	88,6	94,2	85,4
	4	92,7	87,3	89,6	94,2	85,4
Кемеровский	3	91,7	71,2	80	89,9	78,7
	4	91,4	70,1	79,3	89,9	78,7
Крапивинский	3	97,6	67,8	80,6	85,6	79,6
	4	97,4	69,7	81,6	85,6	79,6
Промышленный	3	88,4	81	84,2	84,1	77,6
	4	87,4	81,3	83,9	84,1	77,6
Ленинск-Кузнецкий	3	84,9	91,9	88,9	82,5	75,8
	4	81	76,1	78,2	82,5	75,8
Гурьевский	3	83,9	60,6	70,6	74,5	60,6
	4	85,7	64,3	73,4	74,5	60,6
Беловский	3	88,9	68,8	77,4	79,6	77,4
	4	86,4	70	77,1	79,6	77,4
Прокопьевский	3	92,3	63,2	75,7	87,2	75,7
	4	91	70	79,1	87,2	75,7
Новокузнецкий	3	90,6	69,7	78,6	82,8	77,4
	4	90,6	70	78,8	82,8	77,4

Неудачными были методические прогнозы, составленные в 2020-2021 гг., а также в 2019 г. в Беловском, Прокопьевском, Юргинском, Чебулинском, Кемеровском (модели 1, 2), Тяжинском (модель 4), Новокузнецком (модель 3) районах и в 2018 г. в Ижморском, Гурьевском (модель 4), Тисульском (модели 3, 4) районах. Прогнозируемая урожайность оказалась меньше фактической на 3,6–15,9 ц/га. Лишь в Яйском и Ленинск-Кузнецком (модель 3) районах успешность составленных прогнозов по новому методу была на уровне оправдываемости прогнозов в годы авторских испытаний.

За 7 лет испытаний, включая годы авторской и оперативной проверки, по величине относительной ошибки оправдываемость прогнозов, составленных по новому методу, в Мариинском, Тисульском, Яйском, Топкинском, Промышленновском, Чебулинском (модели 1–3), Юргинском (модели 3,4), Крапивинском (модели 2–4), Ленинск-Кузнецком (модели 1–3) и Новокузнецком (модели 1, 2) районах оказалось в пределах принятого порога успешности агрометеорологических прогнозов и составляла 80,1–91,6 %, что выше оправдываемости климатологических и на уровне и несколько выше качества инерционных прогнозов (в Яйском, Топкинском, Крапивинском и Новокузнецком районах ниже успешности инерционных прогнозов на 2–6 %). Однако следует заметить, что лишь в Мариинском, Яйском, Топкинском, Промышленновском (модели 2–4) и Ленинск-Кузнецком (модели 1-3) районах в годы производственных испытаний оправдываемость методических прогнозов была выше 80 % (общепринятого порога успешности) (см. табл. 1 и 2).

Оценка оправдываемости составленных прогнозов по новому методу в годы производственных испытаний (2018–2021 гг.) (по величине допустимой погрешности ( $\Delta\sigma$ ) согласно Методических указаний [3]) позволила выявить число оправдавшихся методических, инерционных и климатологических прогнозов. Лишь по четырем районам области из 4 составленных методических прогнозов оправдались 3: в Яйском районе удачными были прогнозы по моделям 1, 2 и 4, в Топкинском – по моделям 1 и 2, по модели 4 все прогнозы успешные, Промышленновском районе хорошо сработала модель 2 и в Ленинск-Кузнецком – модели 1–3. Оправдываемость метода по перечисленным моделям составила 75 %, в Топкинском районе (модель 4) – 100 %, что, в основном, на уровне оправдываемости инерционных и климатологических прогнозов, в Топкинском (модели 1, 2), Промышленновском и Ленинск-Кузнецком (модель 3) районах – выше оправдываемости климатологических прогнозов на 25–50 %, в Топкинском районе (модель 4) методические прогнозы успешнее инерционных и климатологических прогнозов на 25–75 %.

Плохо сработали модели по Яшкинскому району (ни один прогноз, составленный по новому методу в годы оперативной проверки, не оправдался, оправдываемость метода – 0 %). По Кемеровскому (модели 3, 4), Гурьевскому (модели 1, 4) районам также нулевая

оправдываемость. По Тисульскому (модели 3, 4), Ижморскому (модели 2–4), Чебулинскому, Юргинскому, Беловскому, Прокопьевскому (все модели), Кемеровскому (модели 1,2), Гурьевскому (модель 4), Тяжинскому (модель 4) и Новокузнецкому (модель 3) районам оправдался лишь 1 прогноз из 4 составленных, оправдываемость метода составила лишь 25 %, что значительно ниже или на уровне успешности инерционных и климатологических прогнозов.

По остальным моделям по Мариинскому, Крапивинскому (модели 1–4), Тисульскому (модели 1–2), Тяжинскому (модели 1–3), Яйскому(модель 3), Ижморскому (модель 1), Топкинскому (модель 3), Промышленновскому (модели 1, 3, 4), Ленинск-Кузнецкому (модель 4), Гурьевскому (модель 2), Новокузнецкому (модели 1, 2, 4) административным районам оправдались 2 прогноза по новому методу (оправдываемость метода 50 %, что либо ниже успешности инерционных и климатологических прогнозов, либо на уровне). Неудачными, в основном, были прогнозы, составленные в 2020 и 2021 годах.

В период оперативных испытаний качество прогнозов снизилось в связи со значительным ростом урожайности, что объясняется модернизацией аграрной отрасли в сторону устойчивости, использованием новых методов обработки почвы, улучшением качества семенного материала, вхождением в Агрохолдинги и внедрением химизации и цифровых технологий.

Решением Технического Совета ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» от 07 июня 2022 г., одобренным решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 9.06.2022 г., автоматизированная технология прогноза урожайности яровой пшеницы по административным районам Кемеровской области с 20 июня 2022 года рекомендована к внедрению в оперативную практику специалистов-агрометеорологов Кемеровского ЦГМС – филиала ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» в качестве основного расчетного метода на сроки 21–23 июня и 21–23 июля для районов: Яйского (модели 1, 4), Топкинского (модели 1, 4), Промышленновского (модель 2), Ленинск-Кузнецкого (модели 2, 3), а также Мариинского (модели 1, 4) и Промышленновского (модель 4) районов, поскольку оправдываемость методических прогнозов (по величине относительной ошибки) в годы производственных испытаний была выше 80 % (общепринятого порога успешности). Для Тяжинского (модели 1, 3), Крапивинского (модели 2, 4), Новокузнецкого (модели 2, 4), Ижморского, Гурьевского и Тисульского (модель 1) районов – в качестве консультативного.

Метод прогнозирования урожайности яровой пшеницы по остальным районам области (Яшкинский, Чебулинский, Юргинский, Кемеровский, Беловский, Прокопьевский) оставить без внедрения в связи с низкой оправдываемостью в период оперативных испытаний.

**К достоинствам нового метода следует отнести:**

1. Позволяет прогнозировать урожайность яровой пшеницы в амбарном весе.
2. Для выполнения расчетов была создана и запущена полностью автоматизированная технология составления прогнозов и расчетов оценок, включая выборку данных из базы данных АСОАМИ и электронной версии ТСХ-1 в Кемеровском ЦГМС.

**Список литературы**

1. Кононенко С.М., Старостина Т.В. Спутниковые данные в прогнозе урожайности пшеницы для административных районов Сибири // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. научн. конгр.: Междунар. научн. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология»: сб. материалов в двух томах (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск: СГУГиТ, 2018. – Том 1. С. 94–101.
2. Старостина Т.В., Пищимко О.И., Пищимко В.В. Автоматизированная технология прогноза урожайности яровой пшеницы по административным районам Кемеровской области // Труды СибНИГМИ. – 2021. – Вып. 107. – С 92–99.
3. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 150 с.

## **МЕТОДИКА МОНИТОРИНГА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СОЛНЕЧНОГО СИЯНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ**

*Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных, Калужская обл. г. Обнинск*

### **Введение**

Продолжительность солнечного сияния (ПСС) наряду с температурой воздуха и атмосферными осадками относится к основным характеристикам приземного климата. Свидетельством важности этого метеорологического элемента является, в частности, включение ПСС в систему климатического мониторинга ВМО, в рамках которого осуществляется выпуск регионального бюллетеня для Европы и Среднего Востока [10].

Создание в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» базы данных «Суммарная за месяц продолжительность солнечного сияния на станциях России» [2] и доступность оперативных сводок «КЛИМАТ», содержащих информацию о ПСС за прошедший месяц, позволили приступить к мониторингу этого параметра на территории Российской Федерации по аналогии с температурой воздуха и атмосферными осадками [4]. Результаты анализа данных о ПСС помещаются на сайте ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» [3] и опубликованы [5–8].

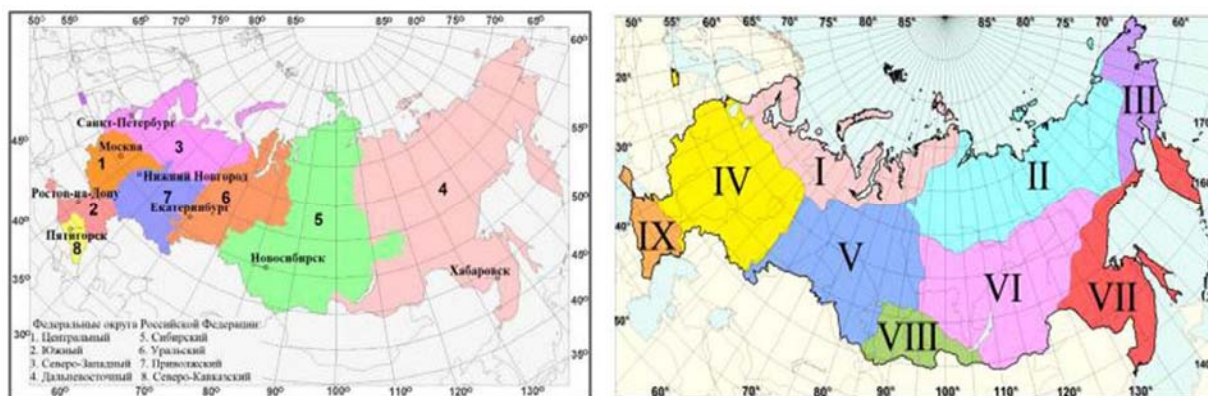
Методика мониторинга ПСС была разработана в рамках НИР 1.3.1.1. «Мониторинг глобального климата и климата Российской Федерации и ее регионов, включая Арктику. Развитие и модернизация технологий мониторинга» Плана НИР и ОКР Росгидромета на 2020–2024 гг. и предназначена для получения материалов, помещаемых в годовой Доклад Росгидромета [9].

Основное содержание раздела годового Доклада Росгидромета и бюллетеня ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» с оценками мониторинга ПСС составляют данные о климатических аномалиях истекшего года и обновленные (с учетом этих данных) оценки современных тенденций в изменениях режима ПСС на территории Российской Федерации. Оценки рассчитываются по данным метеорологических станций, которые ежемесячно в оперативном

режиме передают сводки КЛИМАТ и для которых имеются «нормы» (средние многолетние значения).

Полученные по данным метеорологических станций оценки приводятся в виде карт для территории России, а также в виде региональных средних. Осреднение проводится для всей территории Российской Федерации, по ее европейской (ЕЧР) и азиатской (АЧР) частям, восьми федеральным округам и девяти квазиоднородным физико-географическим районам (рис. 1).

Квазиоднородные климатические регионы выбраны на основании классификации Б.П. Алисова [1] и используются в отделе климатологии ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» при мониторинге различных характеристик приземного климата (температура воздуха, атмосферные осадки, снежный покров и др.).



**Рис. 1.** Федеральные округа (слева) и квазиоднородные климатические регионы (справа):  
I – Север ЕЧР и Западной Сибири, II – Северная часть Восточной Сибири и Якутии,  
III – Чукотка и север Камчатки, IV – Центр ЕЧР, V - Центр и юг Западной Сибири,  
VI – Центр и юг Восточной Сибири, VII – Дальний Восток, VIII – Алтай и Саяны,  
IX – Юг ЕЧР.

Временные ряды для региональных средних приводятся за период наблюдений с 1961 года. Они дополняются скользящими 11-летними средними и линейным трендом, характеризующим тенденцию (среднюю скорость) изменений рассматриваемой величины на заданном отрезке времени. Тренд рассчитывается методом наименьших квадратов и выражен в часах или процентах за десятилетие (ч/10лет, %/10лет). На рисунках он представлен для периода с 1976 года, условно принятого за начало современного глобального потепления.

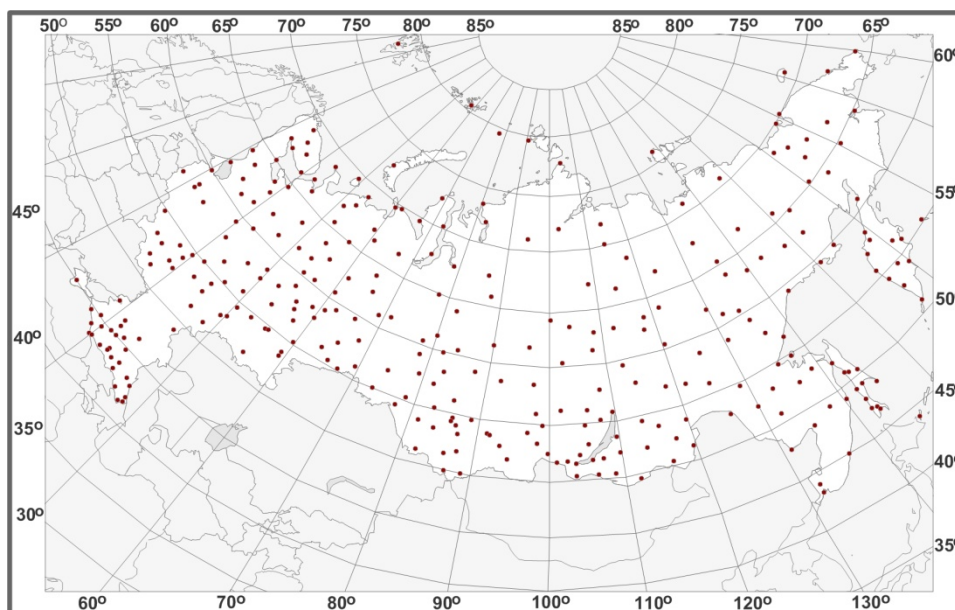
### **Информационная база**

Для мониторинга изменений климата необходимы как исторические ряды данных, так и оперативная информация. Архив исторических данных по продолжительности солнечного сияния сформирован в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» в рамках НИР, выполнявшихся в период с

2010 года. Источниками для создания массива в период с начала наблюдений по 1983 год послужили печатные издания. Начиная с 1984 года для пополнения архива используются данные на технических носителях Госфонда (ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»). Кроме самих значений месячных сумм ПСС, записи с 1984 г. содержат признаки качества.

Данные месячных сумм ПСС поступают в Госфонд в потоке режимной метеорологической информации из УГМС Росгидромета, где подвергаются комплексному контролю. Значения, не прошедшие контроль, получают признак качества «б» и заменяются константой отсутствия.

На основе массива режимной информации сформирован файл данных для мониторинга ПСС, который в настоящее время включает данные 315 станций сети Росгидромета, присылающих ежемесячно в оперативном режиме по каналам связи сводки КЛИМАТ с данными месячных сумм ПСС начиная с 1961 г., когда с увеличением числа станций существенно улучшилась территориальная освещенность данными. Основные сведения о станциях представлены в каталоге станций. На рис. 2 показано пространственное распределение станций, входящих в массив данных для мониторинга ПСС на территории Российской Федерации.



**Рис. 2.** Расположение метеорологических станций сети Росгидромета из массива данных для мониторинга ПСС.

### **Краткое описание технологии мониторинга**

Рассматриваемая технология предназначена для осуществления мониторинга климата и его изменений применительно к одной компоненте приземного климата – продолжительности солнечного сияния. В соответствии с поставленными задачами

технология должна, во-первых, обеспечить регулярное слежение за текущим состоянием ПСС на территории Российской Федерации, оценку степени его аномальности и выявление наиболее ярких климатических экстремумов, а во-вторых, регулярное обновление оценок климатических трендов, характеризующих современные тенденции происходящих изменений климата.

Технология мониторинга ПСС включает следующие основные этапы:

- усвоение оперативных данных и их сопряжение с историческими рядами;
- расчет характеристик мониторинга ПСС для территории Российской Федерации;
- расчет характеристик мониторинга по регионально осредненным временным рядам ПСС;
- подготовка выходных материалов.

Для функционирования технологии выделена папка *MSS*, в которой содержатся все необходимые технические средства, входные данные, результаты расчетов и выходные материалы мониторинга. Поскольку с переходом к новому календарному году входная информация практически не меняется, технологический цикл ограничен одним годом. В частности, для практического осуществления мониторинга в 2021 г. была создана папка *MSS21*, которая включает вложенную папку общего назначения *CAT* с каталогами станций, необходимыми для процедур осреднения, графического отображения результатов на картах и др.

Вычислительные работы для получения материалов мониторинга сгруппированы в четыре блока. Результаты работы каждого блока заносятся в одноименную папку. Все расчеты проводятся с использованием системы статистического анализа *SAS*.

Назначение **блока 1 (BDAT)** – подготовка данных для проведения расчетов. В рамках этого блока решаются следующие задачи: рассчитываются нормы суммарной за месяц/сезон/год ПСС (средние значения за 30-летний период, которые обновляются один раз в 10 лет) и многолетние статистики за период с 1961 г. (средние значения, стандартные отклонения, минимальные и максимальные значения), которые используются для создания файла параметров контроля; формируется порция данных за прошедший год, при этом используется доступная режимная информация, а для недостающих месяцев – информация из сводок КЛИМАТ; проводится ее статистический контроль и обновление (продление) базового массива мониторинга.

Осуществляется расчет аномалий: для каждой станции рассчитываются аномалии месячных сумм ПСС – отклонения от норм, средних многолетних значений за базовый 30-летний период. В настоящее время – это период 1981–2010 гг. (с 2022 г. будет период 1991–2020 гг.). Сезонные аномалии получаются суммированием месячных аномалий, если

присутствуют данные не менее чем за два месяца, а годовые (январь-декабрь) – при наличии данных не менее чем за 10 месяцев. Значения суммарной за сезон/год продолжительности солнечного сияния на станциях ( $SS$ , часы) восстанавливаются с использованием соответствующих норм и используются для расчета относительных аномалий ( $RS$ , %) – отношение к норме, выраженное в процентах. Расчет дополнительных характеристик аномалий (процентили, вероятности превышения, ранги) осуществляется по данным за период с 1961 г. по прошедший год.

Назначение **блока 2 (ВМАР)** – расчет статистических характеристик полей аномалий ПСС и подготовка данных для их представления в графическом виде. В данной технологии построение карт осуществляется с помощью графического пакета *SURFER*. При построении карт проводится визуальный пространственный анализ сомнительных значений, полученных на этапе статистического контроля. В результате подготавливается файл исправлений и проводится корректировка исходных данных (забракованные значения заменяются константой отсутствия). Для всех станций рассчитываются границы 5 и 95-го процентилей ПСС и формируются списки станций, попадающих в 5%-ные месячные и сезонные экстремумы (для нанесения на карты месячных и сезонных аномалий). Осуществляется расчет характеристик тренда сезонных сумм ПСС на станциях, где присутствуют данные за прошедший год. Рассчитываются угловые коэффициенты линейного тренда  $b$  (в расчете на 10 лет) за период с 1976 г., определяется их статистическая значимость  $z$  и вклад тренда в суммарную дисперсию ряда  $D$ . Формируются списки станций со значимым на 5%-ном уровне трендом.

Назначение **блока 3 (EREG)** – получение рядов пространственно осредненных аномалий ПСС и расчет их статистических параметров. Ввиду географической неоднородности в распределении климатических переменных и при наличии пропусков во временных рядах наблюдений пространственное осреднение рекомендуется выполнять по данным об аномалиях метеоэлемента. В действующей технологии осреднение проводится в два этапа. Первоначально территория региона покрывается регулярной сеткой ( $1^\circ$  широты  $\times$   $2^\circ$  долготы) и в каждой ячейке сетки рассчитывается среднее арифметическое из попавших в эту ячейку станционных аномалий. Затем выполняется осреднение с весами, пропорциональными площади ячеек.

Месячные и сезонные нормы ПСС для регионов рассчитываются по нормам для станций (также один раз в десятилетие). Средние региональные значения ПСС получают суммированием регионально осредненных норм и регионально осредненных аномалий, а относительные аномалии – делением текущего значения региональной средней ПСС на региональную норму. Рассчитываются статистические оценки, характеризующие аномалии

регионов в прошедшем году (вероятности неперевышения, ранги в возрастающем и убывающем ряду), определяются регионы, в которых месячная/ сезонная ПСС попала в 5 и 95-й процентиля. Рассчитываются характеристики линейного тренда абсолютных и относительных аномалий для регионов ( $b$ ,  $z$ ,  $D$ ). Формируются ряды для построения графиков многолетних изменений сезонных/годовых аномалий ПСС в регионах, проводится их сглаживание путем 11-летнего скользящего осреднения.

Программы **блока 4 (FTAB)** обеспечивают формирование данных для таблиц.

### **Подготовка выходных материалов**

В состав выходных материалов мониторинга продолжительности солнечного сияния входит иллюстративный материал (таблицы, карты, графики) и подготовленный на его основе текст, содержащий анализ текущих климатических аномалий и наблюдаемых изменений в режиме ПСС.

Построение карт осуществляется с помощью графического пакета *SURFER*, построение графиков многолетних рядов и получение линии тренда – в *EXCEL*, подготовка сложных рисунков – с помощью *Adobe Photoshop*.

### **Результаты использования методики**

98

Начиная с 2019 года один из разделов годового Доклада Росгидромета об особенностях климата на территории Российской Федерации посвящен анализу режима солнечного сияния.

#### ***Состав материалов раздела «Продолжительность солнечного сияния» годового Доклада Росгидромета об особенностях климата на территории Российской Федерации***

В разделе «Продолжительность солнечного сияния» помещаются результаты анализа данных о ПСС на территории Российской Федерации и ее регионов в прошедшем году в сравнении с многолетними нормами и ранее наблюдавшимися экстремумами (подраздел 1), а также приводятся регулярно обновляемые оценки современных тенденций изменений режима ПСС: географическое распределение станционных оценок трендов и таблицы региональных трендов, а также временные ряды регионально осредненных аномалий ПСС (подраздел 2).

Содержание подразделов приводится ниже в виде перечня получаемых таблиц и рисунков, а также некоторых примеров для 2021 года.

## **Подраздел 1. Продолжительность солнечного сияния на территории России**

Таблицы подраздела 1:

- относительные аномалии суммарной за год и сезоны продолжительности солнечного сияния в регионах России и вероятность ее непревышения;
- относительные аномалии суммарной за месяц продолжительности солнечного сияния, осредненной по регионам России.

Рисунки подраздела 1:

- пространственное распределение суммарной за год продолжительности солнечного сияния и ее относительных аномалий на территории Российской Федерации;
- пространственное распределение относительных аномалий сезонной продолжительности солнечного сияния на территории Российской Федерации;
- пространственное распределение относительных аномалий продолжительности солнечного сияния на территории Российской Федерации в декабре;
- относительные аномалии суммарной за месяц продолжительности солнечного сияния, осредненной по территории Российской Федерации, ее европейской и азиатской частей.

В качестве иллюстрации приведем оценки аномалий сезонных сумм ПСС для регионов Российской Федерации в 2021 г. (табл. 1) и карту, где представлено географическое распределение относительных аномалий сезонной продолжительности солнечного сияния на территории Российской Федерации (рис. 3). Годовой ход регионально осредненных аномалий ПСС (для Российской Федерации в целом и ее европейской и азиатской частей) показан на рис. 4.

99

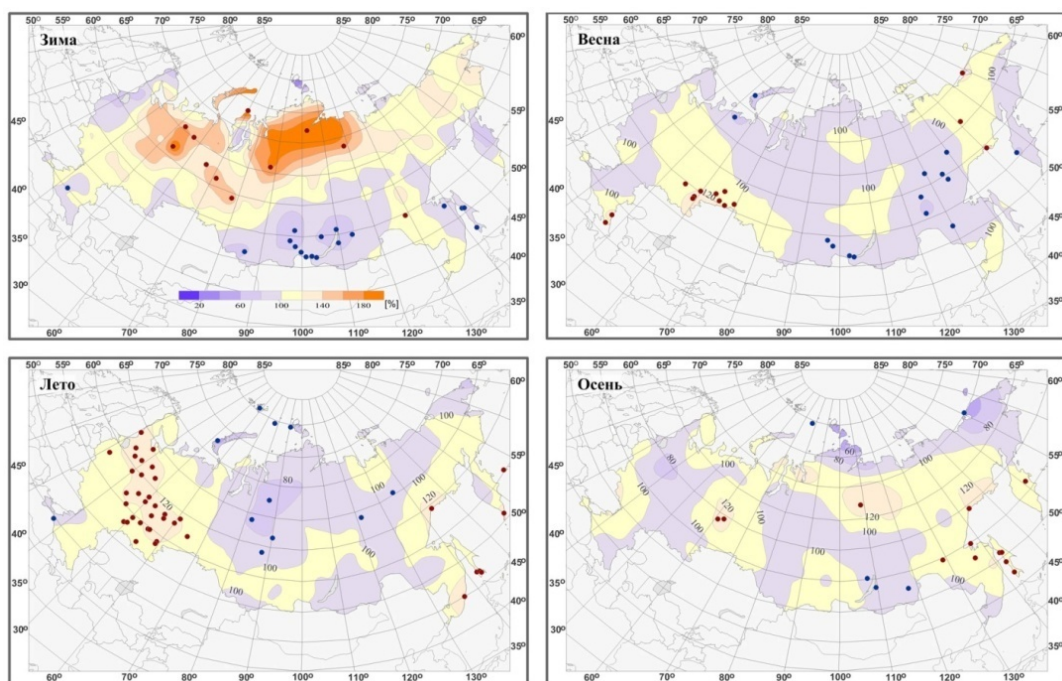
Таблица 1

### **Относительные аномалии суммарной за год и сезоны продолжительности солнечного сияния ( $RS$ , %) в регионах России и вероятность ее непревышения ( $P$ , %) в 2021 г.**

(желтым цветом выделены значения, попавшие в пять максимальных, серым – в пять минимальных)

Регион	Год		Зима		Весна		Лето		Осень	
	$RS$	$P$	$RS$	$P$	$RS$	$P$	$RS$	$P$	$RS$	$P$
Российская Федерация	102	72	100	45	99	43	105	98	102	58
ЕЧР	106	85	109	72	102	70	112	98	99	43
АЧР	99	33	97	27	98	27	100	53	103	62
<i>Физико-географические регионы Российской Федерации</i>										
Север ЕЧР и Западной Сибири	101	53	123	78	92	20	104	60	104	62
Север Восточной Сибири и Якутии	103	72	126	85	104	70	98	37	108	70
Чукотка и север Камчатки	96	40	115	78	94	30	98	48	89	25
Центр ЕЧР	109	92	115	77	105	82	116	100	97	47
Центр и юг Западной Сибири	102	72	114	77	103	65	99	52	102	50
Центр и юг Восточной Сибири	95	7	89	15	95	15	96	18	96	23

Дальний Восток	102	70	96	30	95	15	108	95	109	95
Алтай и Саяны	97	18	88	8	94	15	101	48	102	62
Юг ЕЧР	102	57	99	50	103	55	104	60	101	42
<i>Федеральные округа Российской Федерации</i>										
Центральный	103	72	110	60	98	45	109	87	103	57
Южный	99	38	103	55	96	38	100	42	104	63
Северо-Западный	107	85	120	80	98	40	114	92	98	35
Дальневосточный	99	22	95	25	96	10	100	55	104	77
Сибирский	98	23	94	32	98	43	98	33	98	38
Уральский	107	92	115	73	106	85	106	82	110	75
Приволжский	109	95	120	80	105	82	117	98	96	45
Северо-Кавказский	105	78	96	37	111	88	109	87	95	23



**Рис. 3.** Пространственное распределение относительных аномалий сезонной продолжительности солнечного сияния на территории Российской Федерации в 2021 г.

