

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

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

ИНФОРМАЦИОННЫЙ СБОРНИК

№ 48

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

Под редакцией

канд. геогр. наук А.А. Алексеевой

2021

Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов / под редакцией канд. геогр. наук А.А. Алексеевой. – 2021. – **Информационный сборник № 48.** – 145 с.

Изложены основы и результаты оперативных испытаний научных разработок, решениями ЦМКП Росгидромета рекомендованных к внедрению в оперативную практику. Первая статья посвящена новой технологии глобального вариационного анализа основных метеорологических полей в конфигурации с первым приближением NCEP разрешением 0.25 град. и вертикальными уровнями до 1 гПа. Во второй статье представлены усовершенствованная технология вероятностного наукастинга осадков с километровым разрешением, а также совместная технология детерминистского наукастинга и сверхкраткосрочного прогноза метеорологических параметров (осадков, температуры, влажности, направления и скорости ветра) на основе экстраполяции данных наблюдений и численного моделирования. Две статьи посвящены автоматизированному прогнозу таких явлений погоды, как смерчи в пределах восточной части акватории Черного моря и грозы в Урало-Сибирском регионе. Методика оценки смерчеопасности позволяет прогнозировать смерчеопасные области, выявлять облака с потенциальным риском образования из них смерчей. Технология прогноза гроз построена на физико-статистической интерпретации модельной продукции COSMO-Ru_Sib13 и NCEP (GFS). Две статьи посвящены использованию в практике спутниковых данных. Представлены результаты оперативных испытаний автоматизированной технологии диагноза параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды по данным радиометра SEVIRI с геостационарных метеоспутников серии Meteosat MSG, в основе которой лежат методы автоматизированного порогового попиксельного дешифрирования и классификации спутниковой информации по косвенным признакам. Методическое пособие по созданию карт морского ледяного покрова на основе спутниковых данных оптического, инфракрасного и микроволнового диапазонов реализовано в многофункциональной программной среде «PlanetaMultiSat», созданной в ФГБУ «НИЦ «Планета». Три статьи посвящены агрометеорологической тематике: долгосрочному прогнозу валового сбора зерновых и зернобобовых культур в целом по федеральным округам и России в целом, а также автоматизированным технологиям составления оценок условий вегетации и прогноза урожайности озимой пшеницы и ярового ячменя по субъектам Российской Федерации в составе информационно-прогностической системы. Одна статья посвящена морской тематике – долгосрочному прогнозу дрейфа льда в Арктическом бассейне с заблаговременностью от трех месяцев.

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

М.Д. Цырульников, П.И. Свиренко, Д.Р. Гайфулин, А.Н. Багров

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ГЛОБАЛЬНОГО ВАРИАЦИОННОГО АНАЛИЗА С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ 0,25 ГРАД. И ВЕРТИКАЛЬНЫМИ УРОВНЯМИ ДО 1 ГПА

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации

Введение

В соответствии с Планом испытания и внедрения новых и усовершенствованных методов (технологий) гидрометеорологических прогнозов на 2020 год в ФГБУ «Гидрометцентр России» в период с апреля по сентябрь 2020 г. проводились оперативные испытания системы глобального вариационного анализа основных метеорологических полей в конфигурации с первым приближением NCEP разрешением 0,25 град. и вертикальными уровнями до 1 гПа.

3

Краткое описание технологии

Схема глобального вариационного анализа основных метеорологических полей в конфигурации с первым приближением NCEP (National Centers for Environmental Predictions, Национальные центры прогнозов окружающей среды, США) разрешением 0,25 град. и вертикальными уровнями до 1 гПа полностью разработана в Гидрометцентре России. Она принадлежит классу схем 3D-Var и основана на оригинальной и не имеющей прямых аналогов в мировой практике модели пространственных ковариаций на базе трехмерных фильтров авторегрессии и скользящего среднего (ее краткое описание см. в [1, 4]). Ковариации моделируются с помощью трехмерных фильтров в физическом пространстве, что позволяет задавать изменчивую в пространстве и времени структуру поля ошибок первого приближения в глобальной схеме и использовать эту модель ковариаций в схеме гибридного вариационно-ансамблевого усвоения данных.

Прошедшая испытания технология является конфигурацией унифицированной технологии усвоения данных, которая оперативно работает в настоящее время как в статическом режиме с внешним первым приближением NCEP, так и в циклическом режиме

с первым приближением, формируемым по ходу усвоения прогностической моделью ПЛАВ [3]. Кроме того, ядро схемы анализа используется в настоящее время для усвоения данных наблюдений о состоянии Мирового океана в Гидрометцентре России (работает оперативно с 2006 года), см. [2].

Анализируемые переменные:

а) в свободной атмосфере: геопотенциал, температура, компоненты ветра, относительная влажность;

б) приземные: приземное давление, давление на уровне моря, T2m, RH2m, UV10m, температура на уровне моря.

Поля инкрементов анализа вычисляются на регулярной широтно-долготной сетке с разрешением 1,5 град. или 0,5 град. по горизонтали и 40 изобарических уровнях по вертикали от 1075 до 0,5 гПа.

Схема глобального трехмерного вариационного анализа 3D-Var усваивает следующие виды метеорологических наблюдений:

- традиционные контактные наблюдения: приземные, радиозондовые, самолетные;
- спутниковые наблюдения: микроволновые измерения радиометров AMSU-A, MHS, МТВЗА-ГЯ, радиозатменные наблюдения COSMIC и GRAS; скаттерометрические наблюдения ASCAT; ветровые наблюдения по движению облаков и полям влажности AMV-Geo, AMV-Polar и AMV-LeoGeo.

Цикл анализов – 6 часов.

Используется т. н. технология FGAT (первое приближение интерполируется на усваиваемые наблюдения не только в пространстве, но и во времени).

Время счета комплекса программ обработки и усвоения данных наблюдений составляет 40-45 минут. Анализы выпускаются 4 раза в сутки в сроки 0, 06, 12, 18 ч ВСВ с расчетным временем готовности относительно сроков наблюдений не позже 2 ч 50 мин.

Новые элементы схемы анализа следующие:

1) горизонтальное разрешение полей анализа 0,25 град. (по сравнению с 0,5 град. в старой схеме);

2) по вертикали – 40 уровней до 0,5 гПа (по сравнению с 38 уровнями и экстраполяцией выше 10 гПа в старой схеме);

3) новая схема контроля качества влажности радиозондовых наблюдений;

4) перенастройка схемы контроля качества всех контактных наблюдений;

5) новая схема контроля качества и коррекции смещений спутниковых радиационных наблюдений;

6) способность усваивать отечественные микроволновые спутниковые наблюдения МТВЗА-ГЯ;

7) способность работать в режиме с повышенным разрешением поля инкрементов анализа 0,5 град.;

По сравнению с планировавшейся на испытания конфигурацией, в схему анализа были внесены следующие изменения:

1) усвоение отечественных спутниковых наблюдений МТВЗА-ГЯ не было реализовано ввиду аварии на спутнике, приведшей к неопределенности в его дальнейшей работе. В конечном итоге МТВЗА-ГЯ продолжил работать, но на момент начала испытаний это было неясно, и поэтому усвоение этих новых данных не было включено в испытания;

2) способность работать в режиме с повышенным разрешением поля инкрементов анализа 0,5 град. [4] не была реализована в испытаниях, так как эта схема значительно более вычислительно затратная и в конфигурации с первым приближением NCEP не дает существенного эффекта (см. ниже рис. 9). В условиях начинавшейся эпидемии коронавируса авторы предпочли провести испытания с облегченной схемой анализа с разрешением поля инкрементов 1,5 град., учитывая, что она уже дает большой выигрыш в прогнозе по сравнению со старой схемой. Схему с разрешением поля инкрементов 0,5 град. планируется включить в следующий пакет модификаций.

Методика испытаний

Оценка качества разработанной схемы циклического усвоения данных производилась по критерию качества численного прогноза погоды, стартовавшего с вычисленных с использованием данной схемы полей анализа.

Прогностическая модель: ПЛАВ.

Заблаговременность: 1–5 суток.

Исходный срок: 00 ч ВСВ.

Оценивались поля: H , T , V (уровни 850, 500, 250, 100 гПа), p_0 , T_2m .

Критерии качества прогноза – среднее и среднеквадратичное отклонение (RMS) от полей оперативных анализов, а также S1.

Оценка проводилась по сетке 1,5 град. по широте и долготе.

Результаты испытаний

Как и планировалось, испытания были проведены в период с апреля по сентябрь 2020 года. Всего было верифицировано 165 прогнозов, стартовавших с полей, вычисленных

испытываемой схемой анализа. Как показали испытания, новая модификация вариационного анализа с первым приближением NCEP высокого разрешения значительно превосходит прежнюю по точности вычисляемых на ее основе прогнозов для всех проанализированных заблаговременностей от 1 до 5 суток на всех уровнях и для всех проанализированных согласно программе испытаний метеозаэментов.

Так, по Северному полушарию среднеквадратическая ошибка 5-суточного прогноза H500 составляет 4,46 дам (в старой схеме 4,65 дам), H250 – 6,53 дам (в старой схеме 7,13 дам). Аналогичная ошибка приземной температуры – 3,52 К (в старой схеме – 4,65 К), ошибка вектора ветра на уровне 250 гПа – 14,3 м/с (в старой схеме 14,8 м/с). Подробнее см. рис. 1–6. Можно отметить, что наиболее существенное улучшение наблюдается по приземной температуре, однако уровень ошибок по этому метеозаэменту по-прежнему достаточно высокий (см. рис. 4). Более подробное изучение результатов испытаний показало, что наиболее высокие ошибки прогноза приземной температуры оказались в Азии, в Европе же ошибки прогноза были значительно ниже. Это означает необходимость продолжить работу по совершенствованию процедуры формирования начальных полей модели вблизи модельной орографии, особенно в условиях сложного рельефа.

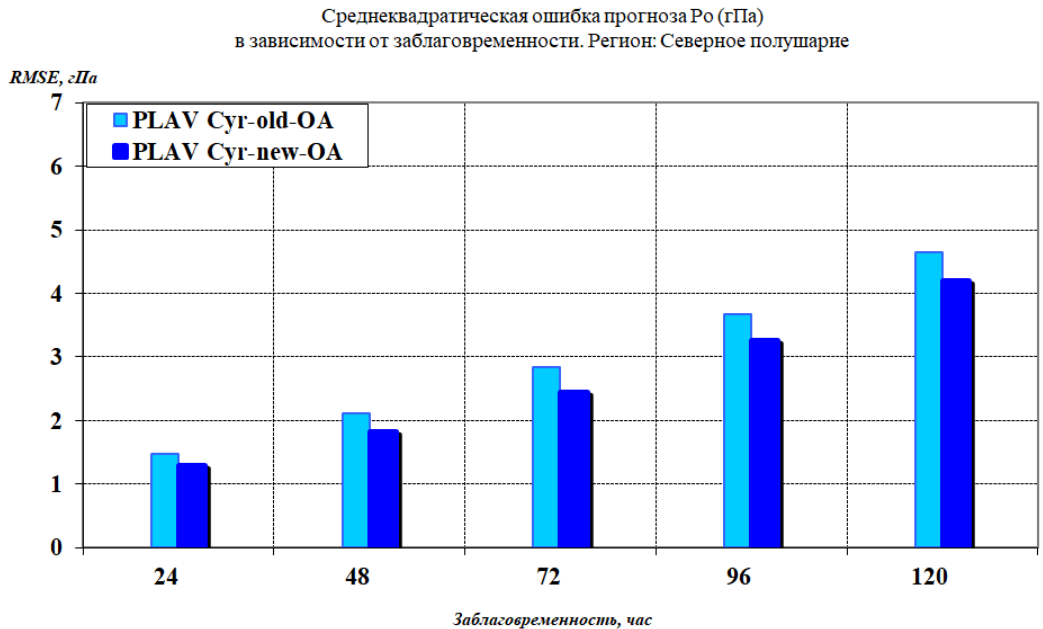


Рис. 1. Среднеквадратичные ошибки прогнозов давления на уровне моря (старая схема – светлые столбики, новая схема – темные столбики).

Среднеквадратическая ошибка прогноза H-500 (дам)
в зависимости от заблаговременности. Регион: Северное полушарие

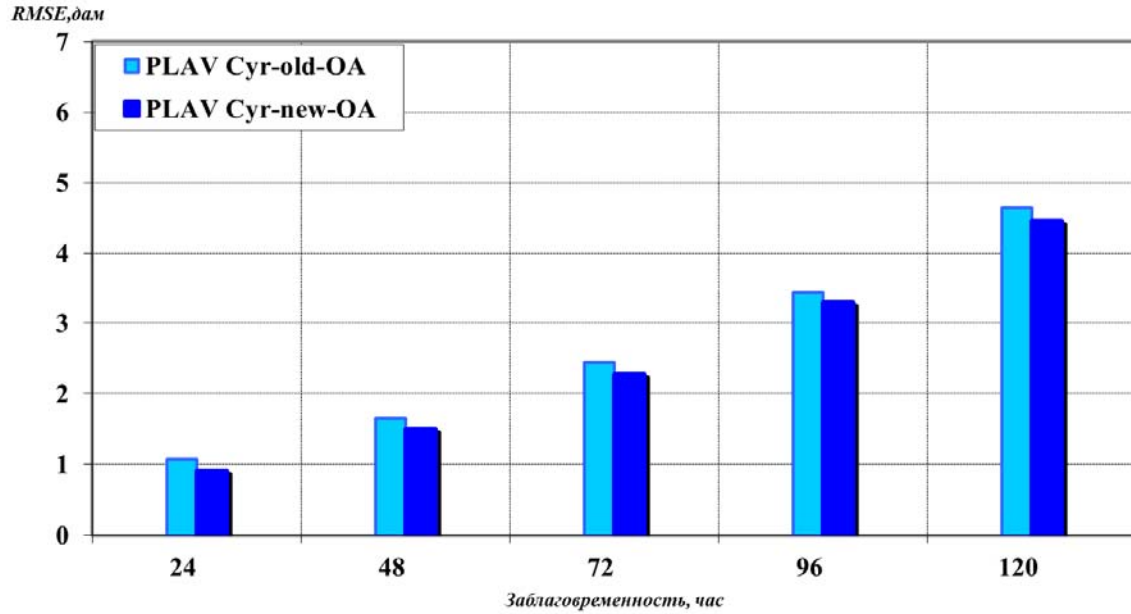


Рис. 2. Среднеквадратичные ошибки прогнозов геопотенциальной высоты поверхности 500 гПа (старая схема – светлые столбики, новая схема – темные столбики).

Градиентная ошибка (S1) прогноза H-500
в зависимости от заблаговременности. Регион: Северное полушарие

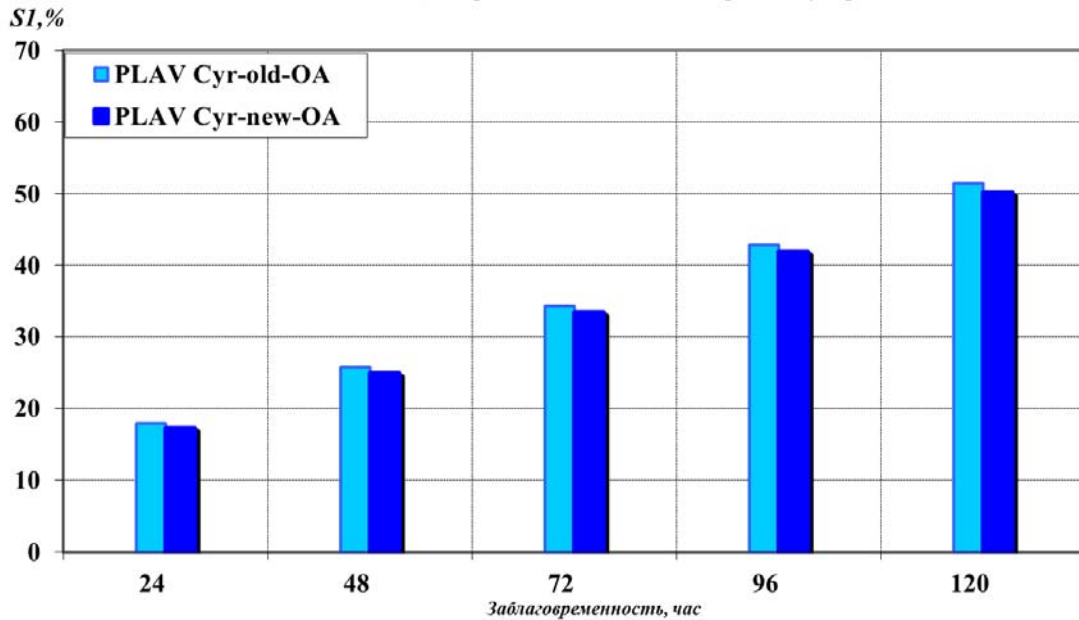


Рис. 3. Градиентная ошибка прогнозов геопотенциальной высоты поверхности 500 гПа (старая схема – светлые столбики, новая схема – темные столбики).

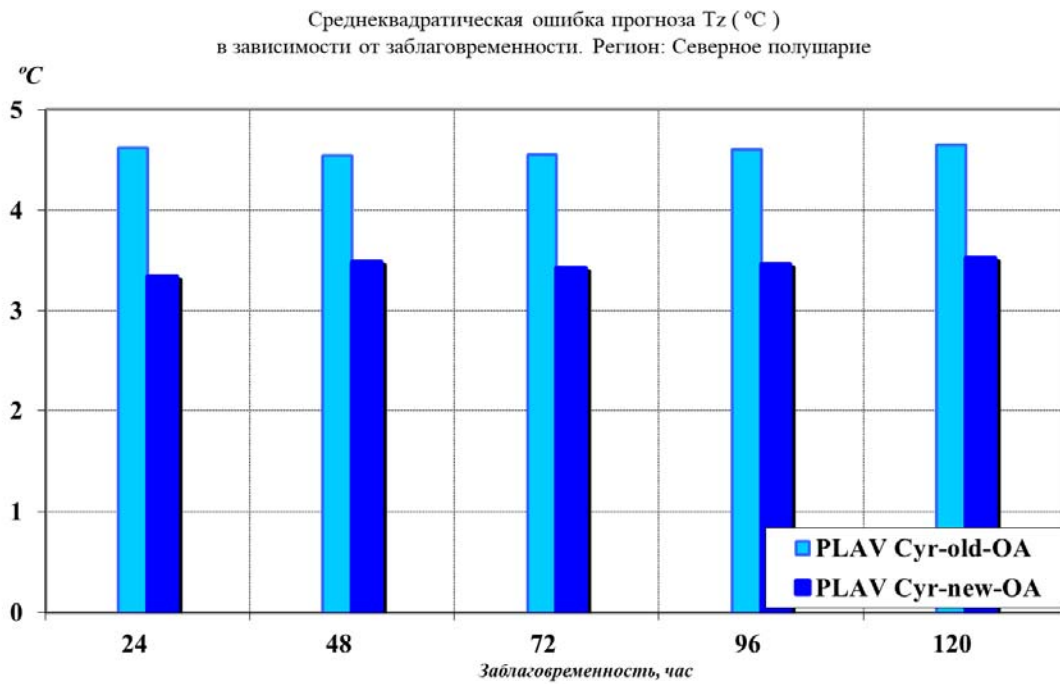


Рис. 4. Среднеквадратичные ошибки прогнозов температуры на уровне 2 м (старая схема – светлые столбики, новая схема – темные столбики).

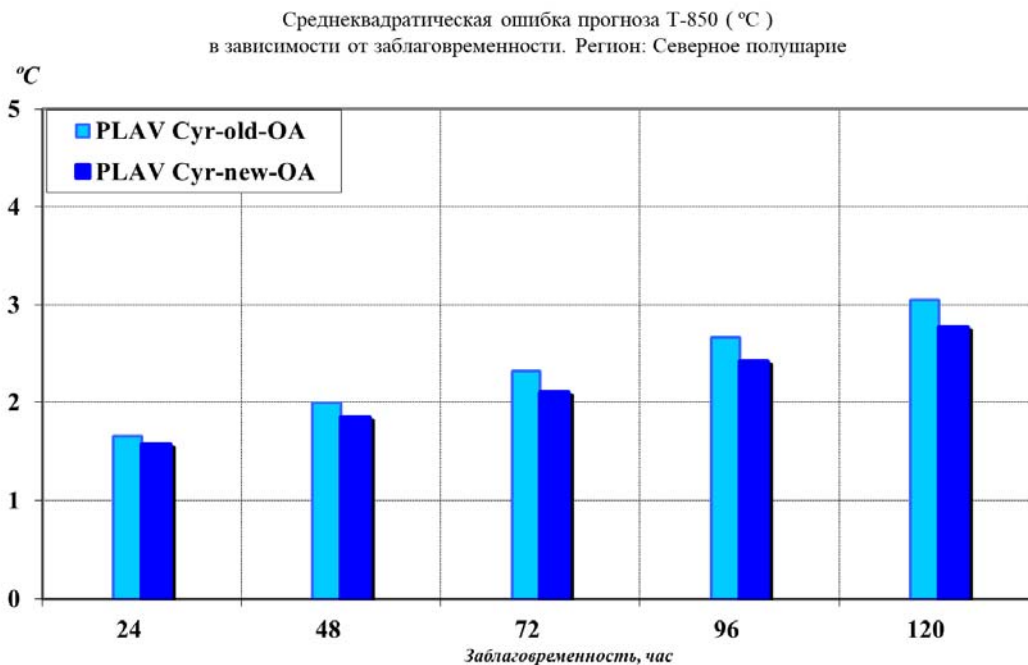


Рис. 5. Среднеквадратичные ошибки прогнозов температуры на уровне 850 гПа (старая схема – светлые столбики, новая схема – темные столбики).