*Кружками синего цвета показано местоположение станций с экстремумами ниже 5-го перцентиля, коричневого цвета – выше 95-го перцентиля.*



**Рис. 4.** Относительные аномалии суммарной за месяц продолжительности солнечного сияния, осредненной по территории Российской Федерации, ее европейской и азиатской частей в 2021 г.

## Подраздел 2. Тенденции современных изменений продолжительности солнечного сияния на территории России

Таблицы подраздела 2:

- оценки линейного тренда относительных аномалий продолжительности солнечного сияния, осредненной по регионам России;
- оценки линейного тренда аномалий годовой и сезонной продолжительности солнечного сияния, осредненной по территории Российской Федерации, ее европейской и азиатской частей.

Рисунки подраздела 2:

- пространственное распределение коэффициентов линейного тренда относительных аномалий *годовой* продолжительности солнечного сияния на территории России;
- пространственное распределение коэффициентов линейного тренда относительных аномалий *сезонной* продолжительности солнечного сияния на территории России;
- многолетние изменения относительных аномалий годовой и сезонной продолжительности солнечного сияния, осредненной по территории Российской Федерации, ее европейской и азиатской частей;
- многолетние изменения относительных аномалий суммарной за год продолжительности солнечного сияния, осредненной по квазиоднородным физико-географическим регионам и федеральным округам Российской Федерации.

101

Для примера приведем таблицу с оценками параметров линейного тренда регионально осредненных сезонных и годовых аномалий ПСС (табл. 2) и карту с географическим распределением коэффициентов линейного тренда относительных аномалий сезонных сумм ПСС на территории России (рис. 5). Многолетние ряды регионально осредненных относительных аномалий годовой и сезонной продолжительности солнечного сияния показаны на рис. 6.

Таблица 2

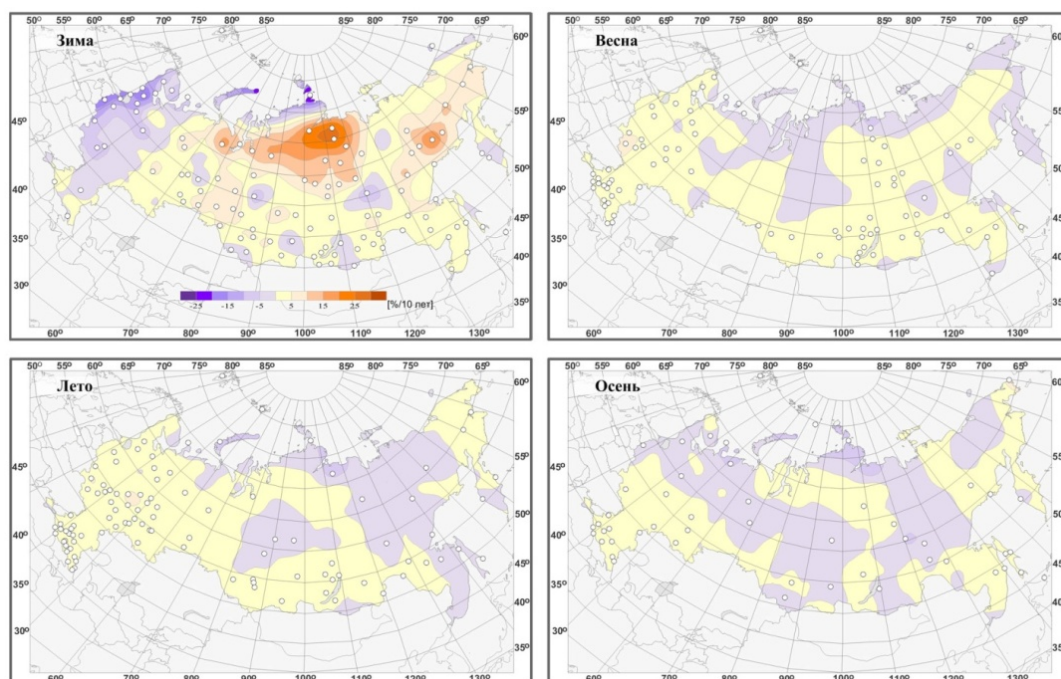
**Оценки линейного тренда относительных аномалий продолжительности солнечного сияния, осредненных по регионам России; 1976-2021 гг.**

(*b* – коэффициент линейного тренда (%/10 лет), *D* – вклад тренда в общую дисперсию ряда (%).

Тренд статистически значимый на 5%-ном уровне показан жирным шрифтом.)

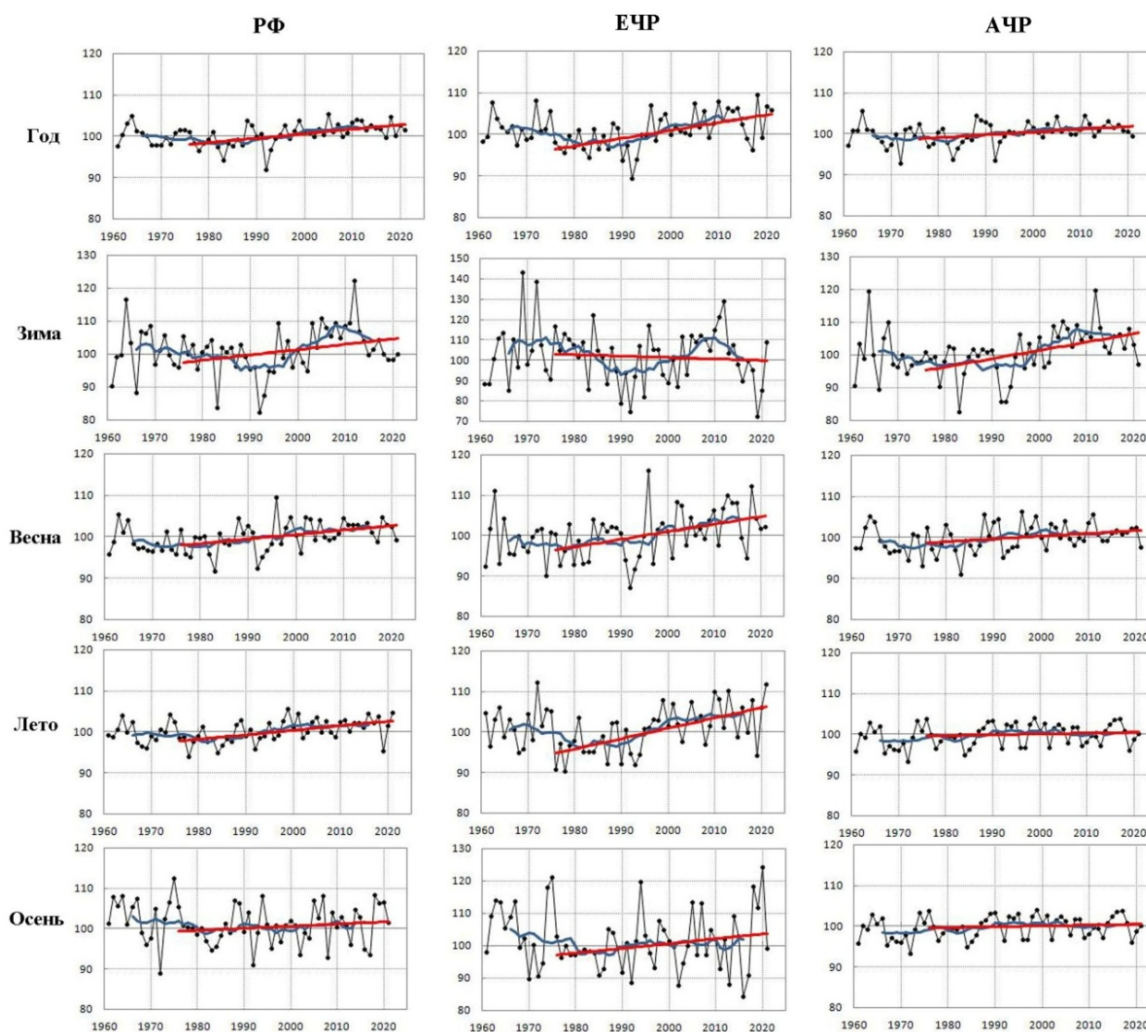
Регион	Год		Зима		Весна		Лето		Осень	
	<i>b</i>	<i>D</i>	<i>b</i>	<i>D</i>	<i>b</i>	<i>D</i>	<i>b</i>	<i>D</i>	<i>b</i>	<i>D</i>
Российская Федерация	<b>1.1</b>	<b>30</b>	<b>1.6</b>	<b>10</b>	<b>1.1</b>	<b>17</b>	<b>1.1</b>	<b>29</b>	0.5	3
ЕЧР	<b>1.9</b>	<b>33</b>	-0.7	1	<b>1.9</b>	<b>18</b>	<b>2.6</b>	<b>38</b>	1.4	5
АЧР	<b>0.7</b>	<b>14</b>	<b>2.5</b>	<b>24</b>	0.7	8	0.2	1	0.0	0
<i>Физико-географические регионы Российской Федерации</i>										
Север ЕЧР и Западной Сибири	-0.3	0	-2.1	1	-0.5	1	0.2	0	-1.8	3

Север Восточной Сибири и Якутии	0.6	6	<b>9.0</b>	<b>36</b>	0.6	3	-0.3	1	-0.4	0
Чукотка и север Камчатки	0.1	0	3.5	4	<b>-2.4</b>	<b>9</b>	1.7	5	-0.2	0
Центр ЕЧР	<b>2.0</b>	<b>19</b>	-1.2	1	<b>1.7</b>	<b>9</b>	<b>2.9</b>	<b>28</b>	1.7	3
Центр и юг Западной Сибири	0.6	3	<b>3.9</b>	<b>9</b>	0.5	1	0.4	1	-0.6	0
Центр и юг Восточной Сибири	<b>0.9</b>	<b>16</b>	<b>2.5</b>	<b>20</b>	<b>1.4</b>	<b>20</b>	0.4	2	-0.2	0
Дальний Восток	0.4	4	<b>1.7</b>	<b>12</b>	0.5	1	-0.9	3	0.9	5
Алтай и Саяны	0.8	8	1.1	3	1.1	6	0.8	5	0.0	0
Юг ЕЧР	<b>2.7</b>	<b>45</b>	0.6	0	<b>3.4</b>	<b>25</b>	<b>3.1</b>	<b>48</b>	<b>2.1</b>	<b>10</b>
<i>Федеральные округа Российской Федерации</i>										
Центральный	<b>2.6</b>	<b>22</b>	-5.4	8	<b>3.5</b>	<b>19</b>	<b>3.4</b>	<b>30</b>	2.2	3
Южный	<b>3.1</b>	<b>46</b>	0.9	1	<b>3.8</b>	<b>22</b>	<b>3.2</b>	<b>43</b>	<b>2.7</b>	<b>14</b>
Северо-Западный	0.4	1	-5.0	8	0.8	2	1.1	3	-2.0	4
Дальневосточный	<b>0.5</b>	<b>12</b>	<b>2.2</b>	<b>21</b>	0.6	6	-0.2	1	0.3	1
Сибирский	<b>0.8</b>	<b>10</b>	<b>2.8</b>	<b>11</b>	1.0	6	0.4	2	-0.2	0
Уральский	0.9	4	3.7	7	0.1	0	1.3	4	-0.1	0
Приволжский	<b>2.3</b>	<b>18</b>	0.8	0	1.2	3	<b>3.3</b>	<b>27</b>	2.5	5
Северо-Кавказский	<b>2.4</b>	<b>38</b>	0.3	0	<b>3.0</b>	<b>22</b>	<b>3.2</b>	<b>43</b>	1.7	6



**Рис. 5.** Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда относительных аномалий сезонной продолжительности солнечного сияния на территории России по данным за 1976-2021 гг. (%/10 лет).

*Белыми кружками выделены станции, для которых тренд статистически значим на 5%-ном уровне.*



**Рис. 6.** Относительные аномалии (%) годовой и сезонной продолжительности солнечного сияния, осредненной по территории Российской Федерации, ее европейской и азиатской частей.

### Рекомендации по внедрению

«Методика мониторинга климата: продолжительность солнечного сияния» была рассмотрена на заседании Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета. В своем Решении от 29.03.2022 ЦМКП одобрила работу ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» по созданию Методики и рекомендовала использовать ее для подготовки раздела ежегодного «Доклада об особенностях климата на территории Российской Федерации».

### Список литературы

1. Алисов Б.П. Климат СССР. М.: Московский Университет, 1956. – 127 с.
2. Анасова Е.Г., Клещенко Л.К. Описание массива данных суммарной за месяц продолжительности солнечного сияния на станциях России. <http://meteo.ru/data/160-sunshine-duration#описание-массива-данных>

3. Климатические условия на территории России. <http://meteo.ru/pogoda-i-klimat/93-klimaticheskie-usloviya/179-klimaticheskie-usloviya-na-territorii-rossii>
4. Мониторинг климата России. [http://climatechange.igce.ru/index.php?option=com\\_docman&task=cat\\_view&gid=32&Itemid=75&lang=ru](http://climatechange.igce.ru/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=32&Itemid=75&lang=ru).
5. *Клещенко Л.К.* Некоторые результаты статистического анализа данных о продолжительности солнечного сияния на территории России // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – 2018. – Вып. 181. – С. 69–85.
6. *Клещенко Л.К.* Мониторинг продолжительности солнечного сияния на территории России // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – 2018. – Вып. 182. – С. 29–46.
7. *Клещенко Л.К.* Тенденции современных изменений продолжительности солнечного сияния на территории России // Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы. Материалы международной научно-практической конференции (г. Воронеж, 3-5 октября 2019 г.). Том 1. – Воронеж: Изд-во Цифровая полиграфия, 2019. – С. 53-59.
8. *Клещенко Л.К.* Региональные особенности режима солнечного сияния на территории России в 2019 году // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – 2020. – Вып. 186. – С. 101–117.
9. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. М: Росгидромет, 2022. – 104 с.
10. Annual Bulletin on the Climate in WMO Region VI – Europe and Middle East – 2019. <https://www.dwd.de/EN/ourservices/ravibulletinjahr/ravibulletinjahr.html>.

**УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ  
ВЕКТОРОВ ВЕТРА ПО ИНФОРМАЦИИ АППАРАТУРЫ  
МСУ-ГС/ВЭ ВЫСОКОЭЛЛИПТИЧЕСКОГО КА АРКТИКА-М №1  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКОГО ПОТОКА**

*Дальневосточный центр ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической  
гидрометеорологии «Планета», г. Хабаровск*

**Введение**

В течение 2022 года в рамках темы 2.5 Плана научно-исследовательских и опытно-конструкторских, технологических и других работ Росгидромета была разработана усовершенствованная технология построения векторов ветра с использованием оптического потока по информации аппаратуры МСУ-ГС/ВЭ высокоэллиптического космического аппарата (КА) Арктика-М №1, которая в течение 2022 года была испытана отделом математического обеспечения регионального вычислительного центра ФГБУ «Дальневосточное УГМС».

105

Необходимость разработки технологии построения векторов ветра по информации, полученной с КА Арктика-М №1, обусловлена недостаточностью покрытия большей части северных территорий Российской Федерации, Сибири и Дальнего Востока оперативными данными наземных наблюдений, радиолокационного и аэрологического зондирования в качестве основы для построения алгоритмов наукастинга, а также возможного ограничения доступа к данным зарубежных КА и моделям ЧПП.

Ранее разработанная технология построения векторов ветра по данным инфракрасного канала с центральной длиной волны 10.7 мкм прибора МСУ-ГС геостационарных спутников серии Электро-Л не обеспечивала высокую плотность расчета на данных КА Арктика-М №1, в связи с чем были проведены работы по усовершенствованию технологии путем применения оптического потока и дополнительного построения векторов ветра для инфракрасного канала с центральной длиной волны 6.3 мкм.

## Краткое описание технологии

Ядром предлагаемой технологии расчета векторов ветра является дифференциальный метод вычисления оптического потока – модифицированный метод Брокса с нормализацией ограничений на данные [2]. Использование дифференциальных методик дает возможность получить векторное поле с высокой плотностью и точностью. Последнее справедливо ввиду того, что подобные методы точнее восстанавливают вектора для областей, имеющих вращательные траектории движения. Сам метод сводится к задаче минимизации функционала энергии изображения с помощью численного решения соответствующих уравнений Эйлера – Лагранжа методом Якоби. Технология расчета оптического потока реализована на программно-аппаратной архитектуре CUDA, что позволяет в десятки раз увеличить скорость обработки изображений по сравнению с процессорными вычислениями.

На основе оптического потока реализуется алгоритм вычисления векторов ветра по перемещению облачности (для канала с центральной длиной волны 10.7 мкм) и полей водяного пара (для канала с центральной длиной волны 6.3 мкм) в атмосфере, который состоит из нескольких этапов. На первом этапе извлекаются данные двух смежных изображений инфракрасных каналов с центральными длинами волн 10.7 мкм и 6.3 мкм (9 и 5 каналы) прибора МСУ-ГС/ВЭ КА Арктика-М №1, а также рассчитываются маска облачности, высоты верхней границы облачности для канала 10.7 мкм и полей водяного пара для канала 6.3 мкм [3]. Извлеченные данные преобразуются в стереографическую проекцию для Северного полюса (ESRI:102018). Далее с помощью оптического потока извлекается информация о перемещении каждого пикселя на смежных изображениях рассматриваемых каналов и по географическим координатам производится расчет  $U$  и  $V$  компонент смещения пикселей, которые пересчитываются в значения скорости и направления векторов ветра. Каждому рассчитанному вектору присваивается конкретное значение уровня давления, соответствующее давлению на верхней границе облачности и поля водяного пара. После этого применяется ряд тестов, позволяющих исключить некорректные вектора, рассчитанные вне облачности, в областях с достаточно низким градиентом радиояркостных температур и малым смещением. Дополнительно с помощью алгоритма кластеризации DBSCAN исключаются ошибки, связанные с несогласованностью смежных векторов, и рассчитывается показатель качества  $QI$ , по которому на разных высотах отсекаются вектора, не подошедшие по установленным критериям. Данные критерии выбраны эмпирическим методом при проведении экспериментов на определение наилучшего соотношения точности работы алгоритма и предоставляемого покрытия.

## Методика испытаний

Для оценки точности работы разработанной технологии было проведено сравнение получаемых параметров ветра с данными фактического радиозондирования атмосферы. Сравнение проводилось для всех доступных пунктов зондирования, имеющихся в базе данных РВЦ ФГБУ «Дальневосточное УГМС» и базе данных центра GSL (NOAA). Дополнительно проводилась оценка точности векторов ветра по прогностическим полям центра NCEP в сетке  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  для дат, близких к срокам предыдущего сравнения. Рассчитывался коэффициент корреляции Пирсона (PIRS), средняя абсолютная ошибка (MAE) и среднеквадратическая ошибка (RMSE) отдельно для скорости и направления ветра, а также среднее квадратичное модуля векторной разности компонентов U и V вектора ветра (RMSVD).

## Результаты испытаний

Первым этапом испытаний разработанной технологии было сравнение с данными фактического радиозондирования атмосферы. Для этого в течение 2022 года выбирались сроки съемки КА Арктика-М №1, наиболее близкие к 00 и 12 ч UTC (основные сроки запуска аэрологических зондов). Результаты сравнения представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты сравнения векторов ветра по данным КА Арктика-М №1 и данных радиозондирования атмосферы**

107

	PIRS	MAE	RMSE	RMSVD	Количество точек
Канал с центральной длиной волны 10.7 мкм					
Направление	97.3 %	12.7 град.	17.1 град.	4.94 м/с	1172
Скорость	96.1 %	2.7 м/с	3.4 м/с		
Канал с центральной длиной волны 6.3 мкм					
Направление	84.1 %	12.9 град.	34.8 град.	4.33 м/с	2982
Скорость	96.2 %	2.3 м/с	2.9 м/с		

Полученные результаты показывают хорошую корреляцию сравниваемых данных с низкими значениями ошибок. Погрешность оценок по показателю RMSVD соответствует требованиям к измерениям, сформулированным рабочими группами Всемирной метеорологической организации [1].

Ввиду малого количества точек по данным радиозондирования, аналогичным способом было проведено сравнение с данными прогностических полей центра NCEP. Модельные значения векторов ветра выбирались из прогноза с заблаговременностью, не превышающей 12 часов от исходных сроков 00 и 12 ч по UTC (аналогичные сроки при сравнении с данными радиозондирования). Результаты сравнения представлены в табл. 2.

**Результаты сравнения векторов ветра по данным КА Арктика-М №1  
и параметров ветра по данным прогностической модели**

	PIRS	MAE	RMSE	RMSVD	Количество точек
Канал с центральной длиной волны 10.7 мкм					
Направление	81.7 %	14.7 град.	49.8 град.	5.01 м/с	10071737
Скорость	95.5 %	2.8 м/с	3.6 м/с		
Канал с центральной длиной волны 6.3 мкм					
Направление	83.8 %	13.6 град.	43.1 град.	4.19 м/с	20403589
Скорость	95.3 %	2.4 м/с	3.0 м/с		

По результатам сравнения наблюдаются ошибки RMSE выше, чем при сравнении с данными радиозондирования, что, возможно, связано с наличием некоторого количества грубых выбросов, но остальные результаты аналогичны предыдущему сравнению.

Для проведения сравнительного анализа с аналогичными данными, рассчитываемыми для зарубежных КА, было проведено сравнение параметров ветра, полученных по данным серии спутников GOES (NOAA) [4], с прогностическими полями центра NCEP. Для этого были выбраны аналогичные предыдущим сравнениям сроки съемки, но в меньшем количестве. Результаты представлены в табл. 3.

**Результаты сравнения векторов ветра по данным КА GOES-16  
и параметров ветра по данным прогностической модели**

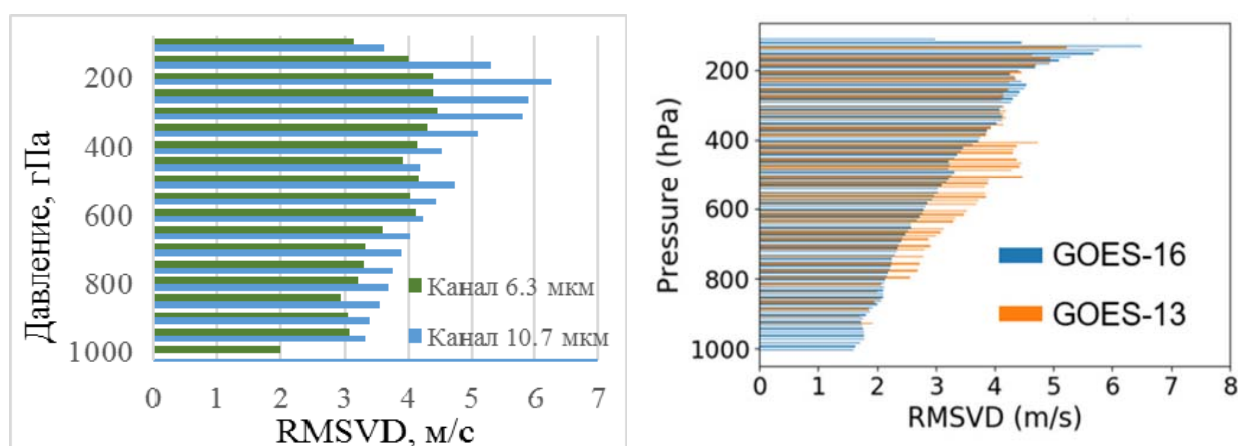
	PIRS	MAE	RMSE	RMSVD	Количество точек
Канал с центральной длиной волны 11.2 мкм					
Направление	70.9 %	8.9 град.	31.5 град.	4.67 м/с	50 358
Скорость	95.1 %	2.5 м/с	3.3 м/с		
Канал с центральной длиной волны 6.15 мкм					
Направление	84.7 %	8.1 град.	23.4 град.	5.34 м/с	52 611
Скорость	94.1 %	2.9 м/с	3.7 м/с		

Результаты сравнения достаточно близки к сравнениям восстановленных значений векторов ветра по данным КА Арктика-М №1, что позволяет сделать вывод о том, что точность расчетов разработанной технологии соответствует зарубежным аналогам.

В качестве дополнительной меры оценки было построено вертикальное распределение ошибки RMSVD по различным уровням давления атмосферы. Результаты представлены в табл. 4, где показано распределение по трем основным срезам уровней, и на рис. 1, где показано полное распределение ошибки для КА Арктика-М №1 в сравнении с КА серии GOES.

### Распределение ошибки RMSVD по уровням давления

Уровень давления, гПа	RMSVD для канала с центральной длиной волны 10.7 мкм, м/с	RMSVD для канала с центральной длиной волны 6.3 мкм, м/с
0–300	5.95	4.38
300–500	5.18	4.19
500–1000	4.22	4.12



**Рис. 1.** Распределение ошибки RMSVD по уровням давления для КА Арктика-М №1 (слева) и КА GOES (справа).

Разработанная технология расчета векторов ветра обеспечивает схожие показатели точности работы по всем сезонам года, что подтверждается результатами сравнений векторов ветра по данным КА Арктика-М №1 и параметров ветра по данным прогностической модели за летний и осенний период, представленными в табл. 5 и 6 соответственно.

### Результаты сравнения векторов ветра по данным КА Арктика-М №1 и параметров ветра по данным прогностической модели (август 2022)

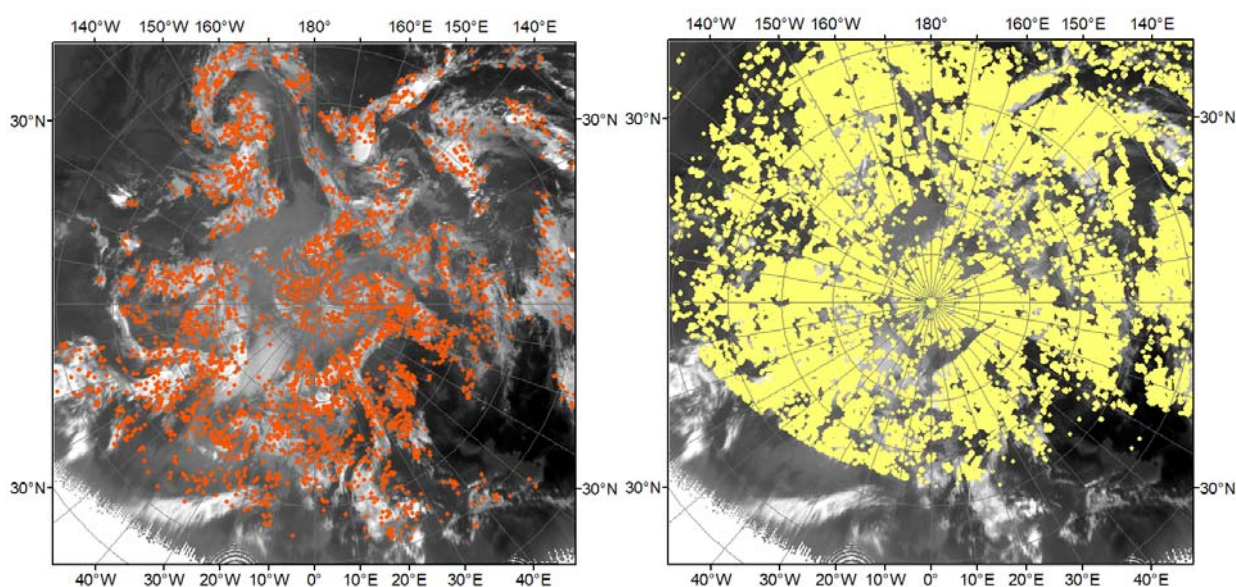
	PIRS	MAE	RMSE	RMSVD	Количество точек
Канал с центральной длиной волны 10.7 мкм					
Направление	81.5 %	14.9 град.	50.1 град.	4.97 м/с	831859
Скорость	95.4 %	2.8 м/с	3.5 м/с		
Канал с центральной длиной волны 6.315 мкм					
Направление	83.8 %	13.5 град.	42.9 град.	4.16 м/с	1641558
Скорость	95.1 %	2.3 м/с	3.0 м/с		

**Результаты сравнения векторов ветра по данным КА Арктика-М №1 и параметров ветра по данным прогностической модели (ноябрь 2022)**

	PIRS	MAE	RMSE	RMSVD	Количество точек
Канал с центральной длиной волны 10.7 мкм					
Направление	85.9 %	10.6 град.	41.1 град.	5.82 м/с	811257
Скорость	96.5 %	3.3 м/с	4.2 м/с		
Канал с центральной длиной волны 6.3 мкм					
Направление	81.3 %	10.9 град.	47.3 град.	5.27 м/с	1231878
Скорость	96.4 %	2.9 м/с	3.7 м/с		

Ошибка в осенний период незначительно выше, что может быть связано с особенностями распределения температур в атмосфере и используемым подходом к определению высот полей облачности и водяного пара. Но в относительном выражении показатели близки друг к другу.