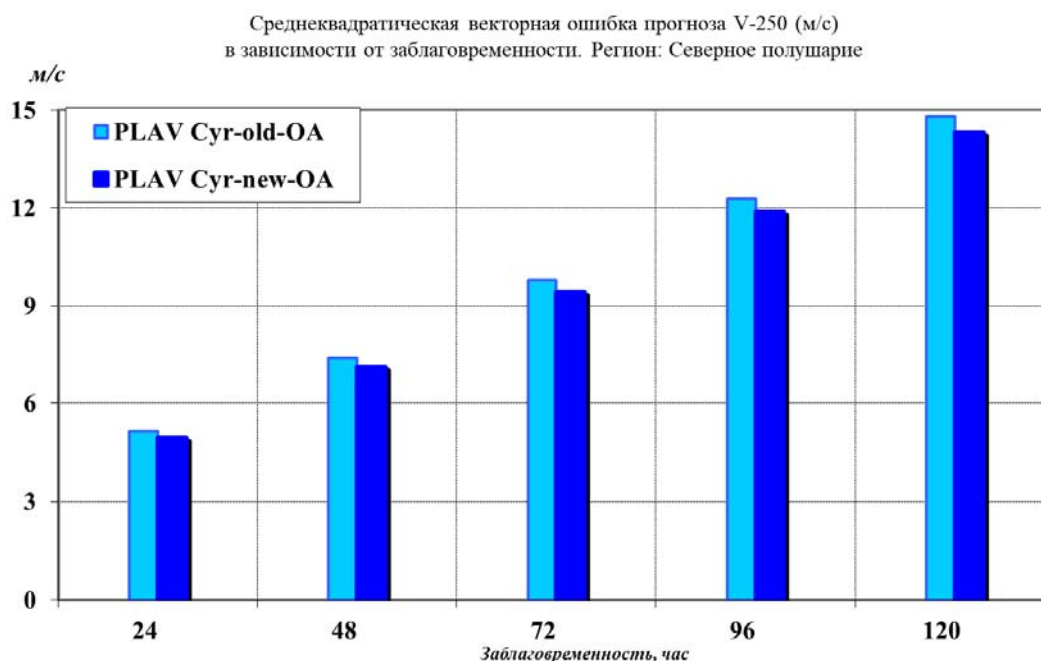


Рис. 6. Среднеквадратичные ошибки прогнозов ветра на уровне 250 гПа (старая схема – светлые столбики, новая схема – темные столбики).

Дополнительно, на рис. 7 показаны средние и среднеквадратичные ошибки 3-суточных прогнозов H500 по 6 месяцам во время испытаний. Видно, что средние ошибки намного меньше средних (систематических) ошибок. Также видно, что новая схема показала существенно лучшие результаты по сравнению со старой схемой за каждый из 6 месяцев испытаний.

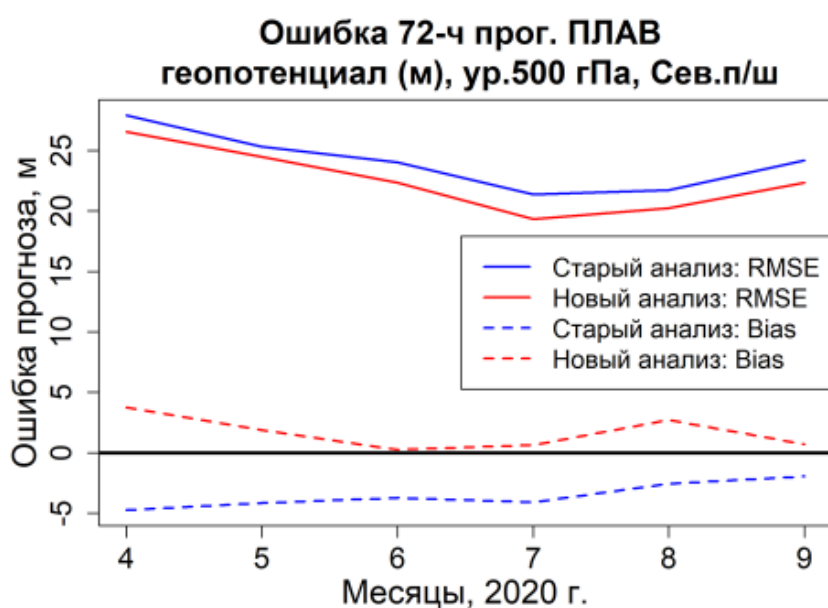


Рис. 7. Средние и среднеквадратичные ошибки 3-суточных прогнозов H500 по месяцам.

Еще более существенное улучшение видно на рис. 8, где приведены среднеквадратичные ошибки 5-суточных прогнозов T100 по месяцам.

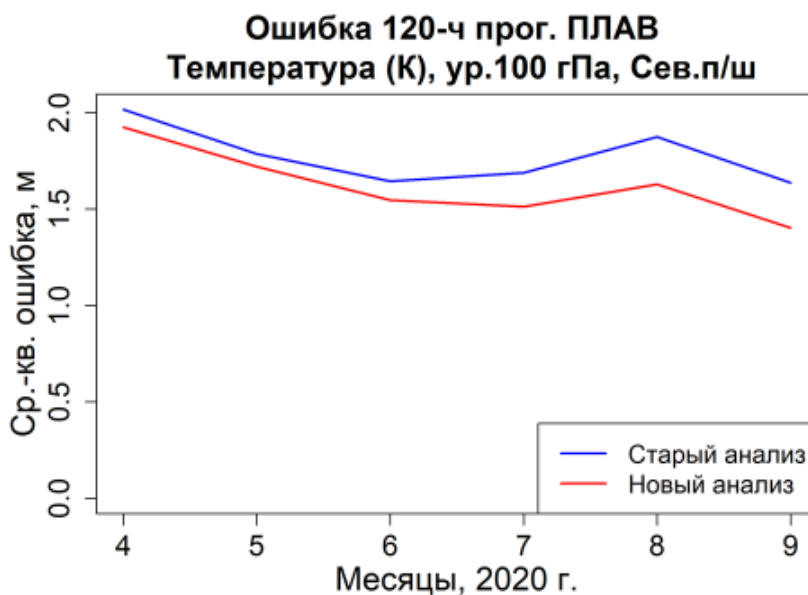


Рис. 8. Среднеквадратичные ошибки 5-суточных прогнозов T100 по месяцам.

На рис. 9 показаны результаты сравнения прогнозов по испытываемому анализу (синий) и по анализу с высоким разрешением поля инкрементов 0,5 град. (красный). Период осреднения результатов: 1–15 августа 2020 г. Видно, что различия много меньше отличий от старого анализа (см. выше) и ощутимы только в слое 50–100 гПа.

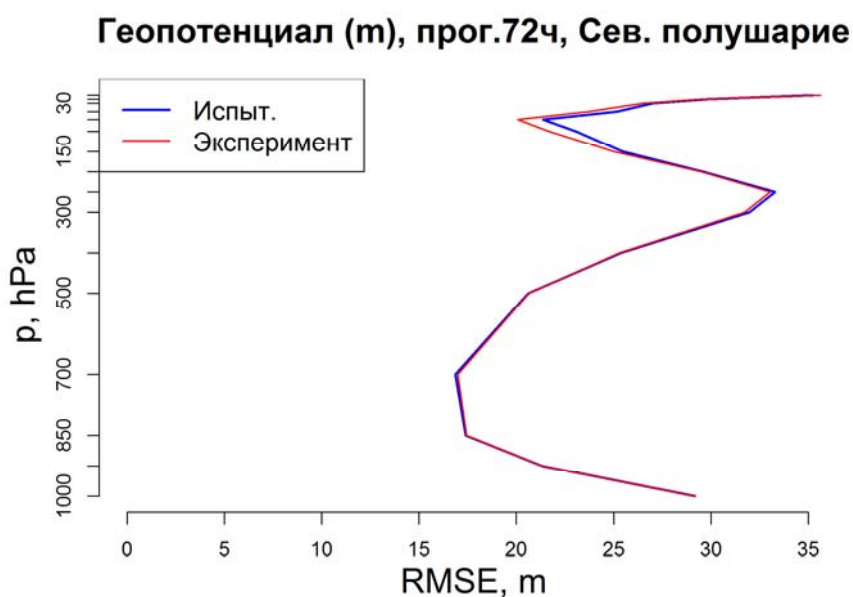


Рис. 9. Результат сравнения прогнозов по испытываемому анализу (синий) и по анализу с высоким разрешением поля инкрементов 0,5 град. (красный).

Результаты оперативных испытаний демонстрируют надежность системы. Так, было выявлено только четыре сбоя – все связанные с доступом к прогнозу NCEP.

Внедрение

Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета решением от 16.12.2020 г. рекомендовала внедрить новую технологию глобального вариационного усвоения данных в конфигурации с полями первого приближения NCEP разрешением 0,25 град. в оперативную эксплуатацию в ФГБУ «ГВЦ Росгидромета» и ФГБУ «Гидрометцентр России».

Заключение

Развитие системы глобального вариационно-ансамблевого усвоения данных производится в настоящее время в двух направлениях. Во-первых, в сторону более эффективного использования информации, содержащейся в ансамбле первых приближений. Во-вторых, в сторону более полного извлечения информации, содержащейся в данных спутниковых наблюдений. Разрабатываются методика и численная схема гибридного вариационно-ансамблевого усвоения с использованием подходов, предложенных в [7–9]. Ведутся работы, направленные на повышение результативности усвоения имеющихся и новых спутниковых наблюдений, включая отечественные микроволновые наблюдения МТВЗА-ГЯ и гиперспектральные инфракрасные наблюдения ИКФС-2, с использованием результатов, полученных в [5, 6]. Создаваемые технологии основаны на наших собственных исследованиях и разработках.

11

Список литературы

1. Гайфулин Д.Р., Цырульников М.Д., Успенский А.Б., Крамчанинова Е.К., Успенский С.А., Свиренко П.И., Горбунов М.Е. Использование информации спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ в системе усвоения данных Гидрометцентра России // Метеорология и гидрология. – 2017. – № 9. – Р. 36–47.

2. Зеленко А.А., Вильфанд Р.М., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С., Цырульников М.Д., Свиренко П.И. Система усвоения океанографических данных и ретроспективный анализ гидрофизических полей мирового океана // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 52, № 4. – С. 501–513.

3. Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шляева А.В., Мизяк В.Г., Рогутов В.С., Богословский Н.Н., Гойман Г.С., Махнорылова С.В., Юрова А.Ю., Шашкин В.В. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза. – М.: Триада лтд, 2017. – 166 с.

4. Цырульников М.Д., Свиренко П.И., Гайфулин Д.Р., Горбунов М.Е., Успенский А.Б. Развитие системы оперативного усвоения данных метеорологических наблюдений в Гидрометцентре России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2019. – № 4 (374). – С. 112–126.

5. Gayfulin D., Tsyurulnikov M., Uspensky A. Assessment and Adaptive Correction of Observations in Atmospheric Sounding Channels of the Satellite Microwave Radiometer MTVZA-GY // Pure and Applied Geophysics. – 2018. – Vol. 175, no. 10. – P. 3653–3670. DOI: 10.1007/s00024-018-1917-7.

6. Gorin V.E., Tsyurulnikov M.D. Estimation of multivariate observation-error statistics for AMSU-A data // Monthly Weather Review. – 2011. – Vol. 139, no. 12. – P. 3765-3780. – DOI: 10.1175/2011MWR3554.1.

7. Tsyurulnikov M., Gayfulin D. A limited-area spatio-temporal stochastic pattern generator for simulation of uncertainties in ensemble applications // Meteorologische Zeitschrift. – 2017. – Vol. 26, no. 5. – P. 549-566. – DOI: 10.1127/metz/2017/0815.