Одним из основных преимуществ усовершенствованной технологии построения векторов ветра, по сравнению с ранее применяемой технологией для КА серии Электро-Л, кроме возможности расчета по каналу с центральной длиной волны 6.3 мкм, стало увеличение плотности результирующего пространственного покрытия данными о векторах ветра. На рис. 2 представлен пример пространственного покрытия ранее применяемой технологии (красный цвет) и усовершенствованной (желтый).



**Рис. 2.** Пример пространственного покрытия ранее применяемой технологии для КА серии Электро-Л (слева) и усовершенствованной технологии расчета векторов ветра (справа).

## Заключение

Результаты проведенных испытаний показали, что погрешности оценки векторов ветра в большинстве случаев соответствуют требованиям к измерениям, сформулированным рабочими группами Всемирной метеорологической организации, и близки к результатам работы алгоритмов восстановления параметров ветра, разработанных в ведущих зарубежных космических центрах (EUMETSAT, NOAA). При этом при использовании дифференциального метода оптического потока достигается более высокая плотность векторного поля относительно ранее применяемой технологии, разработанной для геостационарных КА серии Электро-Л.

Усовершенствованная технология расчета векторов ветра, как и другие технологии дистанционного зондирования, безусловно, необходимы в системах прогностического наукастинга и могут выступать в качестве источника вспомогательной информации при реализации алгоритмов наукастинга параметров атмосферы, в постпроцессинге обработки данных численного прогноза погоды.

Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 16 сентября 2022 г. даны следующие рекомендации:

- использовать в ФГБУ «Дальневосточное УГМС» представленную технологию в оперативной синоптической практике в качестве источника вспомогательной информации;
- авторам продолжить работы по совершенствованию технологии с целью повышения качества получаемой продукции для ее использования в оперативной практике прогностических подразделений.

111

### Список литературы

1. Руководство по приборам и методам наблюдений. Том IV – Космические наблюдения. – Женева: ВМО, 2018. – 265 с.
2. Симоненко Е.В., Чудин А.О., Давиденко А.Н. Дифференциальный метод вычисления векторов перемещения // Метеорология и гидрология. – 2017. – № 3. – С. 31–42.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программный комплекс "PlanetaVPO-SD" для восстановления параметров облачности по спутниковым данным» № 2020615141 от 19.06.2020.
4. Daniels J., Bresky W., Bailey A., Allegrino A., Wanzong S., Velden C., Berger H. Enterprise Algorithm Theoretical Basis Document For Derived Motion Winds. NOAA NESDIS CENTER for SATELLITE APPLICATIONS and RESEARCH, 2022. 113 с. URL: [https://www.star.nesdis.noaa.gov/jpss/documents/ATBD/ATBD\\_EPS\\_Winds\\_DMW\\_v4.0.pdf](https://www.star.nesdis.noaa.gov/jpss/documents/ATBD/ATBD_EPS_Winds_DMW_v4.0.pdf) (дата обращения: 05.12.2022).

**МЕТОДИКА ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА  
ТИПОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА ДЛЯ ЗАПАДНОГО РАЙОНА  
АРКТИКИ НА ОСЕННЕ-ЗИМНИЙ ПЕРИОД (ОКТЯБРЬ-ФЕВРАЛЬ)  
НА ОСНОВЕ МАКРОЦИРКУЛЯЦИОННОГО МЕТОДА**

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

**Введение**

В ФГБУ «ААНИИ» разработан и в течение нескольких десятилетий совершенствуется макроциркуляционный метод анализа, диагностики и оценки атмосферных процессов и долгосрочных метеорологических прогнозов с различной заблаговременностью для полярных районов Земли, основы которого были заложены Г.Я. Вангенгеймом и А.А. Гирсом [1, 2, 5, 14].

112

В связи с интенсивной разработкой нефтегазовых месторождений в западном районе Арктики особое значение приобретает знание гидрометеорологических условий в локальных районах арктических морей с целью разработки долгосрочных метеорологических прогнозов различной заблаговременности, важных для практики гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности и планирования судоходства на трассе Северного морского пути (СМП).

В целях дальнейшего совершенствования долгосрочного прогнозирования метеорологических условий на трассе СМП в период 2017–2019 гг. по плану работ ЦНТП «Развитие моделей и технологий расчетов и прогнозов характеристик ледяного покрова на акватории арктических морей и Арктического бассейна» проводились комплексные исследования атмосферных процессов различного пространственно-временного масштаба.

*Научная задача работы* состояла в исследовании закономерностей формирования межгодовой и внутригодовой изменчивости атмосферных процессов в периоды устойчивых потеплений и похолоданий, получение прогностических зависимостей для различных вариантов (разновидностей) перестроек атмосферных процессов, поиск путей их

использования для долгосрочного прогнозирования температуры в локальных районах западных морей трассы СМП.

*Конечной практической целью работы* являлась разработка и внедрение в практику методики долгосрочного прогноза типа аномалии температуры воздуха на осенне-зимний период для отдельных участков трассы СМП западного района Арктики.

Для Арктики прогнозирование температуры воздуха имеет важное значение, так как она является интегрирующим фактором природно-климатических особенностей как в целом полярного района, так и локальных его регионов, что в свою очередь в большой мере определяет начало интенсивного нарастания или разрушения ледяного покрова, влияющего на эксплуатацию технических средств на морских месторождениях нефти и газа шельфа арктических морей и судоходства по трассе СМП [4, 8, 9].

### **Используемые данные**

Для решения поставленных задач был усовершенствован программно-аппаратный комплекс по сбору, обработке, усвоению, систематизации и представления метеорологической информации.

В качестве *исходной первичной и вторичной информации* использовались данные многолетних метеорологических наблюдений по репрезентативным полярным станциям, которые имеют наиболее длинные и непрерывные ряды наблюдений.

Специализированная информация была представлена в виде многолетних архивов метеорологических и гидрологических данных за различные периоды осреднения как по календарным периодам, так и по естественным стадиям перестройки циркуляции атмосферы от элементарных синоптических процессов (ЭСП) до циркуляционных эпох [6, 7, 15].

Специализированный многолетний архив данных на электронных носителях содержит приземные и высотные синоптические карты Северного полушария, зональные и меридиональные градиенты давления по полярному району Арктики и умеренной зоне Северного полушария, каталоги основных форм и разновидностей крупномасштабных атмосферных процессов в атлантико-евразийском секторе Северного полушария по классификации Г.Я. Вангенгейма, гидрологические данные – температура воды, показатели ледовых условий в локальных районах арктических морей [4].

Анализ и оценка структурных особенностей в преобразованиях атмосферных процессов в масштабе больших и малых преобразований проводилась средствами комплексного аэросиноптического анализа термобарических полей в толще тропосферы с учетом естественных стадий развития и перестройки крупномасштабных процессов в

соответствии с разновидностями основных форм и типов циркуляции на Северном полушарии [6, 7].

Учет крупномасштабных (фоновых) атмосферных процессов и их перестройки из одной естественной стадии развития в другую способствовал более правильной оценке природы смены режима циркуляции и метеорологических условий в локальном западном районе Арктики.

### Результаты исследований

Проведенные исследования позволили получить результаты, имеющие научное и прогностическое значение.

- Получены синоптико-климатологические характеристики для основных сезонов года для районов Карского и Баренцева морей (циркуляция атмосферы, давление, направление воздушных потоков, температура).

- *Проведена классификация синоптических процессов по типам формирования аномалий температуры в западном районе Арктики.* Типы с различными аномалиями температуры отражают принципиальные отличия в развитии и перестройке циркуляции атмосферы. Каждый тип характеризуется определенной формой макропроцесса с преобладающими траекториями циклонов и вариантами адвекции воздушных масс в западном районе Арктики.

- *Получены различные варианты блокирования западно-восточного переноса в толще тропосферы при процессах западной, восточной и меридиональной форм циркуляции по классификации Г.Я. Вангенгейма в типах формирования различных аномалий температуры в западном районе Арктики.*

- *Выявлены длительные тенденции изменения циркуляции атмосферы с целью учета их при долгосрочном прогнозировании типов температуры для западного района Арктики.*

- Получен *специализированный архив* высотных и приземных термобарических полей, средних карт и графиков для полярного района Арктики, фиксирующих различные стадии с однонаправленным ходом развития крупномасштабных атмосферных процессов и характер их проявления в индивидуальных особенностях воздухообмена и температурного фона для западного участка трассы СМП российской Арктики

Проведенные исследования позволили более точно подойти к определению границ перестройки атмосферных процессов различного пространственно-временного масштаба; пониманию природы образования различных аномалий температуры, которые возникают в процессе длительных тенденций изменений атмосферных процессов в системе общей циркуляции атмосферы (ОЦА); анализу, диагнозу и оценке текущих атмосферных

процессов; отбору из исторических рядов группы лет-гомологов по исходному периоду; выбору действующих фоновых и сезонных групп и наиболее вероятного варианта объединения гомологов в прогнозируемых месяцах.

Полученные результаты исследований были включены в технологическую схему поэтапной разработки долгосрочного фонового прогноза и его уточнений типа аномалии температуры различного знака для западного участка трассы СМП.

### Основы методики

Необходимо отметить, что с самого начала макроциркуляционный метод прогнозирования для слабо освещенного полярного района Арктики метеорологическими данными наблюдений развивался на основе максимально возможного, комплексного определения физически обоснованной аналогии исходного процесса процессам предшествующего периода с учетом более крупномасштабных атмосферных процессов, чем рассматриваемый район [1, 2,5].

Принципиальная схема поэтапной разработки долгосрочного метеорологического прогноза представлена на рис. 1.



Рис. 1. Принципиальная схема этапов разработки долгосрочного метеорологического прогноза (ОЦП – общая циркуляция атмосферы; ОВП – однородный внутригодовой период).

Основной алгоритм разработки долгосрочного метеорологического прогноза включает анализ и диагноз текущих атмосферных процессов (определение форм и типов циркуляции и их разновидностей); расчленение непрерывных процессов на естественные стадии различного пространственно-временного масштаба (от элементарных синоптических процессов до циркуляционных эпох); выбор из исторического архива физически обоснованных групп гомологов с процессами, аналогичными текущему; прогноз синоптического положения расчетных метеорологических полей в виде карт; представление прогностических данных метеорологических параметров в текстовой, табличной, графической формах и в виде электронных карт.

Совершенствование макроциркуляционного метода проходит как по линии улучшения технологии подбора гомологов при помощи современных ЭВМ, так и по линии накопления синоптического архива, что увеличивает возможность подбора аналога, т. е. возможность решать задачу прогноза по более точным начальным данным.

Как показано в [4, 7, 9], перестройка крупномасштабных атмосферных процессов в системе общей циркуляции атмосферы может по-разному проявляться в полях метеорологических характеристик в разные сезоны года на региональном уровне в отдельно взятых районах Арктики. В связи с этим повышение качества долгосрочных метеорологических прогнозов макроциркуляционным методом связано с продолжением накопления результатов комплексных эмпирических исследований крупномасштабных атмосферных процессов в системе ОЦА и спецификой их проявления в метеорологических условиях в локальных районах Арктики, на отдельных участках трассы СМП.

Тем не менее радикальное решение проблемы долгосрочных метеорологических прогнозов возможно лишь на путях развития физической теории ОЦА, что позволит макроциркуляционным методом на основе физических принципов более обоснованно выбирать из исторических архивов группы гомологов в целях долгосрочного прогнозирования.

### **Результаты испытания**

В соответствии с Планом испытания и внедрения новых и усовершенствованных методов (технологий) гидрометеорологических прогнозов на 2020 и 2021 гг. в ФГБУ ААНИИ в оперативном режиме было проведено испытание методики долгосрочного прогноза типа аномалии температуры воздуха на осенне-зимний период (октябрь-февраль) для отдельных участков трассы СМП в Баренцевом и Карском морях.

В период оперативных испытаний методики с января 2020 по декабрь 2021 года отмечались особенности атмосферной циркуляции и метеорологических условий в западном районе Арктики.

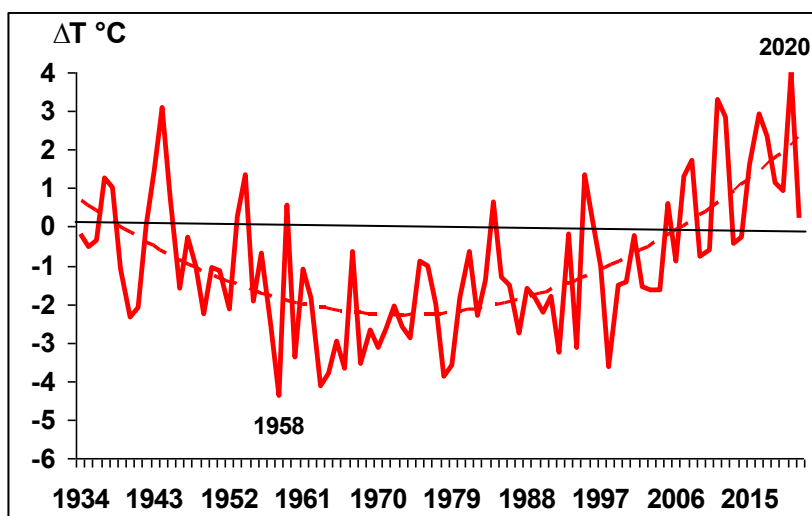
Основные средние годовые, фоновые показатели циркуляции атмосферы и метеорологических данных для западного района трассы СМП представлены в табл. 1 и на рис. 2.

Таблица 1

**Преобладающие разновидности атмосферных процессов, направления воздушных потоков, значения давления и температуры воздуха на западном участке трассы СМП в 2020 и 2021 гг.**

Период	Разновидности атмосферных процессов	Аномалия давления	Направление воздушных потоков	Температура воздуха, °С	
				Средняя	Аномалия
2020	W <sub>В</sub>	-4	юз/юв	-4,9	4,0
2021	E <sub>Н</sub>	1	юз/сз	-8,7	0,2

Примечание. Индексы форм циркуляции: W – западная; E – восточная; C – меридиональная. Траектории циклонов: В – высокоширотные; Н – Низкоширотные



**Рис. 2.** Средние годовые значения аномалий температуры воздуха (°С) для западного участка трассы СМП за период с 1934 по 2021 г. (аномалии от нормы 1991–2020 гг.).

В 2020 году основной особенностью развития атмосферных процессов явилась аномально высокая повторяемость крупномасштабных атмосферных процессов западной (W) формы циркуляции с преобладанием по сравнению с нормой высокоширотных траекторий циклонов Северной Атлантики в полярный район. Фон давления на акватории западных морей ниже нормы. Преобладающие воздушные потоки с южной составляющей обусловили преобладающую адвекцию теплых воздушных масс и формирование в среднем за 2020 г. в рассматриваемом районе положительных аномалий температуры до

экстремально высоких за весь ряд наблюдений (см. рис 1). Наиболее крупные значения средних месячных аномалий температуры более 10 °С отмечались в феврале и ноябре 2020 года.

В 2021 г. произошла кардинальная перестройка в направленности крупномасштабных процессов от западной (W) к восточной (E) форме циркуляции атмосферы. Западный район Арктики находился под влиянием с востока гребней континентального и арктического антициклонов, что обусловило в среднем за 2021 г. рост давления до положительных аномалий. Циклоны смещались преимущественно по низкоширотным траекториям и не оказывали существенного влияния на полярный район, что обусловило ослабление адвекции теплых воздушных масс и резкое понижение по сравнению с 2020 г. температурного фона на акватории западных морей до значений, близких к норме (см. рис. 1).

Более подробные данные о развитии метеорологических процессов в Северной полярной области представлены в обзорах за 2020 и 2021 гг. [6].

Испытания методики проводились в лаборатории долгосрочных метеорологических прогнозов отдела ледового режима и прогнозов ФГБУ «АНИИ». Прогнозы составлялись и оценивались по данным наиболее репрезентативных полярных станций, имеющих непрерывные и наиболее длительные периоды наблюдений.

Результаты анализа текущих атмосферных процессов различного пространственно-временного масштаба, прогнозы и их уточнения регулярно докладывались на прогностических совещаниях специалистов отделов ледового режима и прогнозов, гидрологии устьев рек и водных ресурсов центра ледовой гидрометеорологической информации АНИИ.

Содержание и форма прогнозов определены требованиями практики в процессе гидрометеорологического обеспечения мореплавания по СМП и работ на шельфе морей российской Арктики [12].

Долгосрочный фоновый метеорологический прогноз на холодный период и его уточнения состояли из карт распределения среднего месячного давления, направления основных воздушных потоков и их отклонения от нормы, аномалии давления и ожидаемого типа аномалии температуры для западного участка трассы СМП.

Оценка оправдываемости прогнозируемого типа температуры производилась путем непосредственного сопоставления предсказанных и фактических значений аномалий температуры в Карском и Баренцевом морях.

Основные требования составления долгосрочных прогнозов различной заблаговременности и оценка их оправдываемости основывались на руководствах и Наставлении, опубликованных и утвержденных Росгидрометом [10–13].

Прогноз по знаку получал положительную оценку, если аномалии прогностических и фактических значений температуры совпадали.

Прогноз по величине получал положительную оценку, если ошибка была равна или менее допустимой погрешности. За допустимую погрешность прогноза принималась величина  $0,67\sigma_{\Pi}$ , где  $\sigma_{\Pi}$  – среднеквадратическое (природное) отклонение температуры воздуха, рассчитанное для всего ряда наблюдений.

Средние оценки оправдываемости прогнозов температуры с различной заблаговременностью для различных участков трассы западного района Арктики приводятся в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Средняя оправдываемость долгосрочных прогнозов знака аномалии температуры с заблаговременностью до пяти месяцев для районов западного участка трассы СМП в 2020 и 2021 гг., %

Район		2020	2021	Среднее
Баренцево море	юго-восток	87	81	<b>84</b>
	северо-восток	81	83	<b>82</b>
Карское море	юго-запад	88	83	<b>86</b>
	северо-восток	81	85	<b>83</b>
<b>Среднее</b>		<b>84</b>	<b>83</b>	<b>84</b>

119

Таблица 3

Средняя оправдываемость долгосрочных прогнозов температуры с заблаговременностью до одного месяца для районов западного участка трассы СМП в 2020 и 2021 гг., %

Район		Температура		
		Знак аномалии	Величина	Эффективность
Баренцево море	юго-восток	94	68	<b>11</b>
	северо-восток	89	64	<b>9</b>
Карское море	юго-запад	94	73	<b>15</b>
	северо-восток	88	68	<b>12</b>
<b>Среднее</b>		<b>84</b>	<b>91</b>	<b>68</b>

Данные таблиц показывают, что средние оценки оправдываемости прогнозов по знаку аномалии температуры с различной заблаговременностью колеблются от 81 до 95 %. Наиболее высокие оценки по знаку аномалий отмечены при заблаговременности до одного месяца.

Оценки прогнозов по знаку аномалий температуры во многом обусловлены учетом длительных тенденций повышения температурного фона как в целом по полярной области Арктики, так и для ее локальных районов.

*Оправдываемость прогнозов по величине температуры* при допустимой погрешности  $0,67\sigma$  составила от 64 до 73 %. Эффективность прогнозов по величине аномалий температуры по отношению к климатическим прогнозам с допустимой погрешностью по отдельным месяцам колебалась в пределах от 8 до 17 % и в среднем составила 12 %.

К погрешностям прогнозов необходимо отнести те случаи, когда происходила резкая перестройка атмосферных процессов. При этом в ряде случаев ожидаемые границы смены процессов от одной формы циркуляции к другой, по сравнению с фактическими данными, были несколько смещены во времени, что во многом сказалось на конечной оценке оправдываемости прогнозов.

Как было отмечено в обзорах метеорологических процессов за 2020 и 2021 гг., в период испытаний в западном районе Арктики наблюдалось возникновение крайне крупных значений положительных аномалий температуры воздуха до 10–15 °С (февраль и ноябрь 2020 г.), что сказалось на окончательных средних оценках оправдываемости прогнозов по величине аномалий температуры. Прогнозирование больших значений аномалий температуры на данном уровне развития долгосрочных методов прогнозов пока невозможно.

120

Необходимо отметить, что в полярном районе оправдываемость долгосрочных прогнозов зависит от качества исходной информации в слабо освещенных наблюдениями районах, особенно в центральном полярном районе, и длины рядов наблюдений на наиболее репрезентативных полярных станциях. Недостаточная надежность данных наблюдений метеорологической сети влияет на анализ и диагноз начальных условий циркуляции атмосферы и погоды в локальных районах Арктики, что приводит к снижению оправдываемости прогнозов, особенно при увеличении их заблаговременности.

В связи с этим для полярного района особенно ценно применение макроциркуляционного метода долгосрочного прогнозирования, разработанного Г.Я. Вангенгеймом и А.А. Гирсом. Метод позволяет рассматривать процессы на территории северной полярной области в связи со спецификой перестроек крупномасштабных атмосферных процессов в умеренной зоне Северного полушария [1, 2, 5].

При разработке долгосрочных метеорологических прогнозов в оперативном режиме прогнозистом анализировалась информация как гидродинамических ансамблевых, так и эмпирических методов прогнозов ведущих метеорологических центров в стране и за рубежом [3]. В зависимости от стадии развития текущего крупномасштабного синоптического процесса, тенденции изменения предсказываемого метеорологического

элемента, сезона, объекта обеспечения на территории ответственности, специалист-эксперт в каждом конкретном случае по своему личному опыту склоняется к выбору и учету результатов той или иной прогностической модели. Учет прогнозов, полученных различными методами, способствовал большей определенности при принятии решений и качества конечного результата прогнозирования.

### Заключение

Учитывая результаты проведенных испытаний методики в период круглогодичной навигации на западном участке трассы СМП можно отметить:

– методика позволяет предсказывать с заблаговременностью до 5 месяцев тип с преобладающим знаком аномалии температуры на холодный осенне-зимний (октябрь–февраль) период. В период испытания на фоне текущего потепления в западном районе Арктики преобладал тип с положительными аномалиями температуры воздуха;

– в плане уточнения фонового прогноза с заблаговременностью до одного месяца с определенной достоверностью возможно прогнозирование значений ожидаемых аномалий температуры для отдельных участков трассы СМП в Карском и Баренцевом морях. В среднем методика характеризуется определенной эффективностью по сравнению с климатическими оценками.

На основе выше приведенных результатов испытаний Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета на заседании от 9 июня 2022 г. приняла решение внедрить методику в оперативную практику ФГБУ «АНИИ» в качестве вспомогательного к основному макроциркуляционному методу долгосрочного метеорологического прогноза для полярного района Арктики.

### Список литературы

1. *Вангенгейм Г.Я.* Опыт применения синоптических методов к изучению и характеристике климата / Ред-изд. отдел Центр. Упр. Гидрометеорологической службы СССР. – М., 1935. 112 с.
2. *Вангенгейм Г.Я.* Основы макроциркуляционного метода долгосрочных метеорологических прогнозов для Арктики // Труды АНИИ. – 1952. – Т. 34. . – 314 с.
3. *Вильфанд Р.М., Тищенко В.А., Хан В.М., Цепелев В.Ю., Мироничева Н.П., Г.В. Елисеев, Иванова Е.К., Уткузова Д.Н.* Опыт комплексирования синоптико-статистических и гидродинамических прогностических систем // Метеорология и гидрология. – 2017. – № 8. – С. 5–17.
4. *Гирс А.А.* Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 280 с.

5. *Гирс А.А.* Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов. – Л., Гидрометеиздат, 1974. – 488 с.

6. *Иванов В.В., Алексеенков Г.А.* Мониторинг крупномасштабных атмосферных процессов в полярном районе Северного полушария за период январь-декабрь 2021 г. // Обзор гидрометеорологических процессов в Северном Ледовитом океане. – СПб: ААНИИ, 2022. – С. 5–14.

7. *Иванов В.В., Алексеенков А.А.* Атмосферная циркуляция и развитие атмосферных процессов в морской Арктике // Моря российской Арктики в современных климатических условиях. – СПб: ААНИИ, 2021. – С. 20–34.

8. *Мионов Е.Г., Иванов В.В., Клячкин С.В.* Современное состояние и основные направления развития методов ледовых и метеорологических прогнозов в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2000. – Вып.72. – С. 26–41.

9. *Мещерская А.В., Кононова Н.К., Иванов В.В., Голод Н.К.* Сравнение двух типизаций циркуляционных процессов // Труды ГГО. – 2013. – Вып. 568. – С. 137–155.

10. Руководство по месячным прогнозам погоды. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 365 с.

11. Руководство по долгосрочным прогнозам погоды. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 340 с.

12. Руководство по формулировке и оценке оправдываемости долгосрочных прогнозов погоды малой и большой заблаговременности для Арктики. – Л.: Изд-во Морской транспорт, 1981. – 56 с.

13. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3, часть III. – М.: Гидрометеиздат, 1982. – 143 с.

14. *Ivanov V.V., Vinogradov N.D.* Meteorological forecasts // INSROP Working Paper. – 1995. – No. 10. – P. 7–23.

15. *Ivanov V.V., Vinogradov N.D.* Meteorological forecasts // INSROP Working Paper. – 1996. – No. 36. 1.6.1: Operational Tools. – P. 7–20.

*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  $\sigma$ -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.

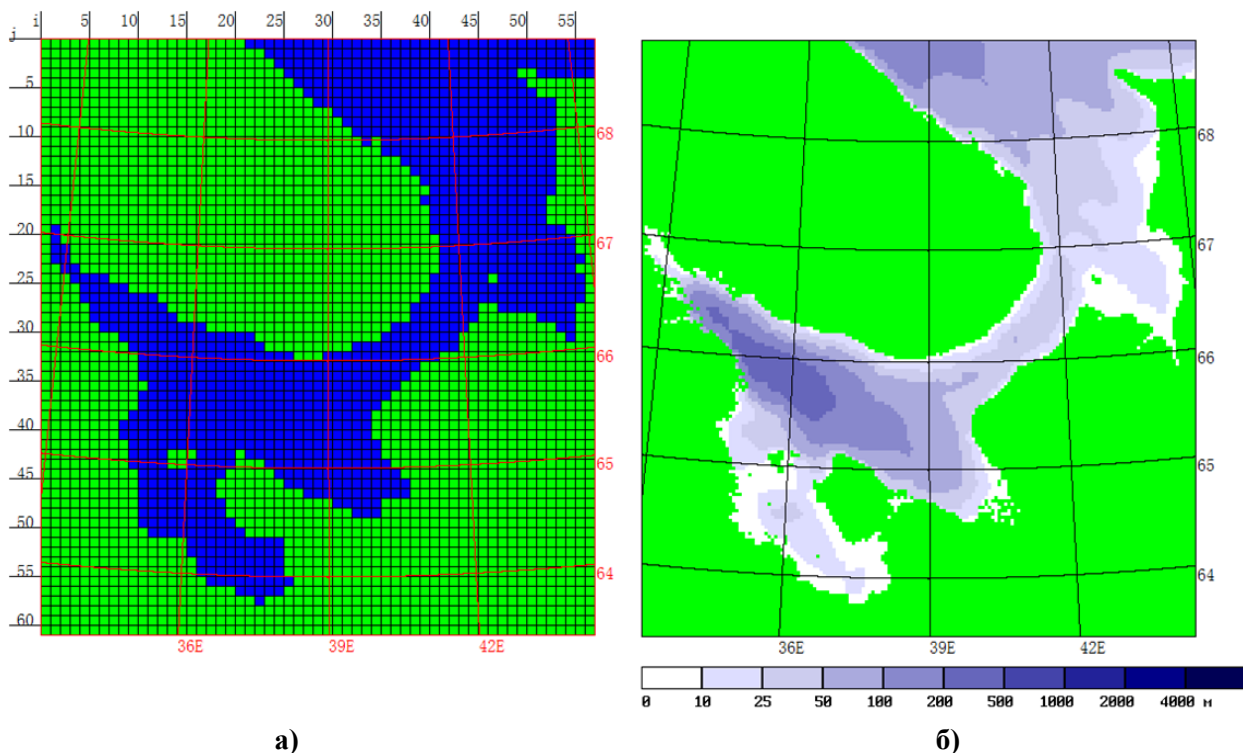
В данной модели считается, что ледяной покров проявляет свойства, характерные для вязкопластических сред. Вязкое взаимодействие в ледяном покрове подробно рассмотрено в [1]. Отличительной особенностью деформирования пластических сред является наличие порогового механизма, т. е. среда деформируется при 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.

126

### **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  $\pm 3$  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  $\sigma$  – 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.

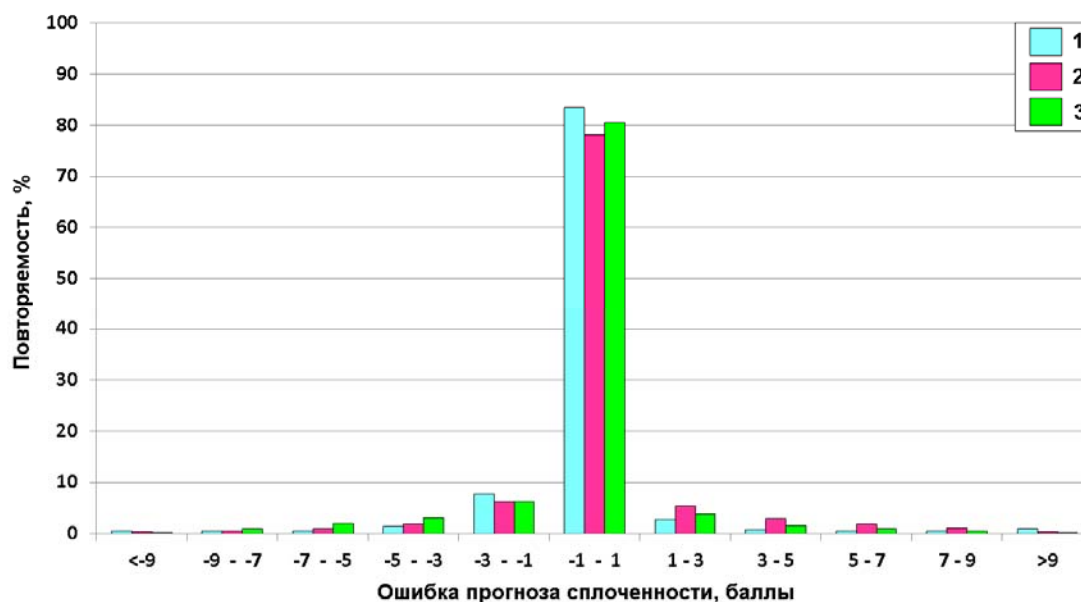
## Результаты испытаний

### 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  $\pm 1$  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			<b>88,8</b>	<b>5,7</b>	<b>85,5</b>	<b>4,1</b>	<b>89,2</b>	<b>1,2</b>

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.

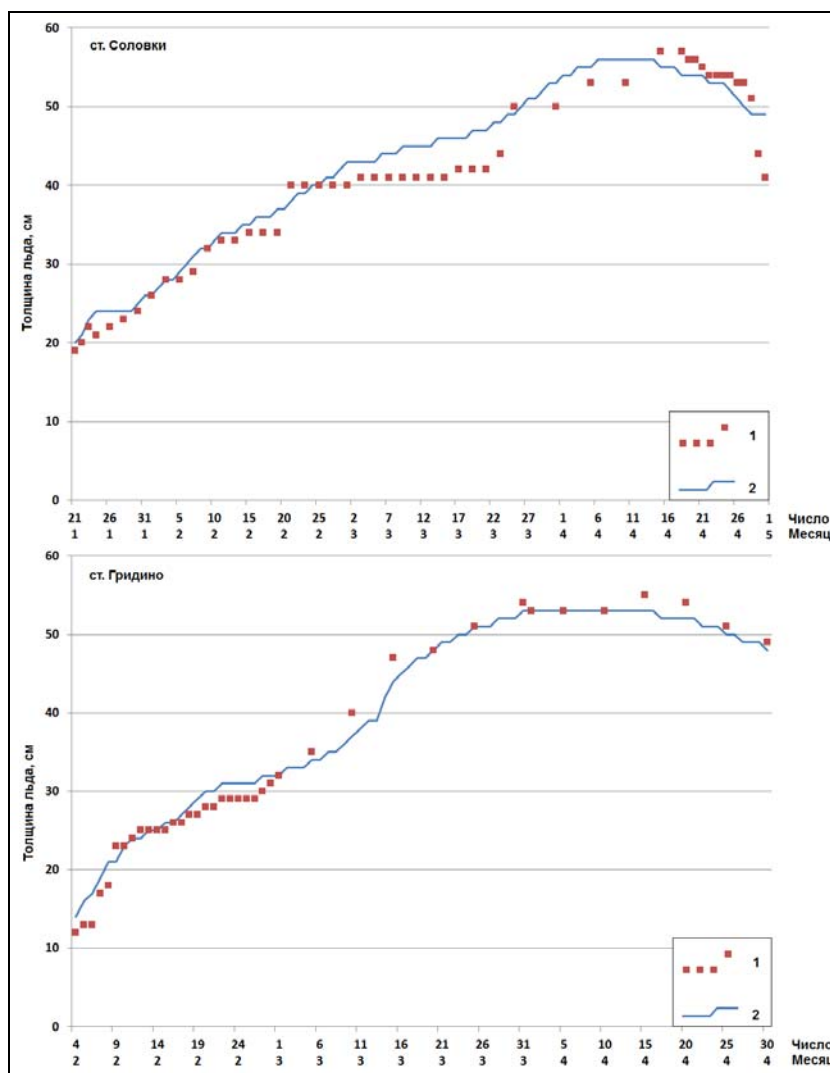
С увеличением заблаговременности оправдываемость снижается в среднем на 0,5–1,2 % на каждые сутки, а эффективность повышается на 0,4–1,0 %.

### ***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*

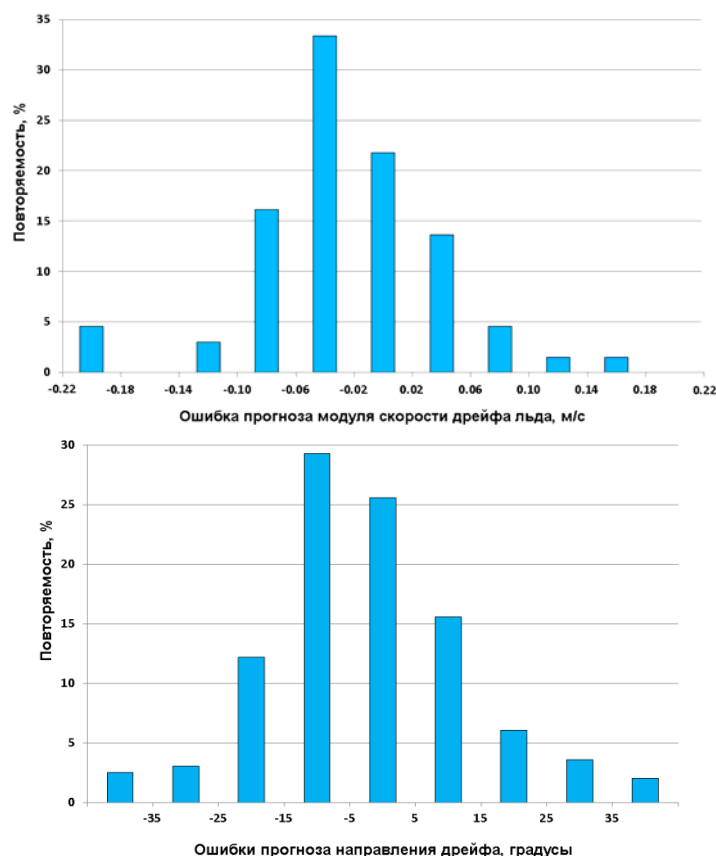
По результатам сопоставления фактического дрейфа, полученного по парам последовательных спутниковых снимков, и прогностического дрейфа оценены оценки средних арифметических и средних абсолютных ошибок модуля скорости и направления дрейфа. Отношение числа случаев, когда ошибка прогноза модуля скорости (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.

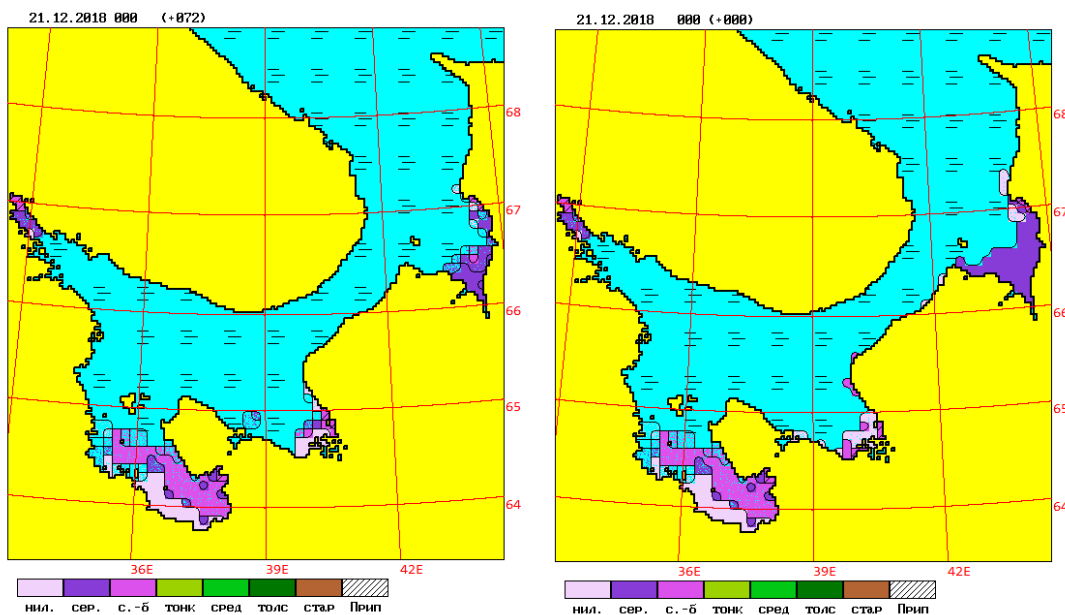
Во-вторых, важное отличие этих станций друг от друга заключается в том, что станция Сосновец расположена в Горле, где периодические (приливные) колебания имеют заметное преобладание над непериодическими (сгонно-нагонными), а станция Соловки – в западной части бассейна, где роль приливных колебаний не 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»).

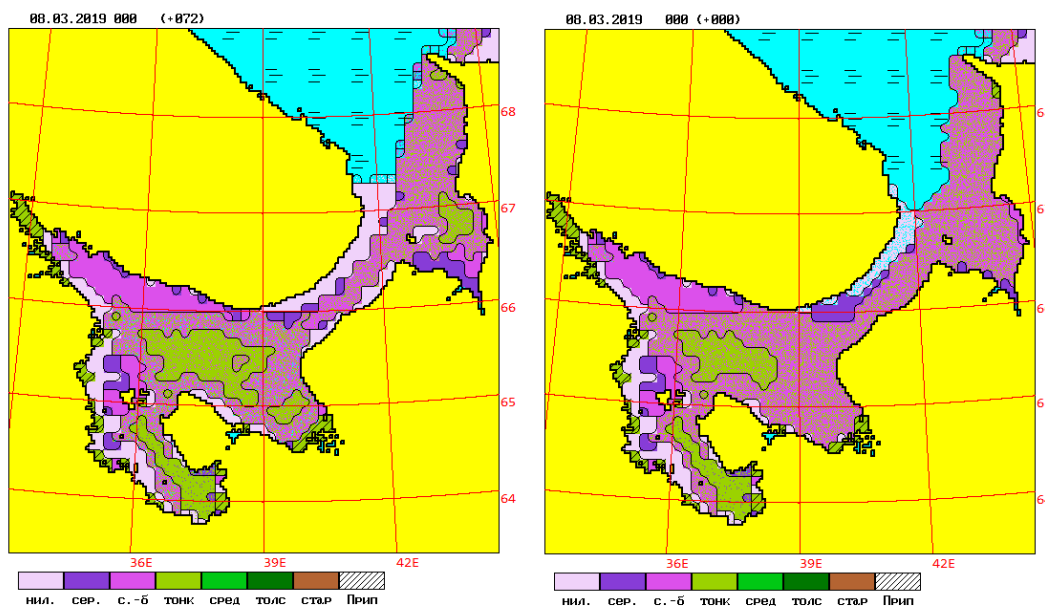
Таким образом, можно сделать вывод, что прогнозы колебаний уровня моря в целом оказались вполне удовлетворительными, хотя погрешности при прогнозировании непериодических колебаний достаточно заметны.

### Примеры прогнозов

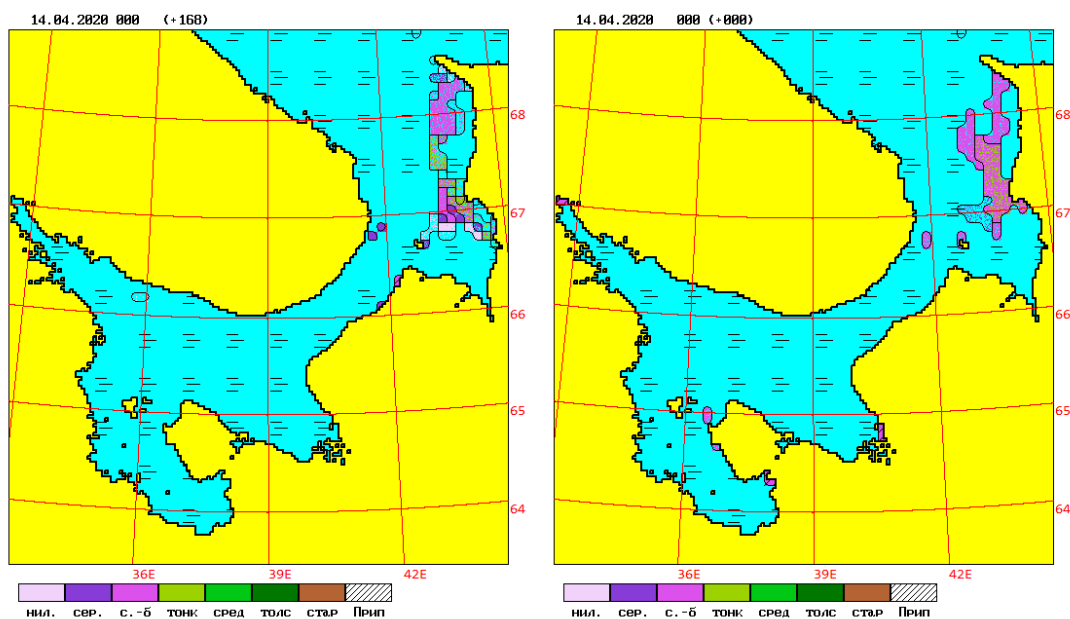
На рис. 6–8 приведены примеры прогнозов распределения ледяного покрова в Белом море.



**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).

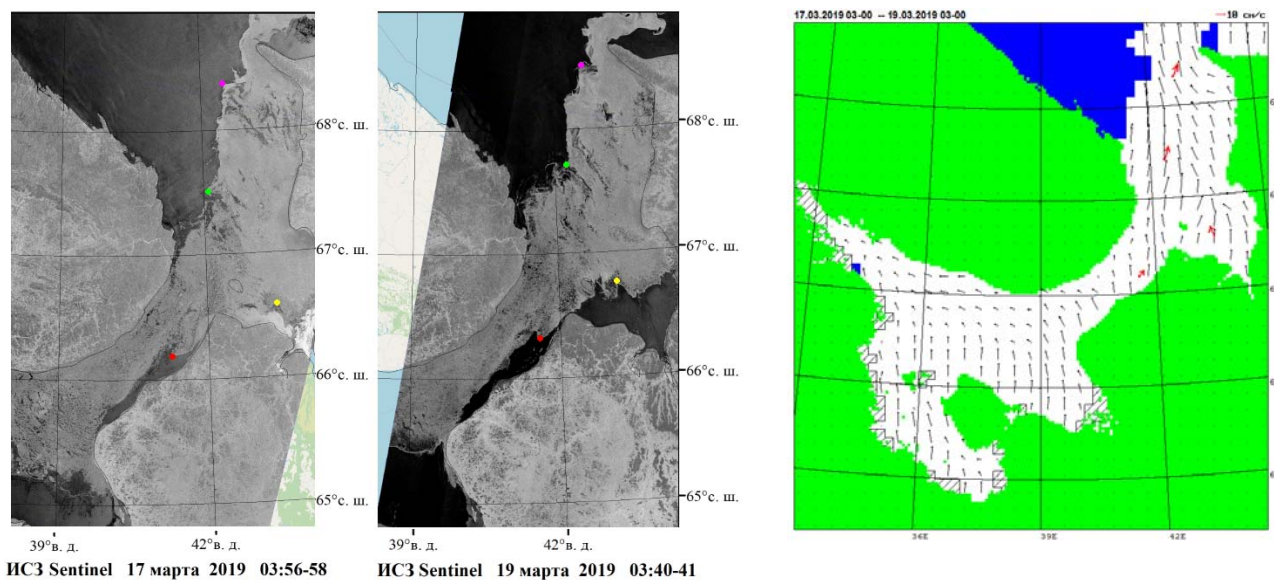


**Рис. 7.** Пример прогноза распределения ледяного покрова в Белом море в середине зимнего сезона: прогностическая карта на 08.03.2019 (прогноз от 05.08.2019 +72 часа) (слева); фактическая карта на 08.03.2019 (справа).

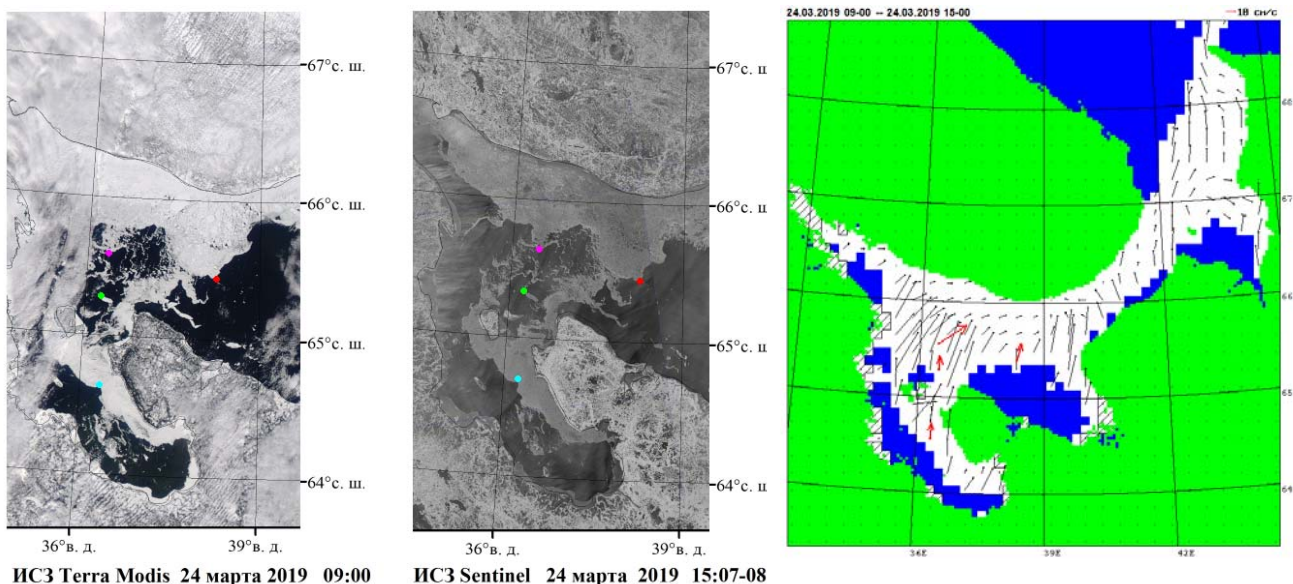


**Рис. 8.** Пример прогноза распределения ледяного покрова в Белом море в конце зимнего сезона: прогностическая карта на 14.04.2020 (прогноз от 07.04.2020 +168 часов) (слева); фактическая карта на 14.04.2020 (справа).

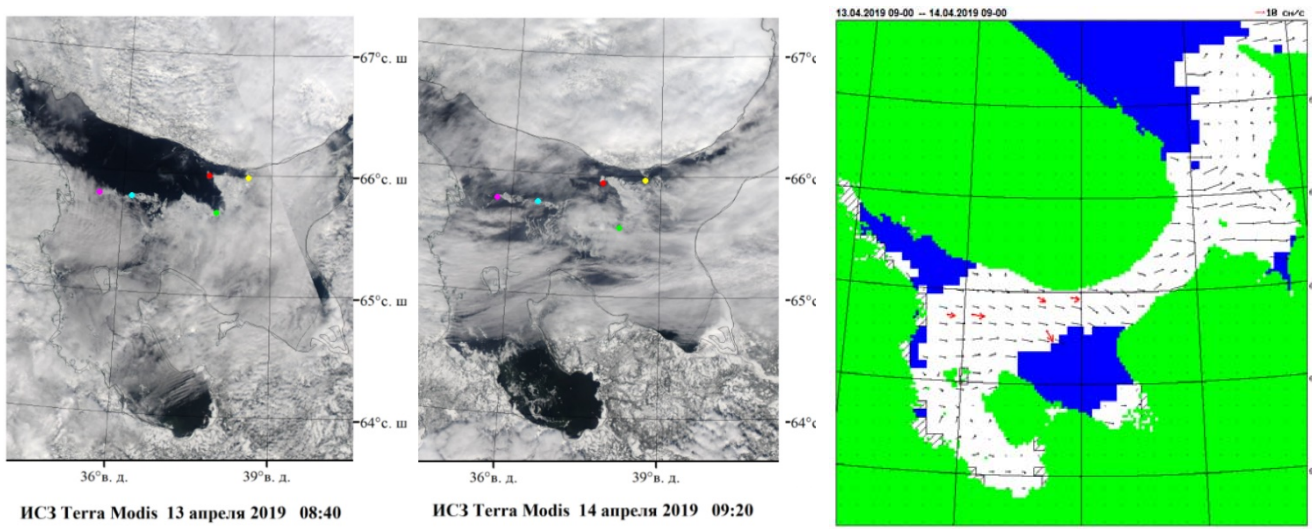
На рис. 9–11 приведены примеры пар последовательных спутниковых снимков и прогнозов дрейфа ледяного покрова в Белом море.



**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).

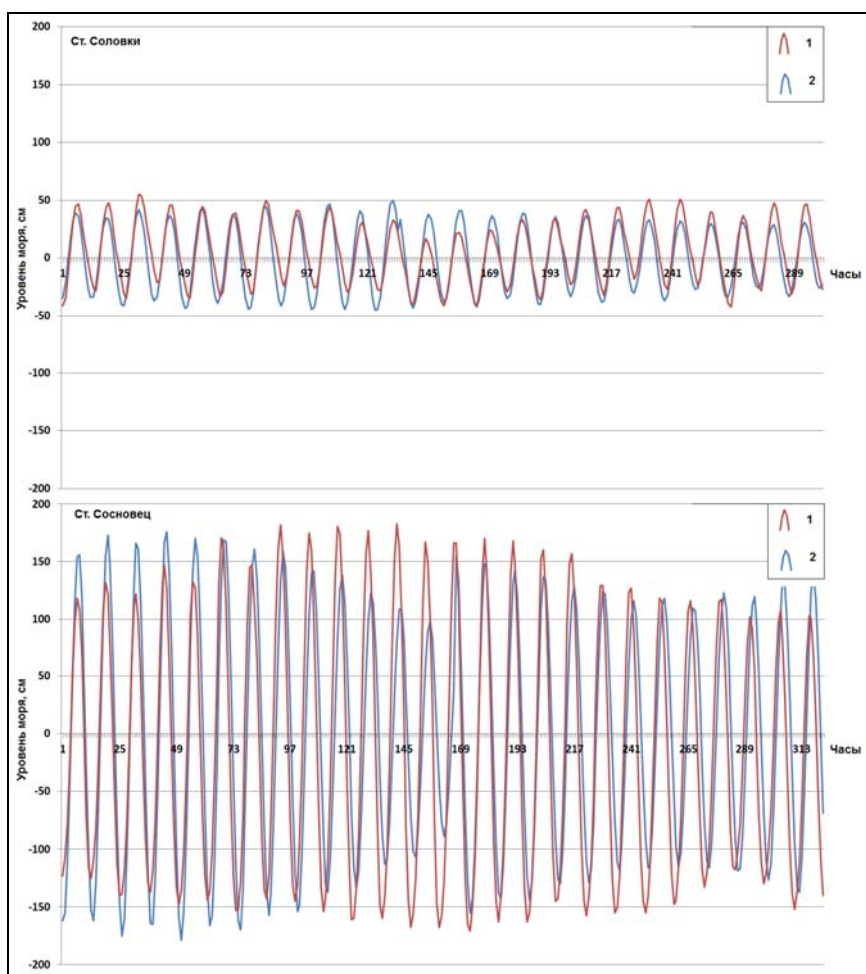


**Рис. 10.** Пример фактического и прогностического дрейфа льда в Белом море в период с 03:00 24.03.2019 по 15:00 24.03.2019: снимки Terra Modis от 24.03.2019 09:00 UTC и Sentinel от 24.03.2019 15:08 UTC (слева); фактический (красные стрелки) и прогностический (черные стрелки) дрейф, осредненный за период 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  $\pm 1$  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.

*Ю.В. Любицкий<sup>1</sup>, С.О. Романский<sup>1</sup>,  
Л.П. Кравчук<sup>2</sup>, О.И. Забродина<sup>2</sup>*

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ  
МЕТОДА И ТЕХНОЛОГИИ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА  
ИЗМЕНЕНИЙ УРОВНЯ МОРЯ В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ  
БЕРИНГОВА МОРЯ**

*<sup>1</sup> Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, г. Владивосток;*

*<sup>2</sup> Камчатское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, г. Петропавловск-Камчатский*

**Введение**

146

Прогнозы изменений уровня моря в юго-западной части Берингова моря необходимы для обеспечения успешной морской деятельности в этом регионе. В частности, своевременное предупреждение населения, административных и хозяйственных органов руководства о возможности возникновения опасных природных явлений (ОЯ), во время которых происходит подтопление расположенных на побережье поселков, гидротехнических сооружений и прочих объектов, позволяет существенно уменьшить материальный ущерб, причиняемый опасными природными явлениями.

Метод и технология краткосрочного (с заблаговременностью 72 часа) прогноза изменений уровня моря в юго-западной части Берингова моря разработаны в ФГБУ «ДВНИГМИ» в рамках темы 1.3.4. «Разработать региональные методы, модели и технологии прогнозов морских характеристик (волнение, течения, уровень моря, лёд, обледенение судов), включая опасные явления, для зон ответственности УГМС региона Дальнего Востока России» Плана научно-исследовательских и технологических работ НИУ Росгидромета на 2020 год.

В соответствии с Планом испытания новых и усовершенствованных технологий (методов) гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов Росгидромета на 2021 г.

оперативные испытания метода и технологии прогноза выполнялись ФГБУ «ДВНИГМИ» и ФГБУ «Камчатское УГМС» с января по декабрь 2021 года.

## 1. Основные характеристики метода и технологии прогноза

Метод прогноза изменений уровня моря в юго-западной части Берингова моря и его технологическая линия детально рассмотрены в работе [5]. Поэтому ограничимся лишь сведениями об их основных структурных элементах.

Пространственно-временные изменения непериодической (сгонно-нагонной) составляющей суммарного (наблюдаемого) уровня моря, как и во многих других современных методах прогноза уровня моря [6–8, 11], рассчитываются с помощью численного гидродинамического моделирования. Используется двумерная нелинейная численная модель совместной динамики воды и льда [1, 4]. Сеточная область численной модели включает акватории Берингова моря, прилегающих к нему районов Тихого океана и Чукотского моря [5].

В качестве начальных условий при численном моделировании используются поля уровня моря и течений, рассчитанные в последнем успешно реализованном сеансе прогноза. В зависимости от наличия и числа пропусков в последовательности предшествующих прогнозов, учитываются поля, полученные для заблаговременности прогноза 12, 24, 36 или 48 часов [5].