8. Tsyurulnikov M., Rakitko A. A Hierarchical Bayes ensemble Kalman Filter // Physica D (Nonlinear Phenomena). – 2017. – Vol. 338. – P. 1–16. – DOI:10.1016/j.physd.2016.07.009.

9. Tsyurulnikov M., Rakitko A. Impact of non-stationarity on hybrid ensemble filters: A study with a doubly stochastic advection-diffusion-decay model // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. – 2019. – Vol. 145, no. 722. – P. 2255–2271. DOI: 10.1002/QJ.3556.

А.В. Муравьев, Д.Б. Киктев, А.В. Смирнов

**УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ
РАДИОЛОКАЦИОННОГО НАУКАСТИНГА ОСАДКОВ
И РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРИФИКАЦИИ
В ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД ГОДА (МАЙ – СЕНТЯБРЬ 2020 г.)**

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации

Введение

В течение 2020 года в рамках темы 1.1.5 Плана НИТР Росгидромета на 2020–2024 гг. «Развитие методов и технологий детерминистского и вероятностного наукастинга гидрометеорологических величин и явлений на основе данных дистанционного зондирования атмосферы, контактных метеорологических измерений и мезомасштабных численных прогнозов погоды» были выполнены плановые работы по усовершенствованию системы вероятностного прогноза интенсивности осадков на срок до 2 часов на основе экстраполяции радиолокационных данных как оптического потока с пространственным разрешением 2 км и временной детализацией 10 минут.

Как и на предшествующих этапах развития системы наукастинга осадков, данная работа выполнялась в тесном и плодотворном сотрудничестве Гидрометцентра России и Центральной аэрологической обсерватории Росгидромета (ЦАО).

Предварительно сделаем одно терминологическое замечание и одно содержательное уточнение. Во-первых, будем употреблять словосочетание «радиолокационный наукастинг», имея в виду «прогноз... на основе экстраполяции радиолокационных данных как оптического потока». Во-вторых, в ходе выполнения темы удалось развернуть систему наукастинга с пространственным разрешением радиолокационных полей в исходной сетке ЦАО, поэтому ниже речь будет идти о технологии наукастинга с разрешением 1 км вместо «запланированных» 2 км.

Экстраполяция наблюдений для интенсивности осадков осуществляется с помощью мультипликативной каскадной статистической схемы STEPS, функционирующей в Гидрометцентре России в оперативном режиме с 2018 года [1–4]. Объектом прогноза служат

обновляемые каждые 10 минут поля интенсивности осадков с временной детализацией 10 минут на сетке с шагом 2 км (в оперативном варианте) и 1 км (в усовершенствованном варианте).

Усовершенствование технологии радарного наукастинга версии 2018 г. заключалось в следующем:

- первоначальный район прогноза, примерно совпадавший с ЦФО и покрытый данными девяти ДМРЛ-С, расширен до области, примерно совпадающей с ЕТР и с обеспечением данными 28 ДМРЛ-С;

- развернута новая версия схемы STEPSpy [7] (на Python, вместо C++), не накладывающая ограничений на размерность обрабатываемых полей и позволяющая использовать поля в исходной радиолокационной сетке ЦАО с размером ячейки 1×1 км;

- произвольная размерность поля позволила перейти к объединенным начальным и прогностическим полям, охватывающим существенную часть ЕТР, что сделало возможным заполнять прогностической информацией зоны теней и устранять нарушения в областях пересечения зон обзоров;

- лаговая генерация ансамблей заменена генерированием ансамблей с десятью прогностическими реализациями на каждом прогностическом сроке.

Усовершенствованная технология начала работать в Гидрометцентре России в квазиоперативном режиме с марта 2020 г. параллельно с оперативной схемой радиолокационного наукастинга осадков. Верификация наукастинга осадков была проведена по данным наблюдений и прогнозов в интервале май – сентябрь 2020 г., который мы называем по традиции прежних испытаний «теплым периодом года».

Версия системы наукастинга осадков. Область ответственности

Первое и, пожалуй, основное изменение оперативной схемы радиолокационного наукастинга осадков заключалось в построении поля, состоящего из объединения всех возможных круговых обзоров ДМРЛ-С, обеспечивающих покрытие ЕТР. При таком объединении была существенно увеличена вычислительная эффективность статистической схемы лагранжевой экстраполяции, так как прямое расширение сети за счет подключения все новых локаторов с параллельным расчетом прогностических полей не обеспечивало масштабируемости системы наукастинга.

В период испытаний для объединения были задействованы данные следующих 28 локаторов, указываемых в заголовке netcdf-файла, содержащего начальное поле наблюдения:

RUDO (Оренбург), RUDP (Петрозаводск), RUTD (Тамбов), RUDX (Архангельск), RAVO (Воейково), РАКТ (Котлас), RUDB (Брянск), RUDV (Вологда), RUDG (Волгоград), RATL (Тула), RAKD (Краснодар), RUDT (Ставрополь), RUWJ (Валдай), RAMI (Миллерово), RAVN (Внуково), RAKU (Курск), RUDI (Ижевск), RAYL (Элиста), RUDL (Смоленск), RASM (Самара), RABG (Белгород), RUDM (Мин. Воды), RUDK (Кострома), RUDZ (Казань), RAVL (Вел. Луки), RUDU (Уфа), RUDN (Ниж.Новгород), RAKW (Киров).

В новой системе наукастинга с расчетным ядром STEPSru входные и выходные поля имеют размерность 1951×2151 узлов в километровом разрешении, однако для более эффективного заполнения данными с имеющихся локаторов эти поля расположены в повернутой проекции Альберса (рис. 1). На оперативной карте ЦАО внутри сиреневой сферической трапеции в четырех регулярных координатах (две долготы и две широты) «область ответственности» выделена синим полигоном, в котором (в нерегулярных координатах) размещена матрица с размером 1951 точка по юго-восточной и северо-западной сторонам полигона и 2151 точка по юго-западной и северо-восточной сторонам полигона. Круговые зоны покрытия всех перечисленных выше ДМРЛ-С расположены наиболее компактно внутри выделенного синего полигона.

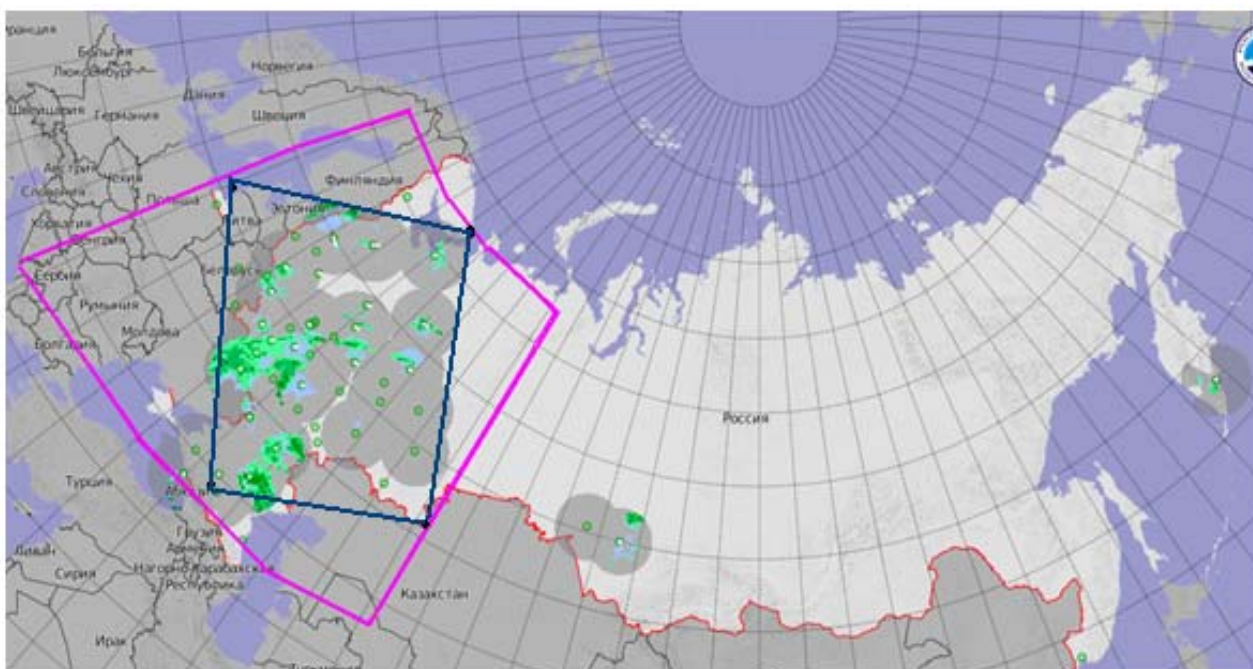


Рис. 1. Область ответственности системы наукастинга осадков на основе модели STEPSru, внутри синего полигона; сиреневым цветом выделена сферическая трапеция, в которой представлено первичное поле анимации на сайте Гидрометцентра России. Карта отражает ситуацию ноября 2020 г. (сайт ЦАО).

Более разнообразными оказались и форматы данных, допускаемые системой STEPru, благодаря чему для удобства представления результатов на веб-странице было решено входные поля оставить в исходном формате netcdf (ncdf4), а выходные поля выпускать в графическом формате tiff.

По условиям испытаний прогнозы составлялись каждые 10 минут в интервале с 1 мая по 30 сентября 2020 г., при этом архивы наблюдений и прогнозов оказались намного более полными по сравнению с предыдущими испытаниями и содержали прогнозы практически по всем возможным срокам в количестве около 22 тысяч. Но одновременно на порядки увеличились объемы данных и соответственно усложнились задачи оценок качества, однако имелось преимущество, перевешивающее перечисленные трудности – вместо около трех десятков полей обзоров отдельных радиолокаторов имелось хотя и большое (матрица 1591×2151 вместо 256×256), но единственное объединенное поле.

Время расчетов статистических характеристик верификации было ожидаемо чрезвычайно большим. Например, для оценки трех ошибок по точкам поля (ME, MSE, MAE) для одной (из 15-ти) заблаговременностей персональный компьютер с 64-разрядной операционной системой, оперативной памятью 4 Гб и быстродействием 3,2 ГГц затрачивает около 16 часов, а для расчета поля критерия Брайера для одной заблаговременности и одного порога – около 36 часов.

Обработка данных при отсутствии наблюдений

В зонах обзора большинства локаторов находятся неустранимые помехи в виде строений, труб, деревьев и т. д., которые называются «местниками». Возникающие за ними области радиолокационной тени в виде планиметрических секторов становятся постоянными спутниками всех карт отражаемости, и восполнить эти зоны тени можно лишь отчасти и для ограниченного количества величин, которые наблюдаются другими локаторами, метеорологическими и автоматическими станциями, спутниками, поставляются системами объективного анализа или восполняются первыми приближениями гидродинамических моделей.

В системах радиолокационного наукастинга осадков существует проблема покрытия области тени того или иного локатора при наличии пространственных областей сплошных осадков, движущихся в сторону зоны тени. Эта проблема оказывается неразрешимой в ситуациях, когда оценка качества прогноза производится на основе радиолокационных данных, используемых в виде начальных полей; например, система оптического потока модели STEPS удовлетворительно прогнозирует пространственную эволюцию выделенной области осадков, но в зоне тени качество этого воспроизведения оценить невозможно. Ниже

в результатах верификации все точки объединенного поля, не обеспеченные радиолокационным наблюдением, заполнены константами отсутствия. Так как при оценках качества константы отсутствия в каких-либо точках поля, возникающие в отдельные моменты времени, приводили к исключению данной точки из процедуры верификации, то из максимально возможного количества 4196601 точек (1951×2151) в полях оценок было задействовано в среднем около полумиллиона точек с числовыми значениями.