Для форсинга численной модели используются поля ветра на высоте 10 м и приземного атмосферного давления на уровне моря с дискретностью 1 час, прогнозируемые с помощью региональной атмосферной модели WRF-ARW [13], имеющей пространственный шаг 15 км [2].

Информация о распределении и сплоченности ледяного покрова в пределах области моделирования формируется по данным Global Forecast System (GFS).

Прилив и суммарный уровень моря вычисляются только в береговых пунктах, для которых выпускается прогноз: Никольское, Ивашка, Кострома, Оссора, Тымлат, Ильпырский, Корф (Тиличики), Апука. Расчет прилива выполняется по гармоническим постоянным одиннадцати основных приливных волн, полученным по материалам наблюдений над уровнем моря в перечисленных пунктах [5].

Прогноз рассчитывается два раза в сутки (от сроков 00 и 12 час ВСВ) на вычислительном комплексе CRAY XC-40 РВЦ ФГБУ «Дальневосточное УГМС». Технологическая линия метода прогноза работает в автоматическом режиме [5].

Во время каждого сеанса прогноза вначале создается файл с прогнозируемыми значениями метеорологических характеристик. Затем из Интернета копируются сведения

GFS о состоянии ледяного покрова в пределах области моделирования. Полученная информация интерполируется в узлы сеточной области численной модели, используемой для расчета неперидической составляющей уровня моря.

Для получения начальных данных для расчета по численной модели из архива считываются поля уровня моря и течений, рассчитанные в последнем успешно выполненном ранее сеансе прогноза, полученные для нужной заблаговременности.

Созданный массив исходной информации используется для вычисления по численной модели совместной динамики воды и льда пространственно-временных изменений неперидической составляющей уровня моря в узлах сеточной области модели (с пространственным шагом 7,5 км).

Расчет приливной составляющей уровня моря в береговых пунктах предусматривает последовательное выполнение следующих шагов: вычисление комплекса астрономических параметров, соответствующих начальной дате прогноза; определение редуционных множителей и астрономических частей фаз основных волн прилива для этих параметров [12]; предвычисление прилива по полученным данным и гармоническим постоянным волн прилива.

Расчеты завершаются формированием текстового файла с информацией о прогнозируемых ежечасных значениях суммарного уровня моря, его неперидической и приливной составляющих в восьми береговых пунктах, для которых выпускается прогноз. Этот файл передается по электронной почте в отдел морских гидрологических прогнозов ФГБУ «Камчатское УГМС».

Во время оперативных испытаний метода прогноза по техническим причинам (выполнялись технологические работы на вычислительном комплексе) не были рассчитаны 9 прогнозов, что составляет 1,2 % от общего числа возможных прогнозов. Это характеризует надежность и стабильность работы технологической линии метода прогноза.

## **2. Данные наблюдений и критерии, использованные для оценки качества прогнозов**

Точность рассчитанных прогнозов уровня моря оценивалась по материалам наблюдений на трех автоматизированных постах (АП) службы цунами Росгидромета: Никольское, Оссора и Корф (Тиличики) (рис. 1, табл. 1).

АП службы цунами выполняют измерения с минутной дискретностью. Для получения по этим данным рядов ежечасных значений уровня моря исходные ряды сглаживались с помощью фильтра Бартлетта с интервалом фильтрации 181 минута [3].



Рис. 1. Пункты, для которых оценивалось качество прогнозов уровня моря.

Таблица 1

Наблюдения над уровнем моря, использованные для оценки качества прогнозов

Пункт	Период наблюдений
Никольское	1.01–31.12.2021 г.
Оссора	1–12.01, 17.01–5.03, 11–18.03, 24.03–24.04, 13–28.05, 4.06–30.08, 18.09–31.12.2021 г.
Корф (Тилички)	1.01–31.12.2021 г.

*Примечание.* Пропуски в наблюдениях продолжительностью менее пяти дней не указаны.

При оценке качества прогнозов суммарного уровня моря сравнивались отклонения данных измерений АП и прогнозируемых уровней моря от их значений, средних для каждого месяца. Необходимость применения этого подхода определяется тем, что данные наблюдений АП службы цунами не приводятся к нулям постов.

Точность прогнозов оценивалась с помощью статистических критериев, утвержденных действующими нормативными документами Росгидромета [9, 10].

При оценке оправдываемости морских прогнозов [10] величину допустимой ошибки прогноза рекомендуется рассчитывать по формуле  $\delta_{\text{доп}} \leq 0,674\sigma_x$ , где  $\sigma_x$  – среднеквадратическое отклонение данных наблюдений от их среднего значения.

В соответствии с данной формулой допустимая ошибка прогноза суммарного уровня моря для АП службы цунами, расположенных на юго-западном побережье Берингова моря, составляет от 24 см (Никольское) до 37 см (Оссора). Представляется, что для решения практических задач эти значения завышены. Поэтому использовались более «строгие» критерии. Допустимая ошибка прогноза суммарного уровня моря для Никольского и Корфа (Тиличиков) принята равной 20 см, для Оссоры – 25 см.

Полученные по наблюдениям и прогнозируемые значения суммарного уровня моря сравнивались для заблаговременностей 24, 36, 48, 60 и 72 часа. Прогноз считался оправдавшимся, если его ошибка по абсолютной величине была меньше или равна допустимой ошибки  $\delta_{\text{доп}}$ .

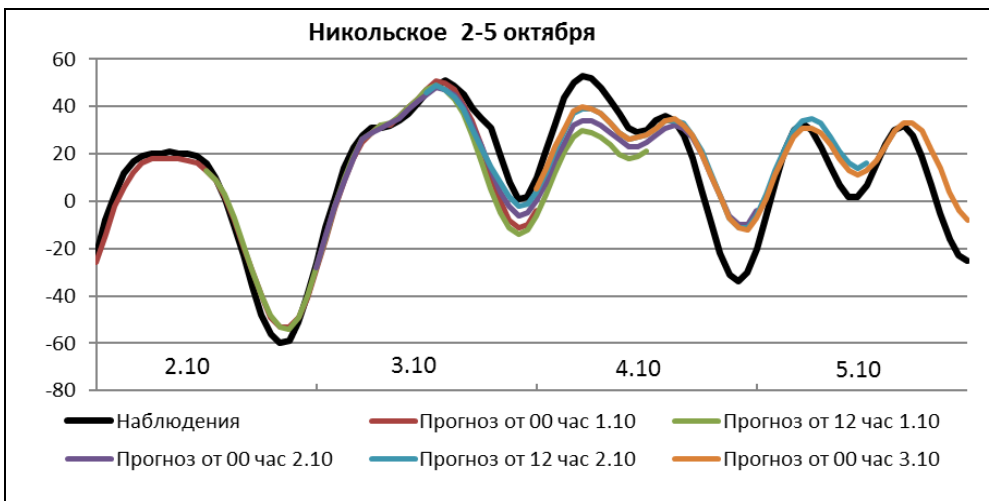
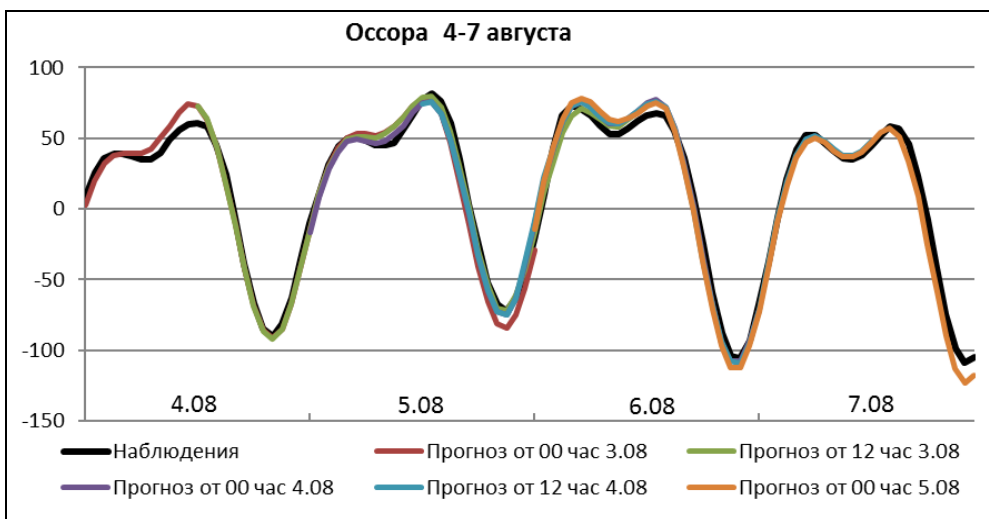
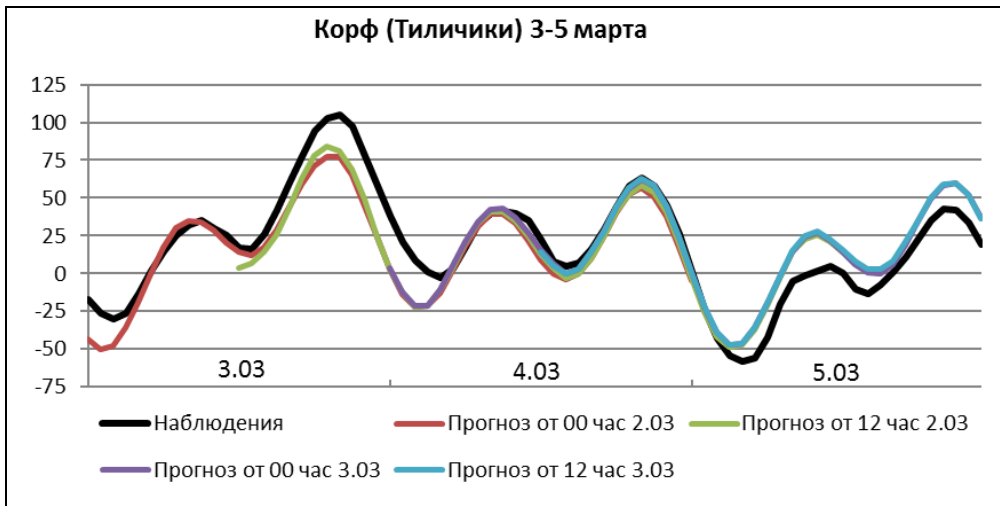
Для получения объективной оценки качества прогноза непериодической составляющей уровня моря рассматривались только наиболее значительные нагоны и сгоны, максимумы которых по абсолютной величине превышали 30 см. Значения непериодической составляющей вычислялись в виде разностей между измеренными уровнями, средним уровнем моря и приливом, рассчитанным непосредственно по анализируемому ряду методом наименьших квадратов [12]. Для каждой сгонно-нагонной ситуации расчеты выполнялись по ряду наблюдений продолжительностью 31 сутки, центральная дата которого соответствовала времени формирования максимума нагона (сгона).

Статистические оценки точности прогнозов рассчитывались по ежечасным данным, независимо от заблаговременности прогноза, для интервалов времени, когда значения непериодической составляющей уровня моря по абсолютной величине превышали 25 см. Допустимые ошибки прогноза вычислялись по формуле  $\delta_{\text{доп}} \leq 0,674\sigma_x$  [10]. Для нагонов значения  $\delta_{\text{доп}}$  составили: в Никольском – 15 см, в Оссоре и Корфе (Тиличиках) – 19 см; для сгонов: в Никольском – 15 см, в Оссоре и Корфе (Тиличиках) – 17 см.

### 3. Оценки качества прогноза суммарного уровня моря

Разработанный метод позволяет прогнозировать суммарные уровни моря в береговых пунктах с достаточно высокой точностью (рис. 2, табл. 2).

Оправдываемость рассчитанных прогнозов превышает 94,4 %, средняя абсолютная ошибка прогноза находится в диапазоне 7,7–10,2 см, среднеквадратическая ошибка прогноза – в интервале 10,2–13,1 см (табл. 2). Значение критерия  $S/\sigma_x$  составляет 0,24–0,29 (табл. 2), что намного меньше его порогового значения, равного 0,67 [10].



**Рис. 2.** Изменения суммарного уровня моря в береговых пунктах по данным наблюдений и результатам прогнозов во время штормовых нагонов, см.

Характеристики качества прогнозов суммарного уровня моря

Пункт	$N$	$\hat{\delta}$ , см	$\delta$ , см	$S$ , см	$S/\sigma_x$	$P$ , %
Никольское	3584	0,5	7,7	10,2	0,28	97,0
Оссора	2744	0,3	10,2	13,1	0,24	95,2
Корф (Тиличики)	3459	-0,1	8,3	10,7	0,29	94,4

*Примечание.*  $N$  – количество сравниваемых наблюдавшихся и прогнозируемых значений уровня моря (заблаговременность прогноза 24, 36, 48, 60, 72 часа);  $\hat{\delta}$  – средняя арифметическая (систематическая) ошибка прогноза;  $\delta$  – средняя абсолютная ошибка прогноза;  $S$  – среднеквадратическая ошибка прогноза;  $\sigma_x$  – среднеквадратическое отклонение значений суммарного уровня моря по данным наблюдений;  $P$  – оправдываемость метода прогноза.

При увеличении заблаговременности оправдываемость прогнозов суммарного уровня моря несколько уменьшается (табл. 3).

Таблица 3

Оправдываемость прогнозов суммарного уровня моря при различной заблаговременности прогноза, %

Пункт	Заблаговременность прогноза, ч				
	24	36	48	60	72
Никольское	98,0	97,4	96,8	96,7	96,1
Оссора	96,0	95,6	95,1	94,2	95,3
Корф (Тиличики)	94,5	94,1	94,5	94,4	94,6
Средняя	96,2	95,7	95,5	95,1	95,3

Наиболее низкая оправдываемость прогнозов суммарного уровня моря получена для ноября–марта (табл. 4). По-видимому это является следствием ухудшения качества прогноза полей ветра и атмосферного давления по атмосферной модели в данный период при усилении циклонической деятельности над Беринговым морем. Косвенно это предположение подтверждает факт низкой оправдываемости прогнозов суммарных уровней моря в относительно недалеко расположенных друг от друга пунктах Оссора и Корф (Тиличики) (рис. 1) в марте (табл. 4).

При этом следует отметить, что в отдельные месяцы (например, в мае) качество прогнозов суммарных уровней моря в Оссоре и Корфе (Тиличиках) может значительно различаться. Причиной этого могут быть погрешности в измерениях АП, тем не менее нельзя исключать возможное влияние на изменения уровня моря в этих пунктах локальных явлений, которые не учитываются в разработанном методе прогноза (например, заторы льда в проливе, соединяющем бухту Скрытная (Корф (Тиличики)) с открытым морем.

## Статистические характеристики качества прогноза суммарного уровня моря по месяцам

Пункт	Месяц	$N$	$\hat{\delta}$ , см	$\delta$ , см	$S$ , см	$P$ , %
Никольское	Январь	305	1,3	6,7	8,3	98,0
	Февраль	270	4,5	9,2	14,2	96,3
	Март	310	-0,1	8,7	13,2	92,9
	Апрель	300	-0,2	8,7	10,5	98,0
	Май	310	0,0	7,7	8,8	100,0
	Июнь	290	-0,1	8,8	11,1	93,1
	Июль	310	0,4	6,4	8,4	99,4
	Август	304	-0,2	6,5	8,1	99,7
	Сентябрь	270	-0,1	6,9	8,4	100,0
	Октябрь	310	0,5	8,8	10,4	97,1
	Ноябрь	300	-0,1	5,6	6,9	99,7
	Декабрь	305	0,5	8,8	11,5	89,8
Оссора	Январь	215	1,6	10,5	15,3	91,6
	Февраль	235	8,2	12,4	14,5	94,5
	Март	150	-0,2	12,9	18,0	85,3
	Апрель	215	0,4	10,0	12,0	99,1
	Май	95	0,1	12,6	14,3	97,9
	Июнь	265	-0,3	10,3	12,3	98,5
	Июль	310	0,3	8,9	11,0	96,5
	Август	294	-0,4	5,5	6,7	100,0
	Сентябрь	100	0,5	8,1	10,0	98,0
	Октябрь	270	0,0	8,6	10,9	98,1
	Ноябрь	285	0,3	11,8	15,3	91,6
	Декабрь	310	0,2	12,4	15,7	91,0
Корф (Тиличики)	Январь	305	-1,8	8,1	9,8	95,7
	Февраль	270	3,2	9,0	10,4	97,0
	Март	310	0,2	12,2	15,4	82,3
	Апрель	285	0,4	6,4	7,4	98,2
	Май	305	0,1	11,4	15,7	84,3
	Июнь	290	-0,5	7,6	9,8	97,2
	Июль	310	-0,4	6,6	7,9	100,0
	Август	304	-0,6	4,8	6,1	100,0
	Сентябрь	270	0,0	5,7	7,3	100,0
	Октябрь	305	-0,2	6,7	8,5	96,7
	Ноябрь	225	-0,1	9,5	11,3	93,3
	Декабрь	280	-0,5	10,9	13,1	88,9

Примечание. Условные обозначения статистических характеристик приводятся в табл. 2.

#### 4. Оценки качества прогноза непериодической (сгонно-нагонной) составляющей уровня моря

Ввиду небольшого количества сгонов и нагонов, возникших в юго-западной части Берингова моря в 2021 г., для получения корректных статистических оценок качества прогноза непериодической составляющей уровня моря ее ежечасные значения, полученные по данным наблюдений, сравнивались с соответствующими им несколькими уровнями, прогнозируемыми с различной заблаговременностью (табл. 5, 6).

Таблица 5

##### Оценки точности прогноза ежечасных значений непериодической составляющей уровня моря во время нагонов

Пункт	Количество нагонов	$N$	$\hat{\delta}$ , см	$\delta$ , см	$S$ , см	$S/\sigma_x$	$P$ , %
Никольское	4	213	-3,7	5,2	6,8	0,21	95,3
Оссора	4	472	-4,3	11,8	14,7	0,38	78,6
Корф (Тиличики)	5	443	-12,8	13,9	15,9	0,45	76,5

Примечание. Условные обозначения статистических характеристик приводятся в табл. 2.

Таблица 6

##### Оценки точности прогноза ежечасных значений непериодической составляющей уровня моря во время сгонов

Пункт	Количество сгонов	$N$	$\hat{\delta}$ , см	$\delta$ , см	$S$ , см	$S/\sigma_x$	$P$ , %
Никольское	1	37	9,4	9,4	9,5	0,34	100,0
Оссора	3	284	9,9	10,6	12,0	0,37	89,8
Корф (Тиличики)	2	252	9,7	10,1	12,8	0,40	73,8

Примечание. Условные обозначения статистических характеристик приводятся в табл. 2.

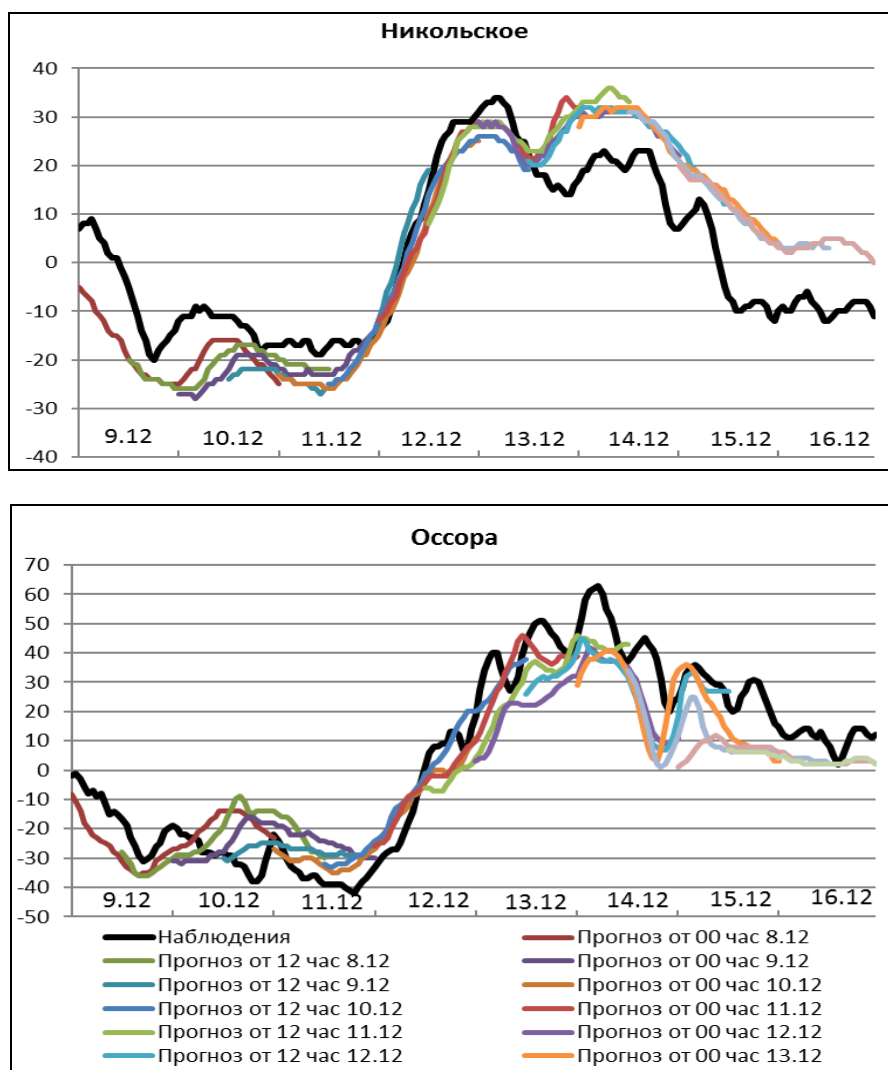
Разработанный метод обеспечивает вполне удовлетворительную точность прогноза непериодической составляющей уровня моря во время нагонов и сгонов.

Для нагонов средняя абсолютная ошибка прогноза непериодической составляющей уровня моря находится в диапазоне 5,2–13,9 см, среднеквадратическая ошибка прогноза не превышает 15,9 см, отношение  $S/\sigma_x$  – 0,45 (пороговое значение равно 0,67), оправдываемость прогнозов составляет более 76 процентов (табл. 5).

Для сгонов средняя абсолютная ошибка прогноза непериодической составляющей уровня моря не превышает 10,6 см, среднеквадратическая ошибка прогноза – 12,8 см, отношение  $S/\sigma_x$  – 0,40, оправдываемость прогнозов находится в диапазоне от 73,8 до 100 % (табл. 6).

Наиболее качественно изменения непериодической составляющей уровня моря во время нагонов и сгонов прогнозируются для Никольского (табл. 5, 6). Это объясняется тем, что ширина шельфа о. Беринга невелика, следовательно, влияние ветра, который не всегда адекватно прогнозируется с помощью атмосферной модели, на процессы формирования и развития нагонов и сгонов незначительно. Основную роль в этих процессах играют изменения приземного атмосферного давления, точность прогноза которого достаточно высокая.

Рассчитанные прогнозы хорошо воспроизводят изменения непериодической составляющей уровня моря во времени для большинства сгонно-нагонных ситуаций (рис. 3).

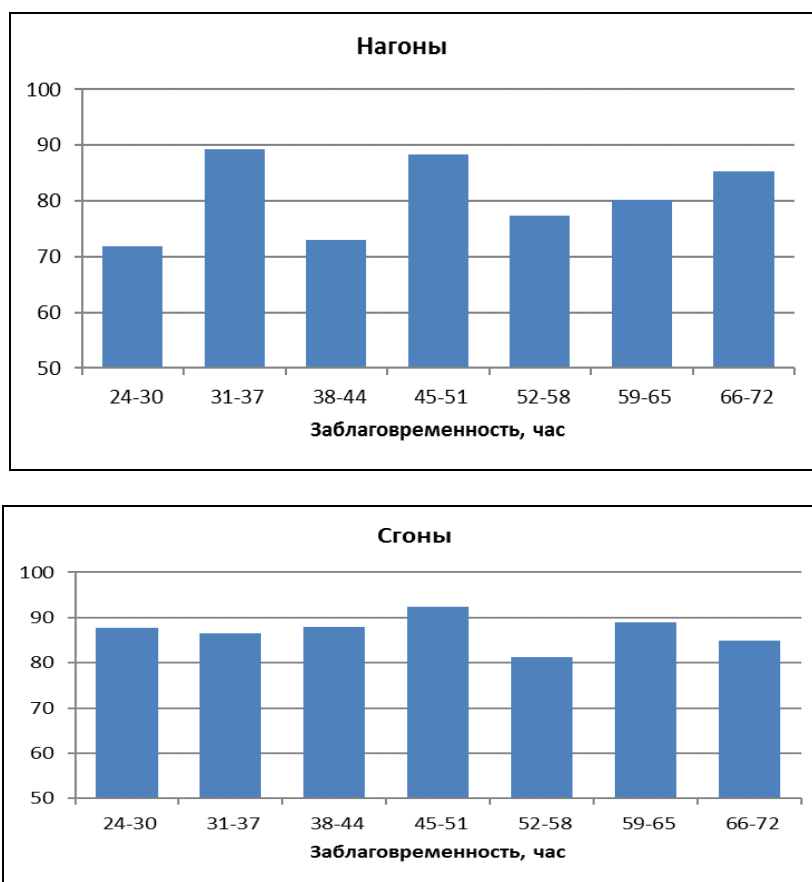


**Рис. 3.** Изменения сгонно-нагонной составляющей уровня моря 9–16 декабря по данным наблюдений и результатам прогнозов, см.

Тем не менее средняя арифметическая (систематическая) ошибка прогноза значений непериодической составляющей уровня моря во время нагонов во всех пунктах отрицательна (табл. 5), а во время сгонов – положительна (табл. 6). Это позволяет сделать вывод, что

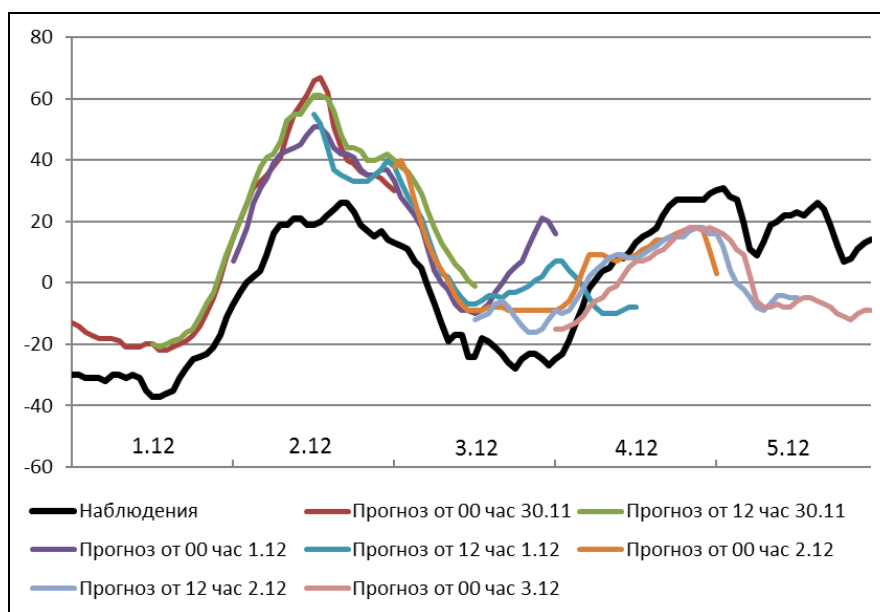
используемая в методе прогноза численная модель несколько занижает величину сгонно-нагонных колебаний уровня моря. Возможно причиной этой особенности является недостаточно подробный учет морфометрии моделируемого объекта. Поэтому при усовершенствовании метода прогноза необходимо детализировать расчетную сетку модели в прибрежных районах.

Изменения оправдываемости прогнозов сгонно-нагонных колебаний уровня моря в зависимости от заблаговременности прогноза, рассчитанные по данным, полученным для всех пунктов, имеют случайный характер (рис. 4). По-видимому, причиной этого является небольшой объем имеющейся информации.



**Рис. 4.** Оправдываемость прогнозов сгонно-нагонных колебаний уровня моря при различной заблаговременности прогноза, %.

При общем достаточно высоком качестве прогноза нагонов и сгонов в береговых пунктах имеются ситуации, для которых прогнозы не оправдались. Изменения уровня моря во время одной из таких ситуаций представлены на рис. 5. В соответствии с рассчитанными прогнозами в Оссоре 2–3 декабря должен был возникнуть нагон. По данным наблюдений над уровнем моря нагон действительно возник, но его величина была существенно меньше прогнозируемой (рис. 5).