Помимо практически неустраняемых проблем местников существуют проблемы и с полнотой поступлений данных от наблюдательной сети. Судя по ежеквартальным аналитическим отчетам ЦАО о результатах р/л наблюдений на сети ДМРЛ Росгидромета, состоящей из 36 р/л в 2020 г., поступление данных может оказаться неполным примерно для 20 % локаторов за квартал. Полнота поступлений от отдельных локаторов может варьироваться в очень широких пределах: по отчету за 1 квартал 2020 г. полнота данных с 8 локаторов колебалась в интервале от 11 до 95 %. При этом пробелы в поступлении данных наблюдений в области ответственности схемы наукастинга были зафиксированы у шести ДМРЛ (из 28).

Приведем один из примеров визуально заметного преимущества прогноза по объединенному полю, которое заключается в возможности освещения области тени, либо существующей из-за наличия местников, либо возникающей при сбое работы локатора [8] (рис. 2).

Общее поле собирается по прогностическим полям отдельных локаторов в количестве около 12 ДМРЛ-С в Центральном регионе (рис. 2а). Правило сборки: в области пересечения округов обзора берется максимальное значение интенсивности осадков. В течение этого прогноза наблюдался сбой на радиолокаторе Внуково с отчетливо проявляющимися контурами квадрата. Поток, состоящий из четко обозначенной полосы, «набегает» изнутри квадрата локатора Смоленск на его восточную сторону как на непреодолимую стенку, и исчезает. Прогноз практически испорчен.

Заметны следующие особенности (рис. 2б). Во-первых, произошло изменение общей формы и интенсивности: границы области стали менее выраженными и снизилась интенсивность, особенно в очаговой зоне в Смоленской области. Во-вторых, и это главное, поток продолжил движение и заполнил Московскую область так, как и происходило в реальности.

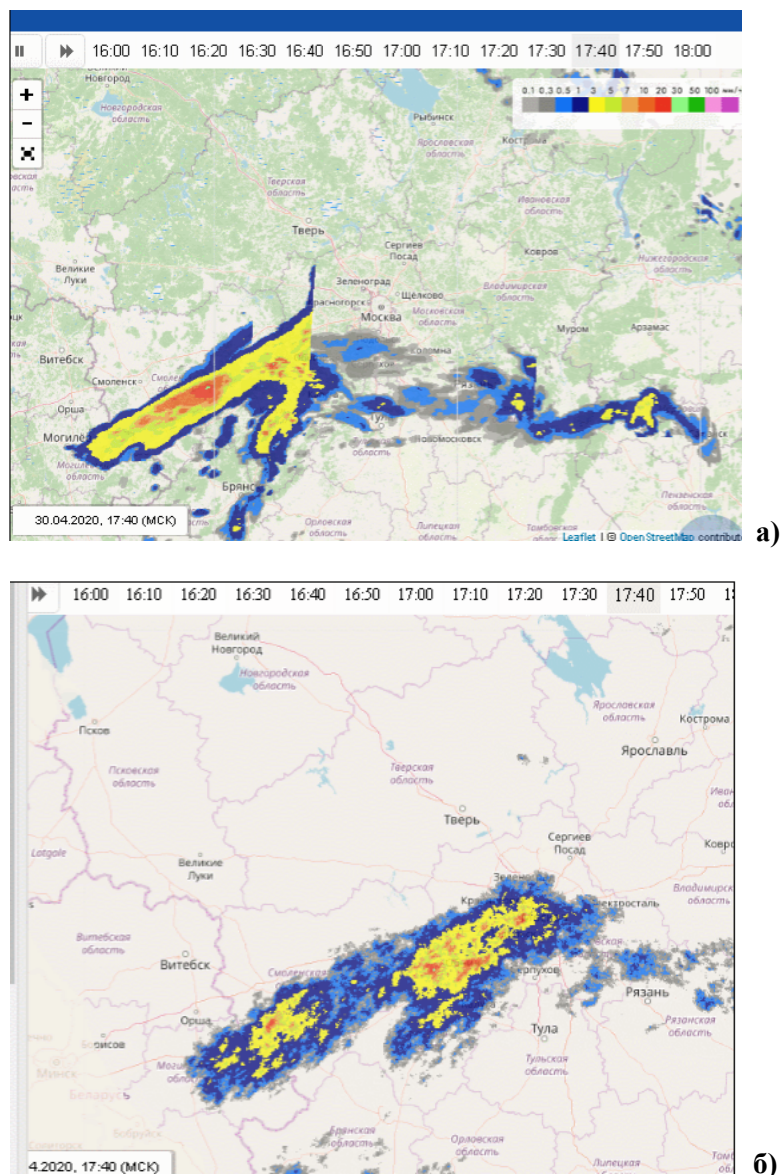


Рис. 2. Результаты наукастинга интенсивности осадков в 15:50 30.04.2020 на 1 ч 50 мин по территории ЦФО в оперативной схеме: с объединением прогностических полей по зонам обзора локаторов(а) и в усовершенствованной версии, использующей объединенные начальные и прогностические поля (б).

Вероятностная верификация наукастинга в теплый период май – сентябрь 2020 года

В течение испытаний 2020 года были накоплены архивы объединенных полей наблюдений и таким же способом объединенных полей прогнозов по модели STEPSpy. В качестве контрольных данных использованы те же объединенные поля, которые служат начальными полями для модели STEPS. Область верификации показана на рис. 1. Файлы с контрольными полями (далее с «наблюдениями») относятся к одному сроку, именованы

уникальной кодировкой YYYYMMDD_HHMM (год, месяц, день, час, десятков минут) и записаны в формате ncdf4. Прогностические ансамбли (по 10 полей) собраны в одном файле для каждого срока прогноза и для каждой из 15 заблаговременностей (на 10, 20, ..., 150 мин) с уникальной кодировкой YYYYMMDDHHMM_LDE, где LDE – заблаговременность (010, 020, ... 150) и записаны в графическом формате tiff.

Из максимально возможного количества сроков за май – сентябрь 2020 года (153 дня × 24 часа × 6 десятков = 22032) и в наблюдениях, и в прогнозах почти не наблюдалось пробелов. Это заметно отличает испытания 2020 г. от предыдущих, особенно по теплому периоду 2017 г., когда потери в прогнозах могли достигать 10–15 % из-за недостаточно оптимизированной организации вычислительной среды.

Как говорилось выше, проблема использования точек, в которых отсутствуют радиолокационные наблюдения, но в которых могут оказаться прогностические числовые значения, была решена заполнением константами отсутствия в этих же координатах и прогностических полей, что привело к потере существенного количества точек с прогнозами. Количество точек поля с отсутствующими значениями (NA, Not Arithmetic) составляло около 3 млн 600 тыс, т. е. количество точек поля с присутствующими значениями ошибок – около 600 тысяч, что равносильно квадрату со стороной примерно в 775 км. Напомним, что полный «квадрат» имеет сторону около 2049 км.

Демонстрируются две категории оценок. Во-первых, это детерминистские оценки качества (сравнение поля с полем) на основе средних ошибок (ME, Mean Errors), средних квадратов ошибок (MSE, Mean Squared Errors) и средних абсолютных ошибок (MAE, Mean Absolute Errors) для прогнозов на 30, 60, 90, 120 и 150 минут. При этом поле наблюдения сравнивается со средним по ансамблю полем и с «первым» полем ансамбля, которое является главным прогностическим полем, вокруг которого с учетом дисперсии ошибок радарных наблюдений генерируется ансамбль. Во-вторых, это вероятностные оценки качества (поле наблюдений с ансамблем прогнозов) на основе показателя Брайера (BS, Brier Score) и критерия Брайера (BSS, Brier Skill Score) для прогноза на 60 мин и для порогов интенсивности осадков 0,5, 1, 2 и 4 мм/ч.

Каждое поле ошибок может быть представлено графически, что позволяет делать выводы об областях качественного или неудовлетворительного прогноза и формулировать рекомендации по учету систематических ошибок или по усовершенствованию самой прогностической модели.

Ниже будут продемонстрированы табличные характеристики пространственного распределения простейшего вида:

min – минимальное значение;

q25 – квантиль 25 % (первый квартиль);
med – медиана (второй квартиль);
mean – среднее арифметическое значение;
q75 – квантиль 75 % (третий квартиль);
max – максимальное значение.

Так как квартили выделяют четверти от общего количества точек поля, то они оказываются простейшими пространственными характеристиками значений показателей качества.

Качество прогноза по ансамблевой средней и по первому полю ансамбля

Предварим анализ таблиц следующим замечанием. Так как распределение осадков в десятиминутном накоплении сконцентрировано около нулевого значения и сходно с гамма-распределением, то обычно из анализа исключаются малые величины, одновременно присутствующие в наблюдении и в прогнозе, как это, в частности, делалось в предыдущих испытаниях, в которых использовался критичный порог 0,05 мм. Однако при таком подходе необходимо проверять логическое условие для каждой пары скалярных значений прогноза и наблюдения в каждой точке поля, чтобы оценивать объемы выборок для осреднений. Такая щепетильность была допустима в предыдущих испытаниях, но в 2020 г. это оказалось чрезмерно затратным и пришлось избегать циклов по точкам поля, полностью используя эффективность матричных операций. В связи с вышесказанным цензурированию были подвергнуты сами оценки качества, в сформированных полях ошибок: из всех трех типов полей (ME, MSE, MAE) исключались нулевые значения, однако сверху ограничения не ставились, чтобы выявить количество возможно ошибочных данных наблюдений и наведенных ошибок прогнозов.

В табл. 1 собраны обобщенные характеристики ошибок для среднего по ансамблю поля (ens-avg) и для первого индивидуального поля ансамбля (ens-1st), которое является главным в ансамбле полей, относительно которого генерируются остальные члены ансамбля в схеме STEPS. Первое поле используется в оперативном прогнозе и размещается на сайте Гидрометцентра России.

Сопоставление качества прогноза по первому полю и по среднему ансамблевому проводится с несколькими целями. Если ансамблевая средняя заметно превосходит по качеству индивидуальное поле ансамбля, то это свидетельствует о большей информативности, а значит, и о возможно большей полезности ансамбля. Но если такое превосходство невелико, то при детерминистском прогнозировании, поставляющем пользователю одно прогностическое поле, вполне разумно остановиться на более

экономичном варианте прогнозирования. Однако если поставляются вероятностные прогнозы, то близость качества прогнозов по средней ансамблевой и по индивидуальному члену ансамбля свидетельствует об устойчивом качестве генерируемых ансамблей, которые – при их реалистичной изменчивости – могут представлять качественные оценки вероятностей.