**Рис. 5.** Изменения непериодической составляющей уровня моря в Оссоре 1–5 декабря по данным наблюдений и результатам прогнозов, см.

Представляется, что основной причиной ухудшения качества прогнозов уровня моря в отдельные периоды является недостаточно высокая точность прогноза полей ветра и атмосферного давления по атмосферной модели. Кроме того, как было отмечено ранее, наблюдаемые изменения уровня моря могут искажаться локальными эффектами, не учитываемыми в разработанном методе прогноза.

## **5. Результаты сравнения качества прогнозов, рассчитанных в рамках испытываемого и действующего методов прогноза**

Метод краткосрочного прогноза изменений уровня моря в юго-западной части Берингова моря разработан впервые.

В оперативной практике ФГБУ «ДВНИГМИ» и дальневосточных УГМС Росгидромета, в соответствии с решением ЦМКП Росгидромета от 18.04.2019, в настоящее время используется метод краткосрочного прогноза уровня моря на побережье и акватории Охотского и Японского морей и на восточном побережье полуострова Камчатка [4]. В дальнейшем этот метод обозначим термином «действующий метод прогноза». Области, для которых рассчитывается прогноз уровня моря в рамках испытываемого и действующего методов, в районе восточного побережья полуострова Камчатка пересекаются. Это позволяет сравнить результаты прогнозов, рассчитанных по этим методам, для пунктов Оссора и Корф (Тиличики) (в Никольском прогнозы изменений уровня моря в действующем методе не рассчитываются).

Точность прогноза суммарного уровня моря в Оссоре и Корфе (Тиличиках) по испытываемому методу выше, чем по действующему методу (табл. 7). Тем не менее улучшение качества прогнозов относительно невелико. Это является следствием того, что в обоих методах используются одинаковые принципы и технологии расчета приливной составляющей уровня моря, а значительные сгонно-нагонные колебания уровня моря, рассчитываемые с помощью численного моделирования, в юго-западной части Берингова моря в 2021 г. возникали относительно редко.

Таблица 7

**Характеристики качества прогнозов суммарного уровня моря по испытываемому и действующему методам прогноза**

Пункт	Метод	$N$	$\hat{\delta}$ , см	$\delta$ , см	$S$ , см	$S/\sigma_x$	$P$ , %
Оссора	Испытываемый	2744	0,3	10,2	13,1	0,24	95,2
	Действующий	2744	2,1	10,3	13,1	0,24	95,1
Корф (Тиличики)	Испытываемый	3459	-0,1	8,3	10,7	0,29	94,4
	Действующий	3459	0,9	8,7	11,1	0,30	94,1

*Примечание.* Условные обозначения статистических характеристик приводятся в табл. 2.

Точность прогноза непериодической составляющей уровня моря во время значительных нагонов и сгонов по испытываемому методу выше, чем по действующему методу (табл. 8, 9). Наиболее явно это выражено для сгонов (табл. 9).

Таблица 8

**Оценки точности прогноза ежечасных значений непериодической составляющей уровня моря во время нагонов по испытываемому и действующему методам прогноза**

Пункт	Метод	$N$	$\hat{\delta}$ , см	$\delta$ , см	$S$ , см	$S/\sigma_x$	$P$ , %
Оссора	Испытываемый	472	-4,3	11,8	14,7	0,38	78,6
	Действующий	472	4,1	11,9	14,7	0,38	78,5
Корф (Тиличики)	Испытываемый	443	-12,8	13,9	15,9	0,45	76,5
	Действующий	443	-13,2	14,3	16,3	0,46	75,2

*Примечание.* Условные обозначения статистических характеристик приводятся в табл. 2.

Таблица 9

**Оценки точности прогноза ежечасных значений непериодической составляющей уровня моря во время нагонов по испытываемому и действующему методам прогноза**

Пункт	Метод	$N$	$\hat{\delta}$ , см	$\delta$ , см	$S$ , см	$S/\sigma_x$	$P$ , %
Оссора	Испытываемый	472	-4,3	11,8	14,7	0,38	78,6
	Действующий	472	4,1	11,9	14,7	0,38	78,5
Корф (Тиличики)	Испытываемый	443	-12,8	13,9	15,9	0,45	76,5
	Действующий	443	-13,2	14,3	16,3	0,46	75,2

*Примечание.* Условные обозначения статистических характеристик приводятся в табл. 2.

## Выводы (по тексту Решения ЦМКП от 9 июня 2022 года)

### ЦМКП считает целесообразным:

– одобрить работу ФГБУ «ДВНИГМИ» по созданию метода и технологии краткосрочного (с заблаговременностью до 72 часов) прогноза изменений уровня моря в юго-западной части Берингова моря.

### ЦМКП рекомендует:

– использовать разработанный метод краткосрочного (с заблаговременностью до 72 часов) прогноза изменений уровня моря в юго-западной части Берингова моря в оперативной практике ФГБУ «Камчатское УГМС» – в качестве основного;

– ФГБУ «Дальневосточное УГМС» обеспечить производственную эксплуатацию оперативной технологической линии разработанного метода прогноза;

– авторам метода учесть высказанные на заседании ЦМКП замечания и предложения для последующего совершенствования метода.

## Список литературы

1. *Ашик И.М.* Численный гидродинамический метод прогноза колебаний уровня в юго-восточной части Баренцева и юго-западной части Карского моря // Результаты испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических прогнозов. – 2005. – Информационный сборник № 31. – С. 85–103.

2. *Вербицкая Е.М., Романский С.О.* Конфигурация модели WRF-ARW для прогноза погоды в Дальневосточном регионе // 65 лет ДВНИГМИ. – Владивосток: Дальнаука, 2015. – С. 172–203.

3. *Любицкий Ю.В., Манько А.Н., Соколов О.В.* Перспективы использования данных измерений автоматизированных постов службы цунами для формирования многолетних массивов наблюдений над уровнем моря // 65 лет ДВНИГМИ. – Владивосток: Дальнаука, 2015. – С. 8–32.

4. *Любицкий Ю.В.* Метод краткосрочного прогноза уровня моря на побережье и акватории Охотского и Японского морей и на восточном побережье полуострова Камчатка // Труды ДВНИГМИ. – 2017. – Вып. 155. – С. 32–68.

5. *Любицкий Ю.В., Романский С.О.* Метод и технология краткосрочного прогноза изменений уровня моря в юго-западной части Берингова моря // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2022. – № 1 (383). – С. 71–88.

6. *Попов С.К., Лобов А.Л.* Гидродинамическое моделирование наводнений в Санкт-Петербурге с учетом работающей дамбы // Метеорология и гидрология. – 2017. – № 4. – С. 80–89.

7. *Попов С.К., Лобов А.Л.* Диагноз и прогноз уровня Каспийского моря по оперативной гидродинамической модели // Метеорология и гидрология. – 2017. – № 9. – С. 90–99.

8. *Попов С.К., Лобов А.Л.* Краткосрочные прогнозы колебаний уровня Азовского моря в безледный период 2017 года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2018. – № 3 (369). – С. 104–118.
9. РД 52.27.284-91. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиофизических прогнозов: Методические указания. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1991. – 150 с.
10. РД 52.27.759–2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. – М.: Триада-ЛТД, 2011. – 195 с.
11. *Bernier N.B., Thompson K.R.* Deterministic and ensemble storm surge prediction for Atlantic Canada with lead times of hours to ten days // *Ocean Modelling*. – 2015. – Vol. 86. – P. 114–127.
12. *Foreman M.G.G.* Manual for tidal heights analysis and prediction // Pacific Marine Science Report 77-10, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Victoria, B.C. – 2004. – 58 p.
13. *Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X., Wang W., Powers J.G.* A description of the advanced research WRF version 3 (No. NCAR/TN-475+STR). University Corporation for atmospheric research. – 2008. – 125 p.

## **МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОЛЕЗНОЙ ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТИ СРЕДНЕСРОЧНЫХ ПРОГНОЗОВ ПОГОДЫ**

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва*

### **Введение**

Совершенствование технологий среднесрочного прогнозирования погоды заблаговременностью от 4 до 10 суток [1] на основе глобальных гидродинамических моделей [4], методов ансамблевого прогнозирования [3], методик постпроцессинга позволяет повышать заблаговременность среднесрочных прогнозов погоды. В этой связи в качестве актуальной задачи возникает необходимость расчета максимальной заблаговременности прогнозов для используемых технологий среднесрочного прогнозирования. Методика таких расчетов необходима для расчета показателя «Увеличение заблаговременности базовых прогнозов погоды по крупным административным центрам субъектов Российской Федерации с достоверностью свыше 70 процентов», который используется для оценки деятельности Росгидромета.

161

Развитие методов и технологий среднесрочного прогнозирования, как показывает опыт, прежде всего приводит к увеличению заблаговременности прогнозирования температуры воздуха у земли (на высоте 2 метра). Эти прогнозы имеют большое значение для населения, коммунального хозяйства, энергетики, решения прикладных задач. Поэтому прогноз температуры воздуха у земли может рассматриваться как базовый, максимальная заблаговременность которого может рассматриваться в качестве одного из важнейших показателей совершенства технологии среднесрочного прогнозирования.

Целью данной работы является формализация методики расчета полезной (максимальной) заблаговременности прогнозирования температуры воздуха у поверхности земли.

## Описание методики расчета

Для решения поставленной задачи использован показатель «Средняя полезная заблаговременность прогноза» (далее – Показатель). Показатель представляет собой осредненные значения максимальной заблаговременности прогнозов максимальной и минимальной температуры воздуха у земли при условии, что эти прогнозы сохраняют свойство полезности. Осреднение производится за оценочный период времени (один год) и по определенной территории (по наблюдательным пунктам, например по метеостанциям в административных центрах субъектов Российской Федерации). В течение оценочного периода времени ежедневно выпускаются среднесрочные прогнозы погоды (включая прогноз минимальной и максимальной температуры).

Опыт метеорологического обеспечения различных потребителей дает основание считать, что среднесрочные прогнозы погоды сохраняют практическую полезность, если их средняя оправдываемость (достоверность) превышает 70 %. При необходимости может быть использовано и другое значение достоверности прогнозов для сохранения свойства их полезности.

Под *оправдываемостью прогноза* метеорологической величины (температуры) понимается в соответствии с РД 52.04.563–2013 [4, пункт 3.1.9] степень соответствия диапазона (градации) прогнозируемого значения метеорологической величины (с учетом допуска) фактически наблюдавшемуся значению метеорологической величины, выраженная в процентах.

Под *заблаговременностью прогноза* максимальной температуры днем и минимальной температуры ночью (прогноза температурного режима) для конкретных суток в рамках данной методики понимается интервал времени (в пределах периода действия среднесрочного прогноза) между публикацией прогноза минимальной и максимальной температуры на конкретные сутки (четвертые, пятые, ..., десятые сутки) на сайте, или распространением его другим образом) и окончанием конкретных суток, для которых выпущен прогноз. В соответствии с этим определением заблаговременность прогнозов температурного режима представляется с дискретностью 24 часа (одни сутки).

## Алгоритм расчета Показателя

Алгоритм расчета Показателя включает два этапа. *На первом этапе* рассчитываются (с суточной дискретностью) осредненные значения оправдываемости прогнозов температурного режима для различной заблаговременности прогнозов. Осреднение осуществляется для оценочного периода времени и заданного перечня пунктов, по которым

составляется прогноз. Для возможности количественной оценки ошибок прогноза, в пунктах прогноза должны располагаться наблюдательные пункты (метеостанции), данные которых используются для расчета Показателя. Для расчетов могут использоваться среднесрочные прогнозы, привязанные к основным срокам метеорологических наблюдений (00.00, 12.00 ч ВСВ). На этом этапе расчетов начало периода заблаговременности прогнозов отсчитывается от срока метеорологических наблюдений, к которому привязан среднесрочный прогноз погоды.

На втором этапе путем линейной интерполяции между значениями средней оправдываемости прогнозов температурного режима для различной заблаговременности (с дискретностью 24 часа) рассчитывается значение осредненной заблаговременности прогнозов, соответствующее заданному минимальному значению оправдываемости прогнозов, при котором сохраняется их практическая полезность. Это значение корректируется на период времени, необходимый для выпуска среднесрочных прогнозов.

Рассмотрим формализацию расчетов на этих этапах.

*Первый этап.* Рассчитываются значения промежуточного показателя  $K_i$ , представляющие собой средние значения оправдываемости прогнозов температурного режима для значений заблаговременности для оценочного периода времени и заданного перечня пунктов прогнозов (с суточной дискретностью). Расчетная формула имеет вид:

$$K_i = \frac{1}{NM} \sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{T_{ijk}^{\max} + T_{ijk}^{\min}}{2}, \quad (1)$$

где  $K_i$  – среднее значение оправдываемости прогноза приземной температуры воздуха с  $i$ -той заблаговременностью в оценочном периоде для заданного перечня пунктов прогноза (соответственно и наблюдательных пунктов), проценты;  $T_{ijk}^{\max}$  – оправдываемость прогноза максимальной температуры воздуха с  $i$ -й заблаговременностью (для  $i$ -х суток прогноза), выпущенного в  $j$ -е сутки оценочного периода для  $k$ -того пункта прогноза, %;  $T_{ijk}^{\min}$  – оправдываемость прогноза минимальной температуры воздуха с  $i$ -й заблаговременностью, выпущенного в  $j$ -е сутки оценочного периода для  $k$ -го пункта прогноза, %;  $j = 1, \dots, N$ ,  $N$  – число дней в оценочном периоде/году;  $k = 1, \dots, M$ ,  $M$  – число пунктов прогноза (наблюдательных пунктов);  $i = 4, \dots, 10$  – номер суток, для которых составлен прогноз (соответствует заблаговременности прогноза от четырех до 10 суток).

Значения оправдываемости (в процентах) конкретных прогнозов максимальной  $T_{ijk}^{\max}$  и минимальной температуры воздуха  $T_{ijk}^{\min}$  могут быть рассчитаны по аналогии с оценкой

оправдываемости краткосрочных прогнозов погоды [2] путем сравнения абсолютной ошибки каждого прогноза с предельно допустимым значением этой ошибки. При расчетах допустимая ошибка прогноза температуры воздуха была принята равной 3,5°C. Соответствующая информация представлена в табл. 1.

Таблица 1

**Связь достоверности (оправдываемости) прогноза температуры воздуха с ошибкой прогноза**

Соотношение абсолютной ошибки прогноза с предельно допустимым значением ошибки прогноза	Оправдываемость прогноза, %
Абсолютная ошибка прогноза $\leq 3,5$ °C	100
Абсолютная ошибка прогноза $> 3,5$ °C	0

При необходимости предельно допустимое значение ошибки прогноза температуры (3,5°C) может быть изменено.

Таким образом, для заданных оценочного периода времени (как правило, одного года) и перечня пунктов прогноза (наблюдательных пунктов), рассчитанный промежуточный показатель  $K_i$  оказывается функцией (монотонно убывающей) только заблаговременности прогноза в сутках (индекс  $i = 4, \dots, 10$ ).

*Второй этап.* Полученные значения промежуточного показателя  $K_i$  для прогнозов с заблаговременностью от 96 часов (четырёх суток) до 240 часов (10 суток), то есть для каждого значения индекса  $i$ , должны сравниваться с минимальным (пороговым) значением оправдываемости  $K^*$ , при котором сохраняется практическая полезность прогноза. Для расчетов Показателя принималось  $K^* = 70$  %. В результате процедуры сравнения определяется минимальное значение индекса  $i$ , для которого  $K_i$  оказывается меньшим или равным пороговому значению  $K^*$ . Обозначим это значение индекса как  $ii$  ( $K_{ii} \leq K^*$ ).

В этих обозначениях максимальное значение полезной заблаговременности прогноза  $Z_{70\%}$  (в часах) будет находиться в диапазоне от  $(ii - 1) \times 24$  часа до  $ii \times 24$  часа.

Значение заблаговременности прогнозов  $Z_{70\%}$  (без учета технологических затрат времени на выпуск и распространение прогнозов  $T_{\text{вып}}$ ) может быть определено методом линейной интерполяции. Формула для расчета  $Z_{70\%}^*$ , учитывающая затраты времени  $T_{\text{вып}}$  (в часах), имеет вид:

$$Z_{70\%}^* = \left( ii - 1 + \frac{K_{ii-1} - K^*}{K_{ii-1} - K_{ii}} \right) \times 24 - T_{\text{вып}}. \quad (2)$$

Точность расчета Показателя целесообразно ограничить единицами часов. Поэтому полученное значение  $Z_{70\%}^*$  (в часах) округляется до целого значения в меньшую сторону путем отбрасывания дробной части.

### Примеры расчетов

В табл. 2 в качестве примера представлены результаты расчетов полезной заблаговременности среднесрочных прогнозов температуры воздуха у земли по технологии ФГБУ «Гидрометцентр России». Затраты времени на подготовку прогноза ( $T_{\text{вып}}$ ) для этой технологии составляли 7 часов. Осреднение значений оправдываемости прогнозов производилось по 87 пунктам на территории Российской Федерации в периоды с 2 ноября 2014 года по 1 ноября 2015 года и с 1 января по 31 декабря 2022 года.

*Таблица 2*

**Полезная заблаговременность среднесрочных прогнозов температуры**

Период расчета	Полезная заблаговременность, часы
С 02.11.2014 по 01.11.2015 г.	163
С 01.01.2022 по 31.12.2022 г.	185

Из таблицы следует, что с 2015 по 2021 год полезная заблаговременность прогнозов температуры увеличилась на 22 часа. Это, в частности, связано с внедрением в эксплуатацию в 2018 году суперкомпьютера CRAY XC40-LC, позволившего создать и использовать более совершенные прогностические модели и технологии.

### Заключение

При использовании для расчетов по представленному алгоритму необходимых исходных данных (перечень наблюдательных пунктов, располагающихся в крупных административных центрах субъектов Российской Федерации, необходимого оценочного периода, значений ошибок прогнозов), а также рассматривая среднесрочные прогнозы температуры как базовые, полученное значение  $Z_{70\%}$  будет являться показателем «Заблаговременность базовых прогнозов погоды по крупным административным центрам

субъектов Российской Федерации с достоверностью свыше 70 процентов».

Этот показатель может быть использован (в динамике от года к году) для расчета показателя «Увеличение заблаговременности базовых прогнозов погоды по крупным административным центрам субъектов Российской Федерации с достоверностью свыше 70 процентов».

Данные, необходимые для расчета Показателя, формируются в ФГБУ «Гидрометцентр России» по результатам мониторинга качества (оправдываемости) среднесрочных прогнозов погоды, выпускаемых по начальному сроку 00.00 или 12.00 ч ВСВ с использованием для оценки достоверности прогнозов результатов метеорологических измерений, получаемых с сети наблюдательных пунктов Росгидромета.

Методика оценки полезной заблаговременности базовых среднесрочных прогнозов погоды 9 июня 2022 года была рассмотрена на заседании Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета (пункт 5) и рекомендована для внедрения в качестве основного расчетного метода оценки полезной заблаговременности базовых среднесрочных прогнозов погоды в ФГБУ «Гидрометцентр России» (пункт 5.3 решения ЦМКП).

#### Список литературы

166

1. Наставление по Глобальной системе обработки данных и прогнозирования. Дополнение IV к Техническому регламенту ВМО // ВМО-№ 485. – 2017. – 161 с. – [https://meteoinfo.ru/images/media/books-docs/WMO/485\\_ru.pdf](https://meteoinfo.ru/images/media/books-docs/WMO/485_ru.pdf).

2. РД 52.04.563-2013. Инструкция по подготовке и передаче штормовых сообщений наблюдательными подразделениями.

2. Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Травова (Махнорылова) С.В., Гойман Г.С., Мизяк В.Г., Рогутов В.С., Шляева А.В., Юрова А.Ю. Развитие глобальной полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ в 2009–2019 гг. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2019. – № 4 (374). – С. 77–91.

4. Рогутов В.С., Толстых М.А., Мизяк В.Г. Система ансамблевого прогноза на основе локального ансамблевого фильтра Калмана // Труды Гидрометцентра России. – 2017. – Вып. 364. – С. 5–19.

*В.И. Денисова, В.А. Гудкова,  
Г.А. Лашина, П.В. Николаев*

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОПРАВДЫВАЕМОСТИ  
КРАТКОСРОЧНЫХ, СРЕДНЕСРОЧНЫХ И ДОЛГОСРОЧНЫХ  
ПРОГНОЗОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ  
И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕЕ ВЕРИФИКАЦИИ**

*Институт прикладной геофизики имени Е.К. Федорова, г. Москва*

**Введение**

С технологическим прогрессом человечества и с развитием все более мощной технической наземной и космической инфраструктуры общества все острее дают о себе знать факторы космической погоды, нарушающие ее нормальное функционирование и создающие серьезные риски при осуществлении космической деятельности. Учет этих факторов и парирование их негативного воздействия становится необходимой составной частью обеспечения безопасности космической деятельности [2]. Космической погодой называют совокупность явлений, происходящих в верхних слоях земной атмосферы, в ионосфере и околоземном космическом пространстве. Впервые понятие «погоды в космосе» (космической погоды) ввел гениальный ученый, участник знаменитых Папанинских событий, Герой Советского Союза, академик Евгений Константинович Федоров (1910–1981).

Главным научно-исследовательским учреждением Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) по ионосферным, магнитным и гелиогеофизическим наблюдениям на государственной наблюдательной сети является Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова (ФГБУ «ИПГ»), г. Москва [1, 3]. Прогнозы космической погоды разной заблаговременности (краткосрочные, среднесрочные, долгосрочные) выпускаются ФГБУ «ИПГ» с момента образования в институте Гелиогеофизической службы Росгидромета [1].

## Область применения

Показатель расчета оправдываемости прогнозов космической погоды включен в Государственную программу «Охрана окружающей среды». Методика «Расчет показателя "Поддержание уровня оправдываемости краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов космической погоды на уровне не ниже 92 %"» (далее – Методика) разработана для расчета показателя комплекса процессных мероприятий «Обеспечение деятельности Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и подведомственных учреждений» государственной программы Российской Федерации «Охрана окружающей среды» в отношении гелиогеофизических прогнозов предупреждения об опасных и неблагоприятных гелиогеофизических явлениях. Гелиогеофизические прогнозы и предупреждения предоставляются органам государственной власти, МЧС, хозяйствующим субъектам и населению. Настоящая методика оценки оправдываемости гелиогеофизических прогнозов выпущена взамен временной инструкции по оценке оправдываемости ионосферных и магнитных прогнозов.

В методике установлены:

- периодичность составления гелиогеофизических прогнозов различной категории срочности и уточнений к ним, штормовых предупреждений об опасных и неблагоприятных гелиогеофизических явлениях;
- терминология, применяемая для описания ожидаемого гелиогеофизического явления и его развития, градации, а также качественные характеристики прогнозируемых гелиогеофизических явлений;
- алгоритм расчета показателя уровня оправдываемости краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов космической погоды.

Методика предназначена для оценки оправдываемости краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов космической погоды, выпускаемых в службе, с целью контроля показателя не ниже 92 %.

### Гелиогеофизические прогнозы. Объекты прогноза и контроля

Источниками формирования фактических данных в методике являются данные наблюдательных сетей Росгидромета. Гелиогеофизические прогнозы различной категории срочности по территории зоны ответственности составляют следующие оперативно-прогностические подразделения Гелиогеофизической службы Росгидромета:

- главный гелиогеофизический центр – ФГБУ «ИПГ»;
- региональный центр мониторинга геофизической обстановки ФГБУ «Мурманское УГМС» – Арктический регион;

- региональный центр мониторинга геофизической обстановки ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» – Западно-Сибирский регион;
- региональный центр мониторинга геофизической обстановки ФГБУ «Дальневосточное УГМС» – Дальневосточный регион.

Процесс составления гелиогеофизических прогнозов состоит из двух этапов:

1. Этап накопления данных.
2. Этап прогнозирования.

Каждый гелиогеофизический прогноз имеет срок действия, то есть время начала интервала, для которого составляется прогноз, и время окончания указанного интервала, определяющего заблаговременность прогноза. Одной из наиболее важных характеристик прогноза является его информативность. При практическом использовании методов прогнозирования особую роль играют такие характеристики, как состав и объем исходных данных и их доступность в оперативном режиме.

Ответственным федеральным органом исполнительной власти за формирование показателя «Поддержание уровня оправдываемости краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов космической погоды на уровне не ниже 92 %» является Росгидромет.

На рисунке представлена блок-схема входных данных методики.



**Рисунок.** Блок-схема входных данных методики «Поддержание уровня оправдываемости краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов космической погоды на уровне не ниже 92 %».

Методика позволяет выпускать прогнозы различной заблаговременности (краткосрочные, среднесрочные, долгосрочные) по пяти показателям, характеризующим космическую погоду:

- интегральные индексы солнечной активности;
- солнечные вспышки;
- степени возмущенности магнитного поля Земли;
- состояние ионосферы по шести регионам территории (полярная шапка, зона сияний, запад, средние широты европейской части, средние широты восточной части, юг);
- состояние радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве и на трассах пилотируемых космических аппаратов.

Кроме того, в рамках методики осуществляется верификация прогнозов (указывается количество оправдавшихся прогнозов). Все элементы космической погоды представляются в балльных оценках.

Выше указывалось, что прогнозы имеют различную заблаговременность.

1) **Краткосрочные прогнозы.** К краткосрочным прогнозам относятся прогнозы с заблаговременностью до трех суток. Краткосрочные прогнозы Гелиогеофизической службой Росгидромета включают:

- прогноз интегральных индексов солнечной активности (прогноз числа солнечных пятен  $W$  (число Вольфа), прогноз потока радиоизлучения Солнца  $F$  на длине волны  $\lambda = 10,7$  см);

- прогноз вероятности солнечных вспышек указанного балла;
- прогноз степени возмущенности магнитного поля Земли;
- прогноз состояния ионосферы по шести регионам территории (полярная шапка, зона сияний, запад, средние широты европейской части, средние широты восточной части, юг);
- прогноз радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве и на трассах пилотируемых космических аппаратов.

2) **Среднесрочные прогнозы.** Среднесрочные прогнозы составляются в начале прогнозируемого периода на каждый день (пять или семь суток) с заблаговременностью не менее одних суток. В перечень среднесрочных прогнозов, выпускаемых Гелиогеофизической службой Росгидромета, входят:

- прогноз интегральных индексов солнечной активности на 7 суток;
- прогноз вероятности солнечных вспышек указанного балла на 7 суток;
- прогноз степени возмущенности магнитного поля Земли на 5 и 7 суток;
- прогноз состояния ионосферы для каждого наблюдательного подразделения на 5 суток;
- прогноз радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве и на трассах пилотируемых космических аппаратов.

### 3) Долгосрочные прогнозы:

– еженедельный прогноз на 27 суток (солнечный оборот) с заблаговременностью одни сутки. Прогноз выдается один раз в неделю на каждый солнечный оборот из 27 последующих суток. По истечении недели прогноз обновляется;

– ежемесячный прогноз на 30–31 сутки (февраль 28–29 суток) с заблаговременностью одни сутки. Прогноз выдается один раз в месяц на каждый день месяца.

В состав еженедельного прогноза на солнечный оборот входят следующие прогнозы:

- прогноз интегрального индекса солнечной активности  $R$ ;
- прогноз вероятности солнечных вспышек указанного балла;
- прогноз степени возмущенности магнитного поля Земли;
- прогноз радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве и на трассах пилотируемых космических аппаратов.

В состав ежемесячного прогноза входят следующие прогнозы:

- возмущенности геомагнитного поля по шестибальной шкале  $A_p$  индекса для каждых суток;
- состояния ионосферы Земли по семибальной шкале средних суточных отклонений критических частот слоя  $F2$  от медианных значений для каждых суток.

### Прогноз интегральных индексов солнечной активности

Интегральными характеристиками проявлений активности Солнца в течение цикла солнечной активности по методике являются:

$W$  – относительные числа солнечных пятен - Число Вольфа;

$F$  – поток радиоизлучения Солнца на длине волны  $\lambda = 10.7$  см;

$S$  – сумма площадей солнечных пятен;

$If$  – ежедневный индекс вспышечной активности и другие индексы.

Число Вольфа – числовой показатель солнечной активности, связанный с количеством солнечных пятен, ежесуточно определяется на солнечных обсерваториях. Исходными данными для образования числа Вольфа ( $W$ ) служит изображение групп пятен на Солнце в белом свете. Число Вольфа для данного дня вычисляется по формуле:

$$W = k (10g + f), \quad (1)$$

где  $g$  – число групп пятен на видимом солнечном диске;  $f$  (безразмерный параметр) – общее число пятен во всех группах;  $k$  (безразмерный параметр) – коэффициент выводится для каждого телескопа и наблюдателя, что дает возможность совместно использовать числа Вольфа, найденные разными наблюдателями.

В настоящее время свод всех наблюдений солнечных пятен и определение среднемесячных и среднегодовых значений чисел Вольфа производится в Центре анализа данных по влиянию Солнца (Бельгия).

Поток радиоизлучения Солнца на длине волны  $\lambda = 10,7$  см ( $f = 2800$  МГц) характеризует изменения температуры и плотности на всей площади видимого диска и со всех активных областей (и не только в пятнах). Поток радиоизлучения Солнца  $F_{10,7}$  изменяется с фазой одиннадцатилетнего солнечного цикла от 60–70 до 200–300 и более единиц солнечного потока ( $1 \text{ s.f.u} = 10^{-22} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ Гц})$ ). Количество поступающей информации зависит от количества солнечных обсерваторий, которые проводят данные наблюдения.

В настоящее время в Гелиогеофизической службе для оперативной оценки уровня интегральной солнечной активности используются значения чисел Вольфа  $W$  и потока радиоизлучения  $F$ , поступающие ежедневно из Центра прогнозирования космической погоды национального управления океанических и атмосферных исследований (США).

В Гелиогеофизической службе для оперативной оценки принят условный интегральный показатель солнечной активности ( $R$ ), определяемый как половина суммы индексов числа пятен  $W$  и численного значения потока радиоизлучения Солнца  $F$

$$R = (W+F)/2, \tag{2}$$

где  $F = \frac{F_{10,7}}{s}$  (безразмерный параметр) – численное значение потока радиоизлучения Солнца;  $s = 1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ Гц})$ .

Интегральная солнечная активность оценивается по балльной шкале. Оценка балла интегральной солнечной активности в годы низкой и средней солнечной активности производится согласно данным, приведенным в табл. 1.

Таблица 1

**Характеристика интегральной солнечной активности в годы низкой и средней солнечной активности**

Балл	Диапазон R	Характеристика интегральной солнечной активности
0	Не более 100	Низкая
1	От 101 до 200 включительно	Умеренная
2	От 201 до 300 включительно	Высокая
3	Более 301	Очень высокая

В годы высокой и максимума солнечной активности оценка интегральной солнечной активности производится согласно данным, приведенным в табл. 2. Оправдываемость

прогнозов интегральной солнечной активности по индексу  $R$  в годы низкой и средней солнечной активности оценивается балл в балл. Оправдываемость прогнозов интегральной солнечной активности в годы высокой активности и максимума солнечной активности оценивается балл  $\pm 0,5$ , т. е. при прогнозе 1 балл оправдавшимся считается прогноз 0,5 и 1,5 балла.

Таблица 2

**Характеристика интегральной солнечной активности в годы высокой и максимума солнечной активности**

Балл	Диапазон $R$	Характеристика интегральной солнечной активности
0	Не более 100	Низкая
0,5	От 100 до 150 включительно	Низко-умеренная
1	От 151 до 200 включительно	Умеренная
1,5	От 201 до 250 включительно	Умеренно-высокая
2	От 251 до 300 включительно	Высокая
3	Более 301	Очень высокая

**Прогноз вероятности солнечных вспышек**

Солнечная вспышка – взрывной процесс выделения энергии (кинетической, световой и тепловой) в атмосфере Солнца. Вспышки так или иначе охватывают все слои солнечной атмосферы: фотосферу, хромосферу и корону Солнца. Частота появления солнечных вспышек зависит от уровня солнечной активности. Наименьшее число вспышек происходит во время солнечного минимума. Активность и интенсивность вспышек достигает своего пика в годы солнечного максимума или сразу после него. Большинство вспышек на Солнце происходит в растущих или подвергнутых внешнему разряжению активных областях. Наибольшие вспышки происходят в группах, имеющих магнитную конфигурацию бета-гамма и, особенно, дельта и бета-гамма-дельта.

Солнечные вспышки можно подразделить на два класса: сильные и компактные. Компактные вспышки – самые меньшие и наиболее частые, могут сопровождаться, в основном, слабыми выбросами вещества. Субвспышки – наименьшие из всех компактных вспышек, очень короткие по продолжительности и выглядят немного ярче, чем флоккулы. Сильные вспышки, намного более сильные и продолжительные, часто сопровождаются выбросами и веерообразными протуберанцами из яркого газа. Такие вспышки испускают сильные лучи в рентгеновском диапазоне и массы энергетических частиц (выбросы корональной массы), что может привести к геомагнитным возмущениям на Земле. С солнечными вспышками связаны три типа электромагнитных излучений: оптическое,

рентгеновское и радиоизлучение. Солнечные вспышки оцениваются исходя из интенсивности их оптических, рентгеновских или радиопотоков. Прогноз солнечных вспышек состоит из комплексной оценки появления вспышки оптического диапазона, рентгеновского диапазона и прогноза протонных событий.

Балл оптической вспышки оценивается по размерам занимаемой активной областью площади и яркости. Для оценки балла максимальной оптической вспышки используется пятибалльная шкала: 0, 1, 2, 3, 4. Оценка максимального оптического балла вспышки в оптической области спектра в момент максимальной яркости производится согласно данным, приведенным в табл. 3. В качестве исходных данных, как для прогноза, так и для его оценки, используются данные мировой сети (наземные и космические).

Таблица 3

**Оценка максимального оптического балла вспышки**

Балл	Площадь (МДП – миллионная доля полусферы Солнца)	Характеристика вспышки
0	< 100 МДП	Субвспышка S
1	100–250 МДП	Вспышка балла 1
2	250–600 МДП	Вспышка балла 2
3	600–1200 МДП	Вспышка балла 3
4	>1200 МДП	Вспышка балла 4

Прогноз солнечных рентгеновских вспышек формируется следующим образом. Интенсивность мягкого рентгеновского излучения измеряется гидрометеорологическими геостационарными спутниками «Электро» и GOES в диапазоне 1–8 Ангстрем. По классификации солнечной вспышки присваивается балл – обозначение из латинской буквы и индекса за ней. Буквой может быть *A*, *B*, *C*, *M* или *X* в зависимости от величины достигнутого вспышкой пика интенсивности рентгеновского излучения. Буква рентгеновского излучения и его интенсивность в максимуме (пике) представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Интенсивность рентгеновского излучения в максимуме**

Буква	Интенсивность в пике (Вт/м <sup>2</sup> )
<i>A</i>	Меньше $10^{-7}$
<i>B</i>	От $1,0 \times 10^{-7}$ до $10^{-6}$
<i>C</i>	От $1,0 \times 10^{-6}$ до $10^{-5}$
<i>M</i>	От $1,0 \times 10^{-5}$ до $10^{-4}$
<i>X</i>	Больше $10^{-4}$

Индекс за буквой уточняет значение интенсивности вспышки и может быть от 1,0 до 9,9 для всех букв. В Гелиогеофизической службе для оценки балла максимального рентгеновского излучения используется четырехбалльная шкала: 0, 1, 2, 3. Оценка максимального рентгеновского балла вспышки производится согласно данным, приведенным в табл. 5. В качестве исходных данных, как для прогнозирования, так и для оценки, используются данные глобальной сети (наземной и космической).

Таблица 5

**Оценка максимального рентгеновского балла вспышки**

Балл	Рентгеновский класс
0	Максимальный рентгеновский класс – C5
1	Максимальный рентгеновский класс – C9
2	Максимальный рентгеновский класс – M
3	Максимальный рентгеновский класс – X

При формировании прогноза протонных событий руководствуются следующей информацией. Корпускулярное излучение солнечных вспышек состоит в основном из протонов со значительной долей  $\alpha$ -частиц и некоторого количества тяжелых частиц. Предвестниками вероятности протонных вспышек могут быть следующие условия:

- вспышки класса  $> M5$ ;
- зарегистрированы радиовсплески II и IV типа;
- площадь группы пятен более 500 МДП;
- если «время спада» много меньше времени продолжительности вспышек;
- если «время нарастания»/«время спада»  $< 0,5$ ;
- если количество пятен в группе резко возрастает до 30–40;
- резко растет количество вспышек в группе и т. д.

Если выполняются хотя бы три условия из вышеперечисленных, то велика вероятность протонных вспышек.

Прогнозы вероятности солнечных вспышек носят вероятностный характер и сопровождаются терминами: «возможны» или «ожидаются».

Прогнозы могут быть:

- правильными: совпадение с диагнозом балл в балл;
- неправильными: отличие от диагноза более чем на балл;

– частично правильными с мерой 1/3: отличие от диагноза в 1 балл в сторону завышения при термине «возможны» либо отличие в 1 балл в сторону занижения при термине «ожидаются»;

– частично правильными с мерой 2/3: отличие от диагноза в 1 балл в сторону завышения при термине «ожидаются» либо отличие в 1 балл в сторону занижения при термине «возможны».

### **Прогноз степени возмущенности магнитного поля Земли**

Прогноз степени возмущенности магнитного поля Земли составляется на основе рекуррентного прогноза по «коврикам» Бартельса и оценки геоэффективности солнечных вспышек. Различают магнитные бури с внезапным началом (*SSC u VMSSC – sudden storm commencement u very marked sudden storm commencement*) и рекуррентные бури с постепенным началом (*gradual storm beginning – GSB*). В периоды высокой солнечной активности, как правило, это годы 11-летних максимумов, подавляющее большинство возмущений геомагнитного поля связано со вспышками, в то время как в периоды минимума солнечной активности основная доля возмущений определяется квазистационарными высокоскоростными потоками солнечного ветра. Они образуются в короне над активными центрами, время жизни последних в зависимости от цикла к циклу, и особенно от фазы цикла, варьирует от одного до нескольких оборотов Солнца. Именно поэтому повторяющиеся (рекуррентные) геомагнитные возмущения, идентифицируемые в большинстве случаев как бури с постепенным началом, становится возможным прогнозировать на один или несколько оборотов Солнца. Рекуррентные бури имеют тенденцию повторяться с периодом 27,3 суток (полный оборот Солнца вокруг своей оси). Рекуррентные бури вызываются высокоскоростными потоками (несущими обычно южную компоненту межпланетного магнитного поля) в солнечном ветре от долгоживущих (в течение нескольких оборотов) областей на Солнце, таких как корональные дыры, секторные границы общего магнитного поля Солнца, униполярные области.

При взаимодействии ускоренного, усиленного потока солнечного ветра с магнитосферой, в ней, а также в геомагнитном поле возникает ряд резких изменений – геомагнитная буря. В Гелиогеофизической службе для прогноза геомагнитных бурь рекуррентного характера строятся «коврики» Бартельса, в которых по горизонтальной оси нанесены Керрингтоновские обороты Солнца, по вертикальной оси – ежесуточная оценка состояния геомагнитного поля. *ApMos* – региональный суточный квазипланетарный индекс оценки состояния геомагнитного поля, вычисляемый по данным среднеширотных станций Евразийского региона. Прослеживая состояние возмущенного геомагнитного поля по

«коврикам» Бартельса, можно наблюдать тенденцию к усилению или ослаблению ожидаемых рекуррентных возмущений на последующих оборотах Солнца. Это позволяет прогнозировать время начала, интенсивность и длительность бури. Кроме того, для прогноза геомагнитных бурь рекуррентного характера необходимо использовать параметры солнечного ветра: увеличение плотности солнечного ветра, изменение величины и знака  $B_z$  – компоненты межпланетного магнитного поля, увеличение скорости солнечного ветра, наличие и местоположение корональных дыр и др. Ускоренный поток солнечного ветра от корональной дыры геоэффективен, то есть вызывает возмущение в магнитном поле, когда корональная дыра находится на геоэффективных долготах  $20\text{--}50^\circ$  западной долготы.

В период высокой солнечной активности большая часть геомагнитных возмущений связана со вспышками, и большинство регистрируемых магнитных бурь – это бури с внезапным началом (*SSC* и *VMSSC*). Причиной *SSC*-бурь являются нестационарные процессы на Солнце: хромосферные вспышки, радиовсплески в различных диапазонах, структура и направление крупномасштабных магнитных полей, эруптивные протуберанцы, внезапно распадающиеся (исчезающие) волокна (*DSF* – *disappearing system of filaments*), выбросы корональной массы (*CME* – *coronal mass ejection*). Во время вспышки над вспышечной областью образуется магнитогидродинамическая ударная волна и плазменное облако с плотностями и скоростями больше, чем в спокойном солнечном ветре (потоки частиц с энергиями в несколько десятков кэВ), которые приходят к геомагнитосфере через 20–50 часов после вспышки. Геоэффективность вспышки оценивается по интенсивности рентгеновского и радиоизлучения, ее длительности, наличию или отсутствию радиовсплесков II и/или IV спектрального типа. В Гелиогеофизической службе прогнозируются магнитные бури с *SSC*:

- От вспышки ожидается умеренная или сильная *SSC*-буря, если
  - длительность вспышки более (30–40) мин;
  - интенсивность излучения в рентгеновском диапазоне более класса M5;
  - интенсивность в радиодиапазоне на длине волны 10,7 см –  $F_{10,7}$  более 500 s.f.u. =  $500 \times 10^{-22}$  Вт/(м<sup>2</sup> Гц);
  - имеются радиовсплески II и/или IV спектрального типа.

Если вспышка с IV спектральным типом, то ожидается, что магнитная буря начнется через сутки-двое, если со II спектральным типом, то через двое-трое суток.

- При более низких параметрах вспышки прогнозируется буря слабой интенсивности и с меньшей вероятностью.

Предвестниками вероятности возмущенности геомагнитного поля могут быть следующие условия:

1. **Диагноз:** на диске Солнца в ДД сутки в *WS* (юго-западном) квадранте на геоэффективных долготах наблюдается корональная дыра. На предыдущем обороте Солнца от нее было возмущение геомагнитного поля с индексом *ApMos*, равным 25.

**Прогноз:** ожидается, что в ДД и ДД+1 сутки геомагнитное поле будет слабо возмущенное.

2. **Диагноз:** на диске Солнца в 12 UTC ДД–1 сутки произошла вспышка 2 В/М6 с всплеском в рентгеновском диапазоне интенсивностью *F*, равной

$$600 \text{ s.f.u.} = 600 \times 10^{-22} \text{ Вт/(м}^2 \text{ Гц)}$$

и радиовсплеском II спектрального типа.

**Прогноз:** ожидается *SSC*-возмущение в геомагнитном поле умеренной интенсивности в ДД+1 сутки и слабой интенсивности в ДД+2 сутки.

Прогноз состояния геомагнитного поля содержит два параметра: интенсивность возмущенности геомагнитного поля (дается по шестибалльной шкале: баллы от 0 до 5) и вероятность возмущения. Оценка состояния (интенсивности) геомагнитного поля производится согласно данным, приведенным в табл. 6.

Таблица 6

Оценка состояния (интенсивности) геомагнитного поля

Балл	<i>ApMos</i> (в 2 нТ)	Состояние геомагнитного поля
0	0–7	Очень спокойное
1	8–14	Спокойное
2	15–19	Неустойчивое
3	20–29	Слабо возмущенное
4	30–49	Умеренно возмущенное
5	Более 49	Сильно возмущенное

Оценка вероятности возмущения:

- возможно состояние геомагнитного поля указанного балла (степень вероятности до 30 %);
- ожидается состояние геомагнитного поля указанного балла (степень вероятности более 30 %).

В Гелиогеофизической службе прогнозируют вероятностные степени возмущенности геомагнитного поля следующего типа (табл. 7).

Прогноз степени возмущенности магнитного поля Земли носит вероятностный характер и сопровождается терминами: «возможны» или «ожидаются».

Прогноз может быть:

- правильным: совпадение с диагнозом балл в балл;

- неправильным: отличие от диагноза более чем на балл;
- частично правильным с мерой 1/3: отличие от диагноза в 1 балл в сторону завышения при термине «возможны» либо отличие в 1 балл в сторону занижения при термине «ожидаются»;
- частично правильным с мерой 2/3: отличие от диагноза в 1 балл в сторону завышения при термине «ожидаются» либо отличие в 1 балл в сторону занижения при термине «возможны».

Таблица 7

**Степени возмущенности геомагнитного поля**

Обозначение прогноза	Степень возмущенности магнитного поля
010	Возможно спокойное
011	Возможно спокойное с отдельными периодами неустойчивости
110	Ожидается спокойное
111	Ожидается спокойное с отдельными периодами неустойчивости
020	Возможно неустойчивое
021	Возможно неустойчивое с отдельными (слабо) возмущенными периодами
120	Ожидается неустойчивое
121	Ожидается неустойчивое с отдельными (слабо) возмущенными периодами
030	Возможно слабо возмущенное
031	Возможно слабо возмущенное (с отдельными умеренно возмущенными периодами)
130	Ожидается слабо возмущенное
131	Ожидается слабо возмущенное (с отдельными умеренно возмущенными периодами)
040	Возможно умеренно возмущенное
041	Возможно умеренно возмущенное (с отдельными сильно возмущенными периодами)
140	Ожидается умеренно возмущенное
141	Ожидается умеренно возмущенное (с отдельными сильно возмущенными периодами)
050	Возможно сильно возмущенное
051	Возможно сильно возмущенное (с отдельными очень сильно возмущенными периодами)
150	Ожидается сильно возмущенное
151	Ожидается сильно возмущенное (с отдельными очень сильно возмущенными периодами)

## Прогноз состояния ионосферы Земли

Прогноз состояния ионосферы Земли осуществляется для каждого региона по двум показателям: прогноз относительных отклонений критической частоты слоя  $F2$  и прогноз спорадического слоя. Ионосфера подвержена регулярным циклическим, сезонным и суточным вариациям. Кроме того, она испытывает нерегулярные колебания от часа к часу и ото дня ко дню как в спокойных, так и в возмущенных условиях. Вариации ионосферы во время возмущений в большинстве случаев связаны с электромагнитными и корпускулярными излучениями из активных областей на Солнце. Изменчивость области  $F2$  при спокойных и слабо возмущенных условиях в значительной мере определяется изменением межпланетного магнитного поля (ММП).

Прогноз состояния ионосферы Земли на основе отклонений суточного хода критических частот слоя  $F2 - foF2$  на ионосферных наблюдательных пунктах измеряется в МГц. Прогноз состояния ионосферы Земли осуществляется для каждого региона на основе отклонений суточного хода критических частот слоя  $F2$  от медианных значений по семибалльной шкале. Одной из основных характеристик ионосферной возмущенности является величина отклонения критической частоты  $foF2$  от медианных или спокойных значений. Для каждого часа используются медианные значения за месяц или декаду. Для исключения сезонных изменений  $foF2$  принято использовать скользящую медиану. Отрицательные ионосферные возмущения (понижение  $foF2$  относительно медианы) связаны со значительными магнитными возмущениями. Положительные ионосферные возмущения могут наблюдаться и в период очень спокойного магнитного поля или в течение нескольких часов перед большими отрицательными отклонениями (двухфазовое возмущение). Для краткосрочного прогнозирования в Гелиогеофизической службе используется декадная медиана. Она рассчитывается каждые пять дней, т. е. является скользящей. Медиана рассчитывается для каждой станции, данные с которой поступают в Гелиогеофизическую службу. С использованием медианы в течение последующих пяти дней, ежечасно для каждой ионосферной станции рассчитывается величина:

$$\Delta foF2 = (foF2 - (foF2)_{мед}) / (foF2)_{мед} \times 100\%, \quad (3)$$

где  $\Delta foF2$  (%) – относительное отклонение измеренных значений критической частоты от медианы, выражаемое в процентах;  $foF2$  (МГц) – критическая частота слоя  $F2$  ионосферы;  $(foF2)_{мед}$  (МГц) – декадная медиана критической частоты слоя  $F2$  ионосферы.

Случайные флуктуации  $foF2$ , наблюдаемые в спокойные дни, ограничены величинами  $\pm 20\%$  (они имеют распределение, близкое к Гауссову распределению случайных величин). Состояние ионосферы, при котором  $\Delta foF2$  не более по величине  $20\%$ , считается спокойным.

В зависимости от величины  $\pm \Delta foF2$  состояние ионосферы за каждый час оценивается определенным баллом ( $I$  индекс – часовой индекс ионосферной возмущенности).  $I$  индексы и соответствующие им интервалы  $\Delta foF2$  приведены в табл. 8.

Таблица 8

**Часовые индексы ионосферной возмущенности и соответствующие им интервалы  $\Delta foF2$**

$\pm \Delta foF2$	0-10	11-20	21-25	26-30	31-35	36-40	41-45	46-50	51-55	56-60	>60
$I$ индекс	0	0,5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4,5	5
Отрицательное/ положительное	Спокойное		Слабое	Умеренное		Сильное					

Суточные и полусуточные характеристики состояния ионосферы определяются по часовым характеристикам. Для этого отдельно находятся суммы положительных и отрицательных  $I$  индексов за сутки (или половину суток). Выбирается наибольший из них, делится на 24 часа (или 12 часов) и получается суточный (или полусуточный) индекс, который характеризует одно из состояний ионосферы: спокойное, слабое, умеренное или сильное возмущение. Соответствие суточных (полусуточных) характеристик состояния ионосферы и рассчитанных баллов приведено в последней строке табл. 8. Прогноз состояния ионосферы Земли осуществляется для каждого региона на основе отклонений суточного хода критических частот слоя  $F2$  от медианных значений по семибалльной шкале (табл. 9). Для характеристики спорадического слоя  $E_s$  используется семибалльная шкала, приведенная в табл. 10. Для характеристики поглощения используется четырехбалльная шкала, приведенная в табл. 11.

Таблица 9

**Характеристика ионосферного возмущения**

Среднее значение $\Delta foF2$ за рассматриваемый период	Балл	Характеристика ионосферного возмущения
$\leq \pm 20$	0	Спокойно
От -21 до -25	1	Отрицательное слабое
От -26 до -35	2	Отрицательное умеренное
Более -35	3	Отрицательное сильное
От +21 до +25	4	Положительное слабое
От +26 до +35	5	Положительное умеренное
Более +35	6	Положительное сильное

## Характеристика спорадического слоя Es

Балл	Характеристика спорадического слоя Es
0	$foFs$ меньше нижнего предела ионосферной станции в течение суток
1	$foFs < 3$ МГц менее 6 часов в сутки
2	$foFs < 3$ МГц наблюдается в течение 6–12 часов непрерывно или с небольшими перерывами
3	$foFs < 3$ МГц наблюдается больше 12 часов непрерывно или с небольшими перерывами
4	$foFs \geq 3$ МГц менее 6 часов в сутки
5	$foFs \geq 3$ МГц наблюдается в течение 6–12 часов непрерывно или с небольшими перерывами
6	$foFs > 3$ МГц наблюдается больше 12 часов непрерывно или с небольшими перерывами

Таблица 11

## Характеристика поглощения

Балл	Характеристика поглощения
0	Нет аномального поглощения в течение суток
1	Полное поглощение наблюдается менее 6 часов в сутки или повышенное поглощение наблюдается более 3 часов в сутки
2	Полное поглощение наблюдается в течение 6–12 часов в сутки
3	Полное поглощение наблюдается более 12 часов в сутки

Состояние ионосферы в высоких широтах не может быть охарактеризовано только величиной  $\Delta foF2$ , так как во время возмущений, в ее нижних слоях, происходят значительные изменения: увеличивается ионизация нижней ионосферы, что приводит к повышенному поглощению, достигающему иногда до полного, появляются спорадические образования и т. п. В полярной шапке часто и во время спокойных периодов появляется диффузность.

Для характеристики диффузности используется четырехбалльная шкала, приведенная в табл. 12.

Область  $F$  считают возмущенной, когда  $\Delta foF2$  превышают 15–20 % более 5 часов.

Прогнозы состояния ионосферы выпускаются ежедневно два раза в сутки с заблаговременностью 12 и 24 часа по регионам: авроральная зона, средние широты европейской части России, запад, средние широты восточной части России, юг. Прогнозы диффузности и поглощения выпускаются только по авроральной зоне. Прогнозы могут быть

правильными либо неправильными. Прогноз считается правильным, если прогнозируемый с соответствующей заблаговременностью балл совпал в балл или в «балл ± балл» с реально наблюдавшимся и неправильным, если отличие более, чем на балл.

Таблица 12

**Характеристика диффузности**

Балл	Характеристика диффузности
0	Нет диффузности в течение суток
1	Диффузность наблюдается менее 6 часов в сутки
2	Диффузность наблюдается в течение 6–12 часов в сутки
3	Диффузность наблюдается более 12 часов в сутки

**Прогноз радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве и на трассах пилотируемых космических аппаратов**

Наиболее опасные в радиационном отношении ситуации в околоземном космическом пространстве и на трассах пилотируемых космических аппаратов, в отсутствие искусственных источников проникающих излучений, связаны с солнечным космическим излучением. Особо опасные ситуации наблюдаются в случаях, когда события солнечных космических излучений проходят на фоне интенсивных геомагнитных бурь с внезапным началом SSC, причиной которых являются геоэффективные межпланетные ударные волны, инициируемые магнитодинамическими движениями вспышечной плазмы. Прогноз радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве и на трассах пилотируемых космических аппаратов осуществляется в главном гелиогеофизическом центре ФГБУ «ИПГ» по аналого-вероятностному методу. В качестве исходных данных для прогноза используются не только данные наблюдений с российских космических аппаратов серии «Метеор», «Электро» и «Арктика» и американских космических аппаратов «GOES», «ACE», «SOHO», но и результаты краткосрочных прогнозов вспышечной активности и возмущенности геомагнитного поля, а также результаты прогноза развития событий солнечных космических лучей (СКЛ) и оценки радиационных характеристик геоэффективных солнечных вспышек.

Прогноз степени возмущенности радиационной обстановки содержит два параметра: интенсивность возмущения радиационной обстановки (РО) и вероятность возмущения. Оценка состояния радиационной обстановки дается по четырехбалльной шкале: баллы от 0 до 3 (табл. 13).

## Оценка состояния радиационной обстановки

Балл	Состояние радиационной обстановки
0	Невозмущенная (спокойная)
1	Слабо возмущенная РО
2	Умеренно возмущенная РО
3	Сильно возмущенная РО

Вероятность возмущения характеризуется:

- возможно состояние радиационной обстановки указанного балла (степень вероятности до 30 %);
- ожидается состояние радиационной обстановки указанного балла (степень вероятности более 30 %).

Предвестниками вероятности возмущенности радиационной обстановки могут быть следующие условия:

• Радиационная обстановка ожидается **невозмущенная**:

- на диске Солнца наблюдаются группы пятен небольшой площади;
- группы пятен имеют простую магнитную конфигурацию альфа, бета;
- группы пятен имеют Цюрихский класс – *A, B, C, D*;
- вспышечная активность от низкой до умеренной (рентгеновский класс < M5);
- потоки протонов на уровне фона или невысокой интенсивности СКЛ  $J$  менее 2 частиц/(см<sup>2</sup>сек·ср) при  $ApMos$ , равном 20 и более, или  $J$  менее 6 частиц/(см<sup>2</sup>сек·ср) при  $ApMos$  менее 20 в стадии убывания. Здесь и далее ср – стерадиан.

• Радиационная обстановка ожидается **слабо возмущенная**:

- наблюдаются небольшие медленно возрастающие потоки протонов СКЛ от вспышки в группе пятен в восточной части диска Солнца и в начале прогнозируемого периода интенсивность потоков протонов с энергией  $E$  более 30 МэВ находится вблизи 2–4 частиц/(см<sup>2</sup>сек·ср) при возмущенном магнитном поле ( $ApMos$  не менее 20);
- либо наблюдаются медленно убывающие потоки СКЛ в начале прогнозируемого периода с энергией  $E$  более 30 МэВ, интенсивностью  $J$  более 16 частиц/(см<sup>2</sup>сек·ср);
- при геомагнитном поле  $ApMos$  менее 20 наблюдаются медленно возрастающие потоки с энергией  $E$  более 30 МэВ с начальной интенсивностью  $J$  более 6–8 частиц/(см<sup>2</sup>сек·ср) или медленно убывающие потоки СКЛ с начальной интенсивностью  $J$  не более 50 частиц/(см<sup>2</sup>сек·ср).