Таблица 1

**Характеристики поля средней ошибки прогнозов (ME)
по средней ансамблевой (ens-avr) и по первому полю ансамбля (ens-1st)**

тип прогн.	Выходная продукция функции R-summary() на значениях поля в километровом разрешении размером 4196601 точек (2151*1951)					
	min	q25	med	mean	q75	max
	<i>Прогноз на 30 мин</i>					
ens-avr	-0.3211	-0.0051	0.0010	0.0008	0.0071	0.0584
ens-1st	-0.3263	-0.0085	0.0002	0.0010	0.0096	0.2930
	<i>Прогноз на 60 мин</i>					
ens-avr	-0.3217	-0.0066	0.0016	0.0014	0.0101	0.0609
ens-1st	-0.3260	-0.0106	0.0007	0.0016	0.0127	0.2903
	<i>Прогноз на 90 мин</i>					
ens-avr	-0.3112	-0.0072	0.0029	0.0024	0.0129	0.0678
ens-1st	-0.3205	-0.0120	0.0007	0.0015	0.0135	0.2882
	<i>Прогноз на 120 мин</i>					
ens-avr	-0.3011	-0.0083	0.0034	0.0027	0.0141	0.0732
ens-1st	-0.3219	-0.0155	-0.0019	-0.0009	0.0122	0.2933
	<i>Прогноз на 150 мин</i>					
ens-avr	-0.3019	-0.0076	0.0049	0.0038	0.0158	0.0843
ens-1st	-0.3273	-0.0194	-0.0026	-0.0022	0.0137	0.3193

Примечание. min, max – экстремумы; q25, med, q75 – три первых квартиля пространственного распределения ошибок (25%-ный квартиль, медиана, 75%-ный квартиль); mean – среднее значение. Количество точек поля с числовыми значениями составляет от 600 до 800 тыс.

Вначале рассмотрим особенности квартильного анализа распределения ошибок по полю. Обилие не нулевых, но близких к нулю значений, отражается на малом значении интерквартильного размаха (q75 – q25), внутри которого сосредоточена половина точек поля ошибок. Небольшие значения ME обусловлены в основном небольшими значениями самих средних фактических и прогностических величин интенсивности осадков в данный период времени.

Напомним, объем выборки равен примерно 22000, в мае – сентябре 2020 г. осадки были привычно неравномерно распределены и по округам, и по времени, но за весь теплый период оказались на всей ЕТР близки к норме. Аналогично небольшие значения ошибок МЕ наблюдались в испытаниях в теплый период 2017 г., когда они сопоставлялись с климатическими нормами и были зафиксированы в наших публикациях по результатам испытаний [3, 4].

В данной таблице заметна асимметричность распределения значений МЕ в сторону отрицательных значений для среднего поля по ансамблю и симметричность – для первого поля ансамбля, в этом заключается основное отличие поля ошибок МЕ для двух типов прогнозов. Так как оценки делаются по разности «прогноз минус наблюдение», то отклонение МЕ в отрицательную область МЕ свидетельствует о занижении прогностических значений по отношению к наблюдениям в конкретных точках поля. Причин может быть много, но если фокусироваться на сравнении ансамбля полей и индивидуального поля, то можно сделать вывод о систематическом занижении интенсивности осадков в остальных полях ансамбля. Однако более точный ответ может быть получен только при анализе конкретных точек поля и при учете качества радиолокационных наблюдений, использованных в формировании объединенного поля новой схемы наукастинга.

В зависимости от роста заблаговременности отмечается небольшое «расползание» квартилей q_{25} в отрицательную и положительную части, соответственно, и рост в положительную сторону медианы и средней арифметической. Экстремальные величины также изменяются. В общем заметна небольшая тенденция к ухудшению качества прогноза (по МЕ) с ростом заблаговременности, а на некоторых характеристиках иногда и с нарушением монотонности.

Проведем сравнение с аналогичными характеристиками для полей МА в зонах обзора отдельных радиолокаторов по теплому периоду испытаний 2017 года.

Как говорилось выше, сравнение не корректно ввиду различных условий формирования выборок для верификации. Так, в 2017 году был использован критический порог 0,05 мм, в результате чего из полной выборки сроков, самой по себе не всегда достаточно полной, оставалось около 10–15 % пар полей наблюдений-прогнозов для верификации. Результаты квартильного анализа оказывались соответственно сдвинуты в область положительных значений, при этом анализ качества был ограничен центральным квадратом 126×126 как наиболее надежно обеспеченным качественными данными отражаемости (что составляет примерно 24 % общей площади зоны обзора). Приблизительное сопоставление возможно поэтому лишь при уменьшении квартильных оценок примерно в столько же раз (от 10 до 15), так как основные потери относятся к

нулевым и близким к нулю значениям, которые большей частью сохраняются в новом варианте формирования выборок в 2020 г. и пропорционально уменьшают эти статистики при осреднении.

Запишем три основные квартиля (q_{25} , med , q_{75}) распределения 15876 значений ошибки прогноза ME на 60 мин в полях локаторов, участвовавших в испытаниях 2017 года:

Курск RAKU	(-0.20, 0.00, 0.10),
Тула RATL	(-0.20, 0.00, 0.10),
Внуково RAVN	(-0.20, -0.10, 0.00),
Воейково RAVO	(-0.10, 0.00, 0.10),
Брянск RUDB	(-0.20, -0.10, 0.10),
Кострома RUDK	(-0.10, 0.00, 0.00),
Смоленск RUDL	(-0.10, -0.10, 0.00),
Н.Новгород RUDN	(0.00, 0.00, 0.10),
Валдай RUWJ	(-0.10, -0.10, 0.00).

Видно, что межквартильный интервал изменяется от 0,1 до 0,3 мм. Если воспользоваться поправкой на объемы выборок, умножая значения квартилей текущего испытания на 0,1 или 0,15, то можно получить вполне сопоставимые значения и самих квартилей и межквартильного интервала, характеризующего дисперсию выборки. Экстремальные значения в обоих испытаниях находились под воздействием редких, но больших ошибок в наблюдениях и сопоставлению не подлежат, однако они также свидетельствуют о большем хвосте в отрицательной области распределения как в оперативной схеме наукастинга по отдельным радиолокаторам, так и по среднему по ансамблю полю в новой схеме. Заметим, что в настоящее время в оперативной схеме наукастинга ансамбли не генерируются.

Перейдем к среднему квадрату ошибки MSE, представленному в табл. 2. Данная статистика мало подходит к анализу случайных величин подобного распределения и более уместна для контроля больших ошибок ввиду сильной чувствительности квадратичной метрики к выбросам. Отсутствие робастности MSE было использовано в предыдущих испытаниях именно для этих целей, и разработчики программ вторичной обработки полей отражаемости в ЦАО неизменно об этом информировались.

Первый вывод относится к сравнению характеристик для среднего по ансамблю поля и первого поля ансамбля: все значения по всем заблаговременностям превышают соответствующие оценки по среднему ансамблевому полю (наиболее заметно по q_{75}), что можно считать свидетельством большей точности среднего по ансамблю поля по сравнению с индивидуальным полем, и это различие возрастает с заблаговременностью. В отличие от свойства ME, в этой оценке не просматривается важное и скорее неблагоприятное свойство ансамбля систематически занижать значения относительно не только поля наблюдения, но и

относительно главного поля ансамбля. Детально этот эффект пока не анализировался, но возможно, что это вызвано асимметричностью датчика случайных чисел в блоке генерации ансамбля модели STEPSpy.

Таблица 2

**Характеристики поля среднего квадрата ошибки прогнозов (MSE)
по средней ансамблевой (ens-avr) и по первому полю ансамбля (ens-1st)**

тип прогн.	Выходная продукция функции R-summary() на значениях поля в километровом разрешении размером 4196601 точек (2151*1951)					
	min	q25	med	mean	q75	max
	<i>Прогноз на 30 мин</i>					
ens-avr	0.0055	0.2043	0.3234	0.4216	0.5056	2023.6
ens-1st	0.0060	0.2655	0.4352	0.6242	0.7080	2023.7
	<i>Прогноз на 60 мин</i>					
ens-avr	0.0120	0.2574	0.3922	0.4910	0.5874	2024.1
ens-1st	0.0160	0.3552	0.5861	0.7984	0.9169	2024.2
	<i>Прогноз на 90 мин</i>					
ens-avr	0.0198	0.2797	0.4180	0.5159	0.6150	2024.6
ens-1st	0.0245	0.4101	0.6458	0.8724	1.0059	2024.7
	<i>Прогноз на 120 мин</i>					
ens-avr	0.0435	0.2896	0.4258	0.5219	0.6221	2024.9
ens-1st	0.0548	0.4387	0.6757	0.8877	1.0184	2025.0
	<i>Прогноз на 150 мин</i>					
ens-avr	0.0469	0.2927	0.4257	0.5214	0.6170	2025.2
ens-1st	0.0692	0.4643	0.6972	0.9035	1.0312	2025.2

Примечание. Обозначения, приведенные в таблице те же, что и в табл. 1.

Сопоставим эти характеристики с аналогичными характеристиками для прогнозов на 60 мин по зонам обзоров отдельных радиолокаторов испытаний 2017 г., прибегнув к тому же приему приведения: для наглядности умножим все значения таблицы, кроме max, на 0,1 (при расчете среднего квадрата знаменатель тот же, что и при расчете средней арифметической). Так как видно относительное сходство медианных значений MSE в табл. 2 (строка для первого поля ансамбля) и табл. 3 (все строки), то можно сделать некоторые выводы о преимуществах и недостатках новой схемы наукастинга по доли занимаемой площади: в половине площади новая схема дает более качественные прогнозы (ошибки менее медианной), в половине – менее качественные (большие медианой).

**Характеристики полей среднего квадрата ошибки (MSE) прогнозов на 60 мин
в зонах обзора радиолокаторов, использованных в испытаниях май-сентябрь 2017 г.**

радар	min	q25	med	mean	q75	max
RAKU	1.80	3.10	3.60	3.73	4.10	36.40
RATL	0.90	2.40	2.90	3.00	3.40	15.00
RAVN	0.90	2.40	2.80	2.87	3.30	64.00
RAVO	1.10	1.80	2.00	2.24	2.40	134.80
RUDB	1.40	3.30	3.80	4.04	4.40	123.10
RUDK	1.10	2.10	2.50	2.85	3.30	67.70
RUDL	1.40	2.40	2.70	2.76	3.00	25.30
RUDN	1.10	2.10	2.40	2.51	2.80	49.20
RUWJ	1.40	2.50	2.80	2.97	3.30	203.50

Примечание: Красным отмечены значения с подозрением в ошибочности данных от соответствующих локаторов, подтвержденные отчасти оценками в полях ME.

Имеются существенные трудности сопоставления полученных результатов по разным испытаниям. С одной стороны, рассматриваемые площади различны по величине и относятся к разным географическим и климатическим условиям, а с другой стороны, кардинально различно влияние ошибок на общие статистические характеристики. В новой схеме ошибка может быть одна на все поле и присутствовать во всех заблаговременностях, при этом ее непросто отнести к конкретному радиолокатору в случаях пересечений областей обзора, а в оперативной схеме ошибка локализована зоной обзора отдельного радиолокатора и может быть легко идентифицирована.

Последняя мера качества детерминистского прогноза (MAE) представлена в табл. 4. Здесь применимы те же замечания относительно величины оценки, которые были сделаны при расчете средней ошибки (ME). В табл. 4 демонстрируется распределение оценок качества по четвертям общей площади области ответственности.