• Радиационная обстановка ожидается *умеренно возмущенная*:

- на диске Солнца наблюдается группа пятен с площадью  $S$  более 300–500 МДП;
- группа пятен имеет сложную магнитную конфигурацию: гамма, дельта, гамма-дельта;
- группа пятен имеет Цюрихский класс –  $E, F$ . В такой группе возможны протонные вспышки (группа является протонно-опасной).

Если протонно-опасная группа пятен находится в восточной части диска Солнца, то радиационная обстановка, возмущенная, возможно, в ДД+1 сутки, если же в западной части диска, то в ДД сутки.

• Радиационная обстановка ожидается *сильно возмущенная*:

- на диске Солнца в группе пятен с площадью  $S$  более 500–1000 МДП, Цюрихского класса  $E, F$  произошла вспышка с параметрами:
  - интенсивность в рентгене более  $M5$ ,
  - длительность более 40 минут;
- вспышка сопровождалась значительными событиями в радиодиапазонах на частотах 2800 МГц и 245 МГц интенсивностью более 1000 част/(см<sup>2</sup>сек).
- зарегистрированы радиовсплески II и/или IV спектрального типа.

В этих случаях ожидается вторжение протонов СКЛ умеренной или высокой интенсивности.

Если вспышка произошла в группе пятен, находящейся в W-части диска, то возмущение радиационной обстановки ожидается в ДД сутки, возможно возмущение радиационной обстановки через 1 час.

Если вспышка произошла в группе пятен, находящейся в E-части диска, то возмущение радиационной обстановки ожидается в ДД+1 сутки.

При вторжении СКЛ в околоземное космическое пространство в ионосфере наблюдается повышение минимальной частоты  $f_{min}$  с 1 до 5 МГц, поглощение по арктическим станциям Кренкель, Амдерма, Диксон, Тикси и др.

По результатам окончательного прогноза и для оценки состояния радиационной обстановки составляется матрица сопряженности, в которой весь диапазон доз облучения (Д) разбит на 4 уровня (табл. 14).

Прогноз радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве и на трассах пилотируемых космических аппаратов носит вероятностный характер и сопровождается терминами: «возможны» или «ожидаются».

## Оценка состояния радиационной обстановки и доз облучения

Параметр	Состояние радиационной обстановки			
	Невозмущенная	Слабо возмущенная	Умеренно возмущенная	Сильно возмущенная
Суточная поглощенная доза ионизирующего излучения (Д), мкГр	$D \leq 125$	$125 < D \leq 1000$	$1000 < D \leq 10000$ ;	$D > 10000$
Балл	0	1	2	3
Магнитное поле: невозмущенное, $ArMos$ менее 20	Менее 11,94 частиц/ (см <sup>2</sup> сек·ср)	11,94–95,54 частиц/ (см <sup>2</sup> сек·ср)	95,54–955,41 частиц/ (см <sup>2</sup> сек·ср)	Более 955,41 частиц/ (см <sup>2</sup> сек·ср)
Магнитное поле: возмущенное, $ArMos$ не менее 20	Менее 3,68 частиц/ (см <sup>2</sup> сек·ср)	3,68–31,84 частиц/ (см <sup>2</sup> сек·ср)	31,84–318,4 частиц/ (см <sup>2</sup> сек·ср)	более 318,4 частиц/ (см <sup>2</sup> сек·ср)

Прогноз может быть:

- правильным: совпадение с диагнозом балл в балл;
- неправильным: отличие от диагноза более чем на балл;
- частично правильным с мерой 1/3: отличие от диагноза в 1 балл в сторону завышения при термине «возможны» либо отличие в 1 балл в сторону занижения при термине «ожидаются»;
- частично правильным с мерой 2/3: отличие от диагноза в 1 балл в сторону завышения при термине «ожидаются» либо отличие в 1 балл в сторону занижения при термине «возможны».

186

## Алгоритм расчета показателя оправдываемости прогнозов

Для каждого из показателей космической погоды ( $i$ ) в зависимости от типа заблаговременности прогноза рассчитывается свой уровень оправдываемости ( $j$ ):

$$A_{i,j} = \frac{M_{i,j}}{N_{i,j}}, \quad (4)$$

где  $M_{i,j}$  – количество оправдавшихся прогнозов;  $N_{i,j}$  – количество выпущенных прогнозов.

На следующем этапе рассчитывается уровень оправдываемости прогнозов каждого вида наблюдений  $\bar{A}_i$  усреднением уровней оправдываемости прогнозов одного вида наблюдений по различным заблаговременностям:

$$\bar{A}_i = \sum_{j=1}^3 a_{i,j} A_{i,j}, \quad (5)$$

где  $a_{i,j} = 1/n$  – весовой коэффициент;  $n = 3$  – количество временных типов выпущенных прогнозов (краткосрочные, среднесрочные, долгосрочные);  $j = 1, 2, 3$  тип прогноза;  $i = 1, 2, 3, 4, 5$  – вид наблюдений за гелиогеофизическими характеристиками.

Показатель «Поддержание уровня оправдываемости краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов космической погоды» рассчитывается как среднее арифметическое между оправдываемостями всех видов прогнозов:

$$A = \sum_i a_i \bar{A}_i, \quad (6)$$

где  $a_i = 1/m$  – (безразмерный параметр) весовой коэффициент ( $m$  рассчитывается по количеству прогнозируемых гелиогеофизических характеристик, в общем случае  $m = 5$ );  $\bar{A}_i$  – уровень оправдываемости прогнозов каждого вида наблюдений,  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ .

### Апробация методики и верификация прогнозов

Верификация результатов проводилась по всем видам прогнозов 5 характеристик космической погоды разной заблаговременности за 2021 год (табл. 15, 16).

Таблица 15

**Уровни оправдываемости прогнозов разной заблаговременности и разных видов наблюдений за 2021 год**

$A_{ij}$	$j = 1$ (краткосрочный прогноз)	$j = 2$ (среднесрочный прогноз)	$j = 3$ (долгосрочный прогноз)
$i = 1$ , прогноз интегрального индекса солнечной активности R	98,26	98,63	98,36
$i = 2$ , прогноз вероятности солнечных вспышек указанного балла	92,24	92,19	93,97
$i = 3$ , прогноз степени возмущения магнитного поля Земли	98,26	93,01	93,29
$i = 4$ , прогноз состояния ионосферы	87,47	91,34	97,53
$i = 5$ , прогноз радиационной обстановки	99,36	99,45	99,45

Таблица 16

**Уровни оправдываемости прогнозов каждого вида наблюдений за 2021 год**

Прогноз	$A_i, \%$
$i = 1$ , прогноз интегрального индекса солнечной активности R	98,26
$i = 2$ , прогноз вероятности солнечных вспышек указанного балла	98,42
$i = 3$ , прогноз степени возмущения магнитного поля Земли	94,86
$i = 4$ , прогноз состояния ионосферы	92,12
$i = 5$ , прогноз радиационной обстановки	99,42

Итоговое значение показателя успешности гелиогеофизических прогнозов за 2021 год:  
 $A = 95,52 \%$ .

### Выводы

Полученный в период верификации результат согласуется с показателем оправдываемости краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов космической погоды, определяемым по методике, с целью достижения показателя не ниже 92 %.

Данная методика «Расчет показателя "Поддержание уровня оправдываемости краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов космической погоды на уровне не ниже 92 %"» была рассмотрена 27.09.2022 ЦМКП Росгидромета, рекомендована к использованию для контроля уровня оправдываемости краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов космической погоды в деятельности ФГБУ «ИПГ» и региональных центров мониторинга геофизической обстановки взамен используемой ранее «Временная инструкция по оценке оправдываемости ионосферных и магнитных прогнозов» от 1976 года, утверждена приказом Росгидромета №674 от 03.11.2022 года и используется на практике.

### Список литературы

1. РД 52.04.567-2003. Положение о Государственной наблюдательной сети. – Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2003.
2. Кузнецов В.Д. Космическая погода и риски космической деятельности // Космическая техника и технологии. – 2014. – №3 (6). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kosmicheskaya-pogoda-i-riski-kosmicheskoy-deyatelnosti>.
3. Минлигареев В.Т., Алексеева А.В., Качановский Ю.М., Репин А.Ю., Хотенко Е.Н. Картографическое обеспечение магнитометрических навигационных систем робототехнических комплексов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – №1 (203). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kartograficheskoe-obespechenie-magnitometricheskih-navigatsionnyh-sistem-robototekhnicheskikh-kompleksov>.

УДК 551.509.1/5

**Верификация детерминистского и вероятностного радиолокационного наукастинга осадков в теплый и холодный периоды года на Европейской территории России (по результатам испытаний в периоды май–сентябрь 2020 и ноябрь 2021–март 2022 гг.)** / Муравьев А.В., Киктев Д.Б., Смирнов А.В., Павлюков Ю.Б., Серебрянник Н.И. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2023. – Информационный сборник № 50. – С. 3–43.

Представлены сравнительные оценки качества ансамблевого радиолокационного наукастинга по результатам испытаний в теплый (май–сентябрь 2020 г.) и холодный (ноябрь 2021 г. – март 2022 г.) периоды года. В качестве контрольных данных для верификации использованы композитные поля интенсивности осадков, полученные по радарным наблюдениям. В оба периода выявлено небольшое, но систематическое преимущество прогноза по среднему полю ансамбля, что свидетельствует о целесообразности использования ансамблей даже малого объема. По всем использованным показателям (кроме смещения повторяемостей) прогнозы в холодный период оказываются более качественными, чем прогнозы в теплый период года, однако при этом объемы выборок для верификации в холодный период могут быть существенно ниже соответствующих объемов выборок в теплый период. Обсуждаются проблемы сопоставительного анализа качества, вызванные, в частности, потерей пространственной связности композитного поля в холодный период.

*Ключевые слова:* ансамблевый наукастинг метеорологических полей, радиолокационные оценки осадков, композитное поле осадков, поточечная и пространственная верификация прогнозов полей.

Табл. 19. Ил. 25. Библ. 17.

УДК 551.509.3

**Результаты оперативных испытаний глобальной системы ансамблевого среднесрочного прогноза погоды на основе модели ПЛАВ** / Мизяк В.Г., Алипова К.А., Толстых М.А., Рогутов В.С. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2023. – Информационный сборник № 50. – С. 44–65.

Представлены основы и результаты оперативных испытаний разработанной новой технологии глобального ансамблевого среднесрочного прогноза на основе модели ПЛАВ. Результаты показывают повышение успешности прогноза для полей геопотенциала, температуры для всех уровней и давления на уровне моря, заблаговременностей, территорий, метрик детерминистических и вероятностных оценок (за редкими исключениями) по сравнению с системой ансамблевого прогнозирования на базе спектральной модели T169L31.

*Ключевые слова:* численный прогноз погоды, система ансамблевого прогноза, глобальная модель атмосферы ПЛАВ

Ил. 14. Библ. 31.

УДК 551.5

**Технология прогноза характеристик внутрисезонной изменчивости на основе статистической коррекции ансамблей долгосрочных гидродинамических прогнозов модели ПЛАВ Гидрометцентра России / Тищенко В.А., Хан В.М., Вильфанд Р.М.// Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2023. – Информационный сборник № 50. – С. 66–71.**

Представлена схема статистической коррекции сезонных прогнозов по модели общей циркуляции атмосферы ПЛАВ для территории Северной Евразии. Оценки скорректированных оперативных сезонных и детализированных по месяцам прогнозов температуры воздуха модели ПЛАВ в среднем для территории Северной Евразии показали улучшение качества детерминистских прогнозов. Существенное улучшение качества прогнозов температуры воздуха проявляется в переходные сезоны. ЦМКП Росгидромета от 27 сентября 2022 г. принято решение внедрить технологию прогноза характеристик внутрисезонной изменчивости на основе статистической коррекции ансамблей долгосрочных гидродинамических прогнозов модели ПЛАВ072L96 Гидрометцентра России в практику прогностической работы ФГБУ «Гидрометцентр России» и СЕАКЦ в качестве вспомогательной при составлении метеорологических прогнозов на сезон для территории Северной Евразии.

*Ключевые слова:* долгосрочные гидродинамические прогнозы, сезонные прогнозы, статистическая коррекция, критерии оценки успешности, Северная Евразия

Табл. 2. Ил. 2. Библ. 2.

190

УДК 551.5

**Технология месячного и сезонного прогнозирования приземной температуры воздуха по Арктическому региону на основе статистической интерпретации ансамблевых прогнозов ПЛАВ / Хан В.М., Тищенко В.А., Вильфанд Р.М.// Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2023. – Информационный сборник № 50. – С. 72–77.**

Рассматривается технология месячного и сезонного прогнозирования приземной температуры воздуха по Арктическому региону на основе статистической интерпретации ансамблевых сезонных прогнозов ПЛАВ. Приводятся результаты авторских и независимых испытаний технологии. Предложенная схема статистической коррекции сезонных прогнозов ПЛАВ для региона Арктики позволила существенно улучшить качество прогнозов приземной температуры воздуха в этом регионе. Показано устойчивое преимущество скорректированных месячных и сезонных прогнозов с различной заблаговременностью для регионов Европы, Европейско-Атлантического сектора, Восточной Сибири, Канадского сектора, центральной Арктики. ЦМКП Росгидромета от 23 декабря 2022 г. принято решение внедрить технологию в практику прогностической работы ФГБУ «Гидрометцентр России» и СЕАКЦ в качестве основной при составлении прогнозов приземной температуры воздуха на месяц и сезон для территории Арктики.

*Ключевые слова:* долгосрочные гидродинамические прогнозы, сезонные прогнозы, статистическая коррекция, критерии оценки успешности, Арктика

Табл. 2. Ил. 1. Библ. 3.

УДК 520.6+520.8+550.3

**Метод прогноза урожайности семян подсолнечника по субъектам европейской части и России в целом с заблаговременностью 3–3,5 месяца** / Страшная А.И. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2023. – Информационный сборник № 50. – С. 78–85.

Изложены результаты производственных испытаний метода прогноза урожайности семян подсолнечника в субъектах европейской части России и в Гидрометцентре России. Приведены рекомендации ЦМПК Росгидромета от 23 декабря 2022 года о внедрении метода в практику.

*Ключевые слова:* подсолнечник, метод прогноза, производственные испытания, оправдываемость

Табл. 2. Ил. 1. Библ. 8.

УДК 63:551.5

**Результаты испытания методов прогноза урожайности яровой пшеницы по административным районам Кемеровской области** / Пищимко О.И., Ковригина И.Г. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2023. – Информационный сборник № 50. – С. 86–92.

Приведены результаты испытания методов прогноза урожайности яровой пшеницы по административным районам Кемеровской области, разработанных в рамках выполнения темы 1.1.7.1 Плана НИОКР Росгидромета на 2019 год. Решением Технического Совета ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» от 07 июня 2022 г, одобренным решением ЦМКП 9.06.2022 г., автоматизированная технология прогноза урожайности яровой пшеницы по административным районам Кемеровской области с 20 июня 2022 года рекомендована к внедрению в оперативную практику специалистов-агрометеорологов Кемеровского ЦГМС – филиала ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» в качестве основного расчетного метода на сроки 21–23 июня и 21–23 июля для районов: Яйского (модели 1,4), Топкинского (модели 1,4), Промышленновского (модель 2,4), Ленинск-Кузнецкого (модель 2,3), Мариинского (модель 1,4); в качестве консультативного – для Тяжинского (модель 1,3), Крапивинского (модель 2,4), Новокузнецкого (модель 2,4), Ижморского, Гурьевского и Тисульского (модель 1) районов.

*Ключевые слова:* прогноз урожайности по административным районам, яровая пшеница, Кемеровская область, результаты испытаний

Табл. 2. Библ. 3.

УДК [551.501.721:551.521.11] (470+571)

**Методика мониторинга продолжительности солнечного сияния на территории России** / Клещенко Л.К. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2023. – Информационный сборник № 50. – С. 93–104.

Приводится краткое описание технологии мониторинга продолжительности солнечного сияния на территории России, которая включает следующие основные этапы: усвоение оперативных данных и их сопряжение с историческими рядами; расчет локальных и регионально осредненных характеристик мониторинга для территории Российской Федерации; подготовка выходных материалов (таблиц, карт, графиков).

Разработанная методика позволяет получать данные о климатических аномалиях истекшего года и обновленные (с учетом этих данных) оценки современных тенденций в изменениях режима солнечного сияния на территории Российской Федерации.

ЦМКП в своем решении от 29.03.2022 рекомендовала использовать разработанную методику для подготовки раздела ежегодного «Доклада об особенностях климата на территории Российской Федерации».

*Ключевые слова:* мониторинг, продолжительность солнечного сияния, аномалии, географическое распределение, многолетние изменения, оценки линейного тренда.

Табл. 2. Ил. 6. Библ. 10.

УДК 551.557.2

**Усовершенствованная технология построения векторов ветра по информации аппаратуры МСУ-ГС/ВЭ высокоэллиптического КА Арктика-М №1 с использованием оптического потока** / Блошинский В.Д., Кучма М.О. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2023. – Информационный сборник № 50. – С. 105–111.

Недостаточность покрытия северных территорий Российской Федерации, Сибири и Дальнего Востока оперативными данными наземных наблюдений, радиолокационного и аэрологического зондирования приводит к необходимости получения недостающей информации по данным спутникового зондирования атмосферы. В связи с этим в Дальневосточном центре НИЦ «Планета» была проведена работа по усовершенствованию технологии построения векторов ветра применительно к данным прибора МСУ-ГС/ВЭ космического аппарата Арктика-М №1 с использованием оптического потока. Ранее разработанная технология для прибора МСУ-ГС спутников серии Электро-Л позволяла проводить расчеты только по каналу с центральной длиной волны 10.7 мкм и не обеспечивала высокую плотность расчета на данных КА Арктика-М №1. Результаты проведенных испытаний усовершенствованной технологии показали, что погрешности оценки векторов ветра в большинстве случаев соответствуют требованиям, сформулированным Всемирной метеорологической организацией, и близки к результатам работы алгоритмов для зарубежных космических аппаратов, а при использовании метода оптического потока достигается более высокая плотность векторного поля.

*Ключевые слова:* технология построения векторов ветра, спутниковое зондирование атмосферы, информация высокоэллиптического КА Арктика-М №1, метод оптического потока, результаты испытаний

Табл. 6. Ил. 2. Библ. 4.

УДК 551.509.33+551.585

**Методика долгосрочного прогноза типов температуры воздуха для западного района Арктики на осенне-зимний период (октябрь-февраль) на основе макроциркуляционного метода** / Иванов В.В., Алексеенков Г.А. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2023. – Информационный сборник № 50. – С. 112–122.

На основе принципов макроциркуляционного метода с учетом полученных результатов исследований разработана методика долгосрочного прогноза типов температур воздуха на осенне-зимний период (октябрь–февраль) для западного района Арктики (Баренцево и Карское моря).

Результаты оперативных испытаний показали, что оправдываемость прогнозов по методике указывает на повышение эффективности по сравнению с климатическими оценками.

Решением ЦМКП Росгидромета от 9.06.2022 методика рекомендована к внедрению в оперативную практику ФГБУ «АНИИ» в качестве вспомогательной к основному макроциркуляционному методу долгосрочного метеорологического прогноза для полярного района Арктики.

*Ключевые слова:* типы температуры воздуха, долгосрочный прогноз, осенне-зимний период, полярные районы Арктики, макроциркуляционный метод

Табл. 2. Ил. 3. Библ. 15.

УДК 551.326.03:551.326.14(268.46)

**Методика прогноза дрейфа льдов в Белом море на период до 5 суток на основе усовершенствованной численной динамико-термодинамической модели** / Клячкин С.В., Гузенко Р.Б., Май Р.И., Саперштейн Е.Б., Сергеева И.А., Ярославцева С.И., Драбкин В.В. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2023. – Информационный сборник № 50. – С. 123–145.

Прогностическая методика представляет собой численную реализацию уравнений динамики и термодинамики океана и ледяного покрова с соответствующими граничными условиями. В качестве исходных данных используются электронные фактические ледовые карты ААНИИ (стандарт SIGRID-3). Атмосферный форсинг задается с помощью глобальной модели атмосферы GFS. Методика позволяет прогнозировать основные параметры ледяного покрова (сплоченность, толщина, дрейф, сжатия) в Белом море с заблаговременностью до 5 суток, пространственной детализацией 10 км и временной дискретностью от 1 до 12 часов по выбору пользователя. Результаты испытаний методики показали, что оправдываемость прогнозов сплоченности льда составляет 85–89 %, толщины льда – 82–97%, уровня моря – 80–86 %. Оправдываемость прогнозов модуля скорости и направления дрейфа составляют 82,3 и 80,8 % соответственно. Индекс векторной корреляции между прогностическим и наблюдаемым дрейфом составил 0,79, причем коллинеарный коэффициент корреляции показывает довольно тесную прямую статистическую связь (0,78), а ортогональный коэффициент - очень слабую обратную связь (-0,12).

*Ключевые слова:* численная модель, Белое море, ледяной покров, спутниковые снимки, оправдываемость, эффективность, векторная корреляция

Табл. 7. Ил. 12. Библ. 16.

УДК 551.461:551.468(265.51)

**Результаты испытаний метода и технологии краткосрочного прогноза изменений уровня моря в юго-западной части Берингова моря** / Любичкий Ю.В., Романский С.О., Кравчук Л.П., Забродина О.И. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2023. – Информационный сборник № 50. – С. 146–160.

Представлены результаты оперативных испытаний метода и технологии краткосрочного (с заблаговременностью 72 часа) прогноза изменений уровня моря в юго-западной части Берингова моря. Испытания выполнялись ФГБУ «ДВНИГМИ» и ФГБУ «Камчатское УГМС» в течение 2021 года.

Рассмотрены основные характеристики метода прогноза и его технологической линии. Пространственно-временные изменения неперiodической (сгонно-нагонной) составляющей уровня моря в пределах Берингова моря и прилегающих к нему районов рассчитываются по двумерной численной гидродинамической модели совместной динамики воды и льда. Для форсинга модели используются поля приземного атмосферного давления и ветра, прогнозируемые с помощью региональной атмосферной модели WRF-ARW. Приливная составляющая уровня моря вычисляется по гармоническим постоянным основным волн прилива только в береговых пунктах, для которых выпускается прогноз. Информация о состоянии ледяного покрова в пределах сеточной области численной модели формируется по данным GFS. Прогноз рассчитывается два раза в сутки на вычислительном комплексе CRAY XC-40 РВЦ ФГБУ «Дальневосточное УГМС». Технологическая линия метода прогноза, включающая процессы сбора исходной информации, выполнение расчетов, отправку результатов прогнозов в ФГБУ «Камчатское УГМС», работает в автоматическом режиме.

Результаты сравнения рассчитанных прогнозов с данными наблюдений в пунктах Никольское, Оссора, Корф (Тиличики) свидетельствуют о соответствии разработанного метода прогноза требованиям руководящих документов Росгидромета.

Решением ЦМКП от 9 июня 2022 г. метод прогноза рекомендован в качестве основного для использования в оперативной практике ФГБУ «Камчатское УГМС».

*Ключевые слова:* метод прогноза, Берингово море, уровень моря, численная модель, заблаговременность, оправдываемость.

Табл. 9. Ил. 5. Библ. 13.

УДК 551.509.51

**Методика оценки полезной заблаговременности среднесрочных прогнозов погоды /** Васильев П.П., Елисеев Г.В., Вильфанд Р.М. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2023. – Информационный сборник № 50. – С. 161–166.

Предложена формализованная методика расчета полезной заблаговременности среднесрочных прогнозов погоды на примере прогноза минимальной температуры (ночью) и максимальной температуры (днем). Значения полезной заблаговременности прогнозов могут использоваться в качестве показателя качества технологии среднесрочного прогнозирования. Приведены примеры расчетов за 2015, 2021 и 2022 годы.

*Ключевые слова:* Заблаговременность прогнозов погоды, количественная оценка прогнозов, среднесрочные прогнозы погоды.

Табл. 2. Библ. 4.

УДК 520.6+520.8+550.3

**Методика оценки оправдываемости краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов космической погоды и результаты ее верификации /** Денисова В.И., Гудкова В.А., Лашина Г.А., Николаев П.В. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2023. – Информационный сборник № 50. – С. 167–188.

Представлена методика «Поддержание уровня оправдываемости краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов космической погоды на уровне не ниже 92 %», разработанная для расчета показателя комплекса процессных мероприятий «Обеспечение деятельности Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и подведомственных учреждений» государственной программы Российской Федерации "Охрана окружающей среды"» в отношении гелиогеофизических прогнозов предупреждения об опасных и неблагоприятных гелиогеофизических явлениях. Указана область применения методики, изложены основы гелиогеофизических прогнозов как объектов прогноза и контроля, прогнозов интегральных индексов солнечной активности, вероятности солнечных вспышек, степени возмущенности магнитного поля Земли, состояния ионосферы Земли, радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве и на трассах пилотируемых космических аппаратов, а также алгоритм расчета показателя оправдываемости прогнозов и результаты апробации методики в рамках производственных испытаний.

*Ключевые слова:* геофизика, гелиогеофизика, прогноз, солнечная активность, солнечные вспышки, возмущённость магнитного поля, ионосфера, радиационная обстановка, методика, апробация, верификация

Табл. 16. Ил. 1. Библ. 3.

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Муравьев А.В., Киктев Д.Б., Смирнов А.В., Павлюков Ю.Б., Серебрянник Н.И.</i> Верификация детерминистского и вероятностного радиолокационного наукастинга осадков в теплый и холодный периоды года на Европейской территории России (по результатам испытаний в периоды май–сентябрь 2020 и ноябрь 2021 – март 2022 гг.) .....	3
<i>Мизяк В.Г., Алипова К.А., Толстых М.А., Рогутов В.С.</i> Результаты оперативных испытаний глобальной системы ансамблевого среднесрочного прогноза погоды на основе модели ПЛАВ .....	44
<i>Тищенко В.А., Хан В.М., Вильфанд Р.М.</i> Технология прогноза характеристик внутрисезонной изменчивости на основе статистической коррекции ансамблей долгосрочных гидродинамических прогнозов модели ПЛАВ Гидрометцентра России .....	66
<i>Хан В.М., Тищенко В.А., Вильфанд Р.М.</i> Технология месячного и сезонного прогнозирования приземной температуры воздуха по Арктическому региону на основе статистической интерпретации ансамблевых прогнозов ПЛАВ .....	72
<i>Страшная А.И.</i> Метод прогноза урожайности семян подсолнечника по субъектам европейской части и России в целом с заблаговременностью 3–3,5 месяца .....	78
<i>Пищимко О.И., Ковригина И.Г.</i> Результаты испытания методов прогноза урожайности яровой пшеницы по административным районам Кемеровской области .....	86
<i>Клещенко Л.К.</i> Методика мониторинга продолжительности солнечного сияния на территории России .....	93
<i>Блощинский В.Д., Кучма М.О.</i> Усовершенствованная технология построения векторов ветра по информации аппаратуры МСУ-ГС/ВЭ высокоэллиптического КА Арктика-М №1 с использованием оптического потока .....	105
<i>Иванов В.В., Алексеенков Г.А.</i> Методика долгосрочного прогноза типов температуры воздуха для западного района Арктики на осенне-зимний период (октябрь–февраль) на основе макроциркуляционного метода .....	112
<i>Клячкин С.В., Гузенко Р.Б., Май Р.И., Саперштейн Е.Б., Сергеева И.А., Ярославцева С.И., Дробкин В.В.</i> Методика прогноза дрейфа льдов в Белом море на период до 5 суток на основе усовершенствованной численной динамико-термодинамической модели .....	123

<i>Любичкий Ю.В., Романский С.О., Кравчук Л.П., Забродина О.И.</i> Результаты испытаний метода и технологии краткосрочного прогноза изменений уровня моря в юго-западной части Берингова моря .....	146
<i>Васильев П.П., Елисеев Г.В., Вильфанд Р.М.</i> Методика оценки полезной заблаговременности среднесрочных прогнозов погоды .....	161
<i>Денисова В.И., Гудкова В.А., Лашина Г.А., Николаев П.В.</i> Методика оценки оправдываемости краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов космической погоды и результаты ее верификации .....	167