Во-первых, наблюдается небольшое, но постоянное преимущество всех квартилей и средней величины для среднего по ансамблю поля в сравнении с первым полем ансамбля. Во-вторых, ошибки растут в небольшой степени, но постоянно с заблаговременностью. В-третьих, заметно «подавление» ошибок в данных наблюдений в столбце максимальной ошибки. Последний пункт является хорошей иллюстрацией важности робастного оценивания: если чувствительные оценки (класса квадратичных метрик) удобны для обнаружения выбросов, то робастные (в смысле Тьюки) оценки класса порядковых статистик полезны для анализа общих тенденций.

**Характеристики поля средней абсолютной ошибки прогнозов (MAE)
по средней ансамблевой (ens-avr) и по первому полю ансамбля (ens-1st)**

тип прогн.	Выходная продукция функции R-summary() на значениях поля в километровом разрешении размером 4196601 точек (2151*1951)					
	min	q25	med	mean	q75	max
	<i>Прогноз на 30 мин</i>					
ens-avr	0.0128	0.0519	0.0665	0.0671	0.0806	0.3591
ens-1st	0.0122	0.0541	0.0689	0.0704	0.0841	0.3580
	<i>Прогноз на 60 мин</i>					
ens-avr	0.0222	0.0699	0.0881	0.0873	0.1041	0.3690
ens-1st	0.0204	0.0711	0.0917	0.0914	0.1097	0.3778
	<i>Прогноз на 90 мин</i>					
ens-avr	0.0282	0.0810	0.0997	0.0989	0.1172	0.3832
ens-1st	0.0253	0.0826	0.1028	0.1034	0.1229	0.3838
	<i>Прогноз на 120 мин</i>					
ens-avr	0.0318	0.0884	0.1079	0.1070	0.1261	0.3980
ens-1st	0.0324	0.0896	0.1088	0.1099	0.1294	0.4014
	<i>Прогноз на 150 мин</i>					
ens-avr	0.0340	0.0949	0.1143	0.1132	0.1325	0.4008
ens-1st	0.0326	0.0952	0.1153	0.1155	0.1346	0.4029

Примечание. Обозначения, приведенные в таблице, те же, что и в табл. 1

Основной вывод данного раздела можно сформулировать следующим образом. Развернутая и испытанная в теплый период 2020 г. усовершенствованная схема вероятностного наукастинга осадков по радиолокационным данным продемонстрировала либо заметные преимущества, либо сравнимое качество в сравнении с оперативной схемой 2017 года.

Оценки ансамблевого прогноза с помощью показателя Брайера

Ансамблевые прогнозы составлялись по планам НИР в мае – октябре 2019 года и в текущем 2020 г. Сравнить результаты этих испытаний оказывается более затруднительным, чем в предыдущем случае. Поясним причины.

Расширение интервала испытаний в 2019 г. было вызвано авариями на некоторых локаторах и существенными потерями в данных наблюдений. Полное количество сроков для интервала май – октябрь равно $26496 = 184 \text{ сут} \times 24 \text{ часа} \times 6 \text{ десятков минут}$.

Вычислительные ресурсы позволили провести эксперименты по генерированию ансамблей, состоящих только из трех членов. Эксперименты носили скорее разведочный характер для освоения новой технологии и для проверки общих особенностей как ансамблей, так и их членов в отдельности.

По плану НИР 2019 года были проанализированы лаговые ансамбли, которые оказалось технически проще скомпоновать из последовательных детерминистских прогнозов. Из-за ограничений времени и ресурсов лаговые ансамбли собирались по шести последовательным срокам для каждого прогноза в целый час на 60 мин вперед: итого, лаговый ансамбль состоял из 6 членов.

Проиллюстрируем трудности сопоставления по объемам выборок и по размерам полей на примере радиолокационного наукастинга для локатора Курск (RAKU). В 26496 сроках интервала 2019 г. ровно 4416 целых часов. Сбои в потоках данных и в синхронизации полей наблюдений привели к потере примерно 12 % сроков, было накоплено 3878 полных наборов лаговых прогнозов. На новой схеме в 2020 г. удалось добиться более качественной организации всей цепочки прогностической схемы, в результате чего из полного количества 22032 сроков ($153 \times 24 \times 6$) ансамблевые прогнозы с 10 членами удалось составить в 21995 случаях. Объем выборки для верификации вероятностного прогноза в 2020 г. примерно в 5,7 раза оказался выше объема выборки лагового прогноза в 2019 году.

Как и ранее, вначале строятся поля ошибок, а затем с помощью функции `summary()` языка R рассчитываются суммарные пространственные статистики. Здесь возникает проблема отсутствующих наблюдений, которые в функции `summary()` учитываются и выводятся как результат обработки. Прогностические поля ошибок в предыдущих схемах наукастинга, и в оперативной версии в том числе, на месте отсутствующих данных содержат нулевые или небольшие числовые значения из-за требований программного ядра схемы STEPS прежней версии, использующей двумерное преобразование Фурье без опции обработки констант отсутствия. Впоследствии после консультаций со специалистами ЦАО было решено константами отсутствия заполнять и прогностические поля в тех же точках, в которых нет радарных данных.

В испытаниях 2019 года поля обзора одного локатора представляли собой матрицы 254×254 примерно 2-километрового разрешения (64516 точек). Поля в новой схеме наукастинга матрицы содержали 2151×1951 (4196601 точек), из которых исключается значительное количество точек с константами отсутствия, в результате чего в расчете участвует около 800 тысяч точек. Однако и при таких потерях остаток превышает на порядок размер поля локатора, что сильно усложняет проблему сравнения результатов верификации.

Рассмотрим таблицы суммарных характеристик пространственного распределения показателя Брайера для оценки качества ансамблевых прогнозов осадков в категории «не менее определенного порога»; здесь использованы категории с порогами 0,5, 1 и 2 мм/ч.

Вначале напомним расчетную формулу для показателя Брайера:

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

где p – прогностическая вероятность, $o = 1/0$ – событие да-нет, N – объем выборки. Оценка отрицательно ориентирована: чем меньше, тем лучше; при идеальном прогнозе $BS = 0$.

В табл. 5 собраны характеристики для порога 0,5 мм. Можно сделать вывод об общем сходстве как по порядку величин квантилей, экстремумов и средней, так и по их порядковому распределению.

Таблица 5

Суммарные характеристики пространственного распределения (1) показателя Брайера качества ансамблевых прогнозов категории «не ниже 0.5 мм/ч» заблаговременностью 60 мин и (2) выборочной повторяемости интенсивности осадков той же категории в мае – сентябре 2020 г., рассчитанные по результатам испытаний в 2019 г. (лаговые прогнозы по зонам обзора локаторов – RAKU, ..., RUDN) и по результатам испытаний в 2020 г. (ансамблевые прогнозы по объединенному полю ЕТР – COMBI)

	min	q25	med	mean	q75	max
RAKU	0.0101	0.0155	0.0168	0.0168	0.0181	0.0274
RATL	0.0050	0.0160	0.0180	0.0177	0.0199	0.0621
RAVN	0.0038	0.0176	0.0205	0.0199	0.0226	0.0381
RUDB	0.0038	0.0181	0.0200	0.0197	0.0218	0.0359
RUDK	0.0147	0.0218	0.0236	0.0238	0.0256	0.0368
RUDL	0.0153	0.0221	0.0237	0.0238	0.0254	0.0450
RUDN	0.0026	0.0196	0.0213	0.0212	0.0231	0.0506
- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -
COMBI	0.0076	0.0208	0.0246	0.0244	0.0279	0.0417
- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -
base	0.0013	0.0267	0.0326	0.0335	0.0403	0.0741

Примечание. В испытаниях 2019 г. ансамбли генерировались лаговым методом по срокам, предшествующим сроку прогноза в целый час (ансамбль из 6 членов), в испытаниях 2020 г. ансамбли генерировались только на основе двух начальных полей (ансамбль из 10 членов). Нижняя строка таблицы (base) состоит из аналогичных характеристик распределения выборочной повторяемости для заданного порога категории.

Как известно, показатель Брайера (Brier Score) чувствителен к повторяемости выделенной категории в наблюдениях, поэтому используется так называемый критерий Брайера (Brier Skill Score), в котором в качестве контрольного используется климатический прогноз. Не учитывая данного обстоятельства, трудно объяснить, почему показатель Брайера уменьшается с увеличением порога. Но по конкретному порогу – в предположениях сходства повторяемостей категории и при статистической обеспеченности оценок – такое сравнение провести вполне допустимо.

Не анализируя детально значения показателя табл. 5, можно сделать вывод об удовлетворительном сходстве этих двух технологий по показателю Брайера для порога 0,5 мм. Сходное положение сохраняется и в табл. 6. Обращает внимание поведение повторяемости категории 1 мм, примерно в два раза уменьшающейся по сравнению с категориями 0,5 мм по всем характеристикам.

Таблица 6

Суммарные характеристики пространственного распределения (1) показателя Брайера качества ансамблевых прогнозов категории «не ниже 1 мм/ч» заблаговременностью 60 мин и (2) выборочной повторяемости интенсивности осадков той же категории в мае – сентябре 2020 г., рассчитанные по результатам испытаний в 2019 г. (лаговые прогнозы по зонам обзора локаторов – RAKU, ..., RUDN) и по результатам испытаний в 2020 г. (ансамблевые прогнозы по объединенному полю ЕТР – COMBI)

	min	q25	med	mean	q75	max
RAKU	0.0074	0.0115	0.0125	0.0125	0.0136	0.0197
RATL	0.0029	0.0109	0.0129	0.0125	0.0146	0.0554
RAVN	0.0027	0.0112	0.0138	0.0133	0.0155	0.0239
RUDB	0.0029	0.0130	0.0145	0.0141	0.0159	0.0232
RUDK	0.0085	0.0142	0.0156	0.0157	0.0171	0.0255
RUDL	0.0110	0.0157	0.0169	0.0170	0.0182	0.0329
RUDN	0.0025	0.0135	0.0148	0.0145	0.0160	0.0423
- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -
COMBI	0.0019	0.0128	0.0156	0.0155	0.0184	0.0301
- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -
base	0.0004	0.0132	0.0169	0.0175	0.0217	0.0452

В табл. 7 обнаруживается отклонение от предыдущей тенденции: повторяемость категории 2 мм уменьшается по сравнению с категорией 1 мм более чем в два раза.

Суммарные характеристики пространственного распределения (1) показателя Брайера качества ансамблевых прогнозов категории «не ниже 2 мм/ч» заблаговременностью 60 мин и (2) выборочной повторяемости интенсивности осадков той же категории в мае – сентябре 2020 г., рассчитанные по результатам испытаний в 2019 г. (лаговые прогнозы по зонам обзора локаторов – RAKU, ..., RUDN) и по результатам испытаний в 2020 г. (ансамблевые прогнозы по объединенному полю ETP – COMBI)

	min	q25	med	mean	q75	max
RAKU	0.0041	0.0073	0.0080	0.0081	0.0089	0.0133
RATL	0.0025	0.0067	0.0085	0.0082	0.0099	0.0406
RAVN	0.0025	0.0067	0.0083	0.0080	0.0095	0.0159
RUDB	0.0026	0.0082	0.0093	0.0092	0.0104	0.0169
RUDK	0.0044	0.0075	0.0084	0.0086	0.0095	0.0171
RUDL	0.0063	0.0097	0.0105	0.0105	0.0113	0.0232
RUDN	0.0025	0.0073	0.0082	0.0080	0.0091	0.0295
- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -
COMBI	0.0004	0.0060	0.0080	0.0079	0.0097	0.0200
- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -
base	0.0000	0.0051	0.0071	0.0074	0.0095	0.0272

Значения BS оказываются ниже (а качество выше) для новой схемы по всем квантилям и по средней ошибке, кроме области больших ошибок (q75 и max), в которой преимущество просматривается примерно для половины использованных локаторов. Это значит, что в области больших ошибок прогноза ($\geq q25$) новая схема для половины областей локаторов может давать еще большие ошибки.

Оценки ансамблевого прогноза с помощью критерия Брайера

Как было сказано выше, оценка качества на основе показателя Брайера (Brier Score) может быть использована для сравнения, например, двух разных прогностических методик между собой только при выполнении основных условий проведения сравнительных испытаний, таких как единый интервал времени, одинаковый набор контрольных станций, совпадающие заблаговременности, одинаковые пороги определения событий и т. д. В предыдущем разделе только прогностический срок соответствовал этим условиям. Полученные выше результаты свидетельствуют лишь о том, что оценки – после дополнительного цензурирования – можно считать сходными "по порядку величин" и новая схема по объединенному полю наследует качественные особенности прогнозов предыдущей схемы, построенной на параллельном прогнозировании в зонах обзора радиолокаторов.

Более информативными являются оценки качества по "относительным характеристикам" верификации, основанным на сопоставлении средних квадратов ошибок методического и некоторого "контрольного" прогноза. В этом случае мы употребляем термин "критерий Брайера", который иногда называется «мерой мастерства для оценки Брайера» (Brier Skill Score). Формула для расчета выглядит следующим образом:

$$BSS = 1 - \frac{BS}{BS_{reference}}$$

где BS и $BS_{reference}$ обозначают показатель Брайера для методического и для контрольного прогнозов соответственно. Значения BSS изменяются от $-\infty$ до 1; нулевое значение достигается при равенстве оценок Брайера для методического и контрольного прогнозов; для идеального прогноза $BSS = 1$.

Контрольными прогнозами берутся, как правило, климатический, инерционный или случайный прогнозы, при этом под климатическим часто подразумевается "выборочная климатология" или, точнее, выборочная повторяемость события. В английской традиции используются термины "base rate", "base line" ("базовый уровень", "базовая доля"). Оценки повторяемостей событий (превышения порогов 0,5, 1 и 2 мм/ч) приведены в табл. 5, 6 и 7 в последних строках с пометкой base.

Уместно сделать следующее замечание об интерпретации "критериальной" оценки. Рассчитать вероятность события "превышения порогового значения" и инерционный прогноз не составляет труда, однако следует иметь в виду выборочную значимость результирующей оценки качества по "критерию", учитывая апостериорность оценок качества контрольных прогнозов по использованной в испытании выборке ("после опыта").

В данной статье приведем результаты сравнения оценки Брайера с оценками по выборочной повторяемости и по выборочной инерции событий «превышения порогов» в 0,5, 1, 2 и 4 мм/ч для прогнозов на 60 минут (табл. 8 и 9).

Так как положительные значения критерия сигнализируют о превышении качества методического прогноза над контрольным, то по характеристикам пространственного распределения (по количеству точек поля) можно сделать следующий вывод: усовершенствованная схема вполне удовлетворительна для порогов до 2 мм/ч при сравнении с выборочной повторяемостью. По столбцу значений, выделенных красным цветом, видно, что около 52 % точек со значениями интенсивности не менее 2 мм удовлетворительно прогнозируются на 60 минут. Естественно, что более высокие пороги и встречаются реже, и прогнозируются хуже, но редкость события требует особых методов верификации и отдельного рассмотрения [6].

**Суммарные характеристики пространственного распределения критерия Брайера
(Brier Skill Score) качества ансамблевых прогнозов на 60 минут категорий**

"не ниже" 0,5, 1, 2 и 4 мм/ч относительно выборочной повторяемости.

Количество использованных точек с числовыми значениями – около 550 тысяч.

Обозначение prop(>0) – доля положительных BSS по точкам поля

thresh	min	q25	med	mean	q75	max	prop(>0)
0.5	-1.5912	0.2558	0.3077	0.2944	0.3521	0.5125	0.9879
1.0	-3.1356	0.0948	0.1755	0.1509	0.2337	0.4664	0.9069
2.0	-8.8000	-0.0974	0.0063	-0.0273	0.0894	0.3759	0.5164
4.0	-Inf	-0.2531	-0.1374	-Inf	-0.0505	0.3571	0.1257

**Суммарные характеристики пространственного распределения критерия Брайера
(Brier Skill Score) качества ансамблевых прогнозов на 60 минут категорий**

"не ниже" 0,5, 1, 2 и 4 мм/ч относительно инерционного прогноза.

Количество использованных точек с числовыми значениями – около 550 тысяч.

Обозначение prop(>0) – доля положительных BSS по точкам поля

thresh	min	q25	med	mean	q75	max	prop(>0)
0.5	-1.1897	-0.0881	-0.0308	-0.0362	0.0238	0.2224	0.3549
1.0	-2.1648	-0.0602	0.0000	-0.0070	0.0577	0.3068	0.4976
2.0	-4.8889	-0.0142	0.0543	0.0409	0.1172	0.4056	0.7037
4.0	-Inf	0.0468	0.1330	-Inf	0.2050	0.5818	0.8316

Известно, что моделирование и прогнозирование осадков сопряжены с такими трудностями, которые делают осадки особой "метрикой качества" моделей и получить высокие оценки прогноза трудно на всех прогностических сроках. В практике верификации прогнозов осадков контрольными прогнозами часто служат случайные прогнозы, которыми иногда считаются климатические прогнозы в классическом смысле слова, когда такую климатологию можно обеспечить надежными и репрезентативными наблюдениями. Отметим, что критерий Брайера в сравнении с выборочной климатологией для оценки качества краткосрочного прогноза осадков часто используется в различных метеослужбах мира (например, в США, Австралии, в Европейском центре среднесрочных прогнозов).

На кратких и сверхкратких сроках сильную конкуренцию всем прогнозам составляют инерционные прогнозы – "на завтра то же, что сегодня". Представим соответствующие

результаты сравнения оценки Брайера методического прогноза с оценкой Брайера инерционного прогноза (табл. 9). Из данной таблицы видно, что качество методического прогноза в сравнении с инерционным прогнозом растет вместе с ростом порога. Это значит, что на более высоких интенсивностях осадков инерционный прогноз становится все менее надежным, что вполне естественно и что дает дополнительные бонусы новой схеме наукастинга.

Таким образом, использованы обновленные и новые характеристики модели STEPS: (а) обработка полей произвольной размерности, (б) ввод и вывод данных многообразных форматов, включая графические, и (в) усовершенствованная технология генерирования ансамблей. Область ответственности расширена примерно до Европейской территории России с использованием данных интерпретации осадков по результатам радиозондирования практически всех ДМРЛ-С (в количестве около 30), прошедших настройку и калибровку в ЦАО Росгидромета. Графические представления выходной продукции новой версии имеют очевидное преимущество перед продукцией предыдущей схемы.

Сопоставление результатов испытаний схемы STEPS по данным в теплый период 2020 года с результатами испытаний по тому же периоду в 2017 г. и по расширенному периоду май – октябрь 2019 г. оказалось затруднительным из-за различных условий формирования выборок и из-за вынужденного расширения выборки в 2019 г., приведшего к нарушению временной однородности сравнительного анализа. Однако, несмотря на ориентировочный характер проведенного сопоставления, возможны содержательные выводы общего характера.

Оценки качества детерминистского прогноза по ансамблевому среднему полю и по первому полю ансамбля показали, что – при цензурировании и некотором приведении к единому масштабу – эти оценки по отдельным показателям либо сопоставимы с результатами верификации предыдущих испытаний по теплому периоду 2017 года, либо превосходят их.

Среднее по ансамблю прогностическое поле обладает немного лучшим качеством по сравнению с прогнозом по первому полю, при этом заметно сглаживая возможные выбросы в отдельных точках поля из-за ошибочных, чрезмерно высоких значений в радиолокационных данных. Учитывая объем выборки, такое превышение можно считать значимым.

По показателю Брайера качество прогноза на 60 минут может быть – в зависимости от локаторов – немного выше или ниже качества лаговых ансамблей оперативной схемы STEPS на порогах 0,5 и 1 мм/ч. Для порога 2 мм/ч качество новой версии вплоть до третьего квартиля пространственного распределения (q_{75}) оказывается немного ниже качества

лаговых прогнозов по всем локаторам, а в области больших ошибок новая схема демонстрирует меньшее качество для примерно половины использованных локаторов. Учитывая различия в объемах выборок и в количестве точек области ответственности, можно сделать вывод о сравнимом по показателю Брайера качестве в целом новой и оперативной схемы вероятностного наукастинга на порогах вплоть до 2 мм/час.

Анализ качества наукастинга на 60 минут для порогов 0,5, 1, 2 и 4 мм/ч по критерию Брайера относительно выборочной климатологии и инерционного прогноза приводит к более обоснованному выводу о преимуществе усовершенствованной версии наукастинга перед оперативной схемой наукастинга осадков.

Совместная технология детерминистского наукастинга и сверхкраткосрочного прогноза осадков на основе экстраполяции данных наблюдений и численного моделирования

Экстраполяция наблюдений для интенсивности осадков осуществлялась с помощью схемы STEPS, функционирующей в Гидрометцентре России в оперативном режиме с 2018 года. Объектом прогноза были обновляемые каждые 10 мин поля интенсивности осадков с временной детализацией 10 мин на сетке с шагом 2 км. На примере Центрального региона ЕТР в рамках схемы STEPS продукция радарного наукастинга на срок до 3 часов «сшивалась» с прогнозами модели COSMO-Ru2. Прогнозы модели COSMO-Ru2 с 10-минутной временной детализацией на срок до 18 часов с усвоением радарных и других видов данных на основе технологии nudging обновлялись раз в 3 часа. Совместные сверхкраткосрочные прогнозы интенсивности осадков с двухкилометровым разрешением обновлялись в режиме поступления свежих радарных данных, т. е. каждые 10 минут.

В период с 1 мая по 30 сентября 2020 года проводились оперативные испытания технологии совместного с наукастингом сверхкраткосрочного прогнозирования.

Для характеристики качества прогнозов ниже будем использовать оценки FAR, POD и BIAS, полученные на основе матриц сопряженности, где элементами являются количества превышений предписанных пороговых уровней в сериях прогнозов и наблюдений за период сравнения (рис. 3):

- доля ложных тревог $FAR=b/(b+d)$;
- доля попаданий $POD=a/(a+c)$;
- частотное смещение $BIAS=(a+b)/(a+c)$.

		наблюдение	
		Да	Нет
прогноз	Да	a	b
	Нет	c	d

Рис. 3. Матрица сопряженности, используемая для расчета категориальных оценок качества прогнозов.

Сопоставление оценок успешности радарного наукастинга осадков по схеме STEPS и прогнозов аналогичной заблаговременности по модели COSMO показывает (рис. 4), что, несмотря на усвоение радарных данных, проблемной стороной численных прогнозов при заблаговременности до 1,5–2,5 ч остается эффект спинапа, что оправдывает применение схемы STEPS на этом временном отрезке.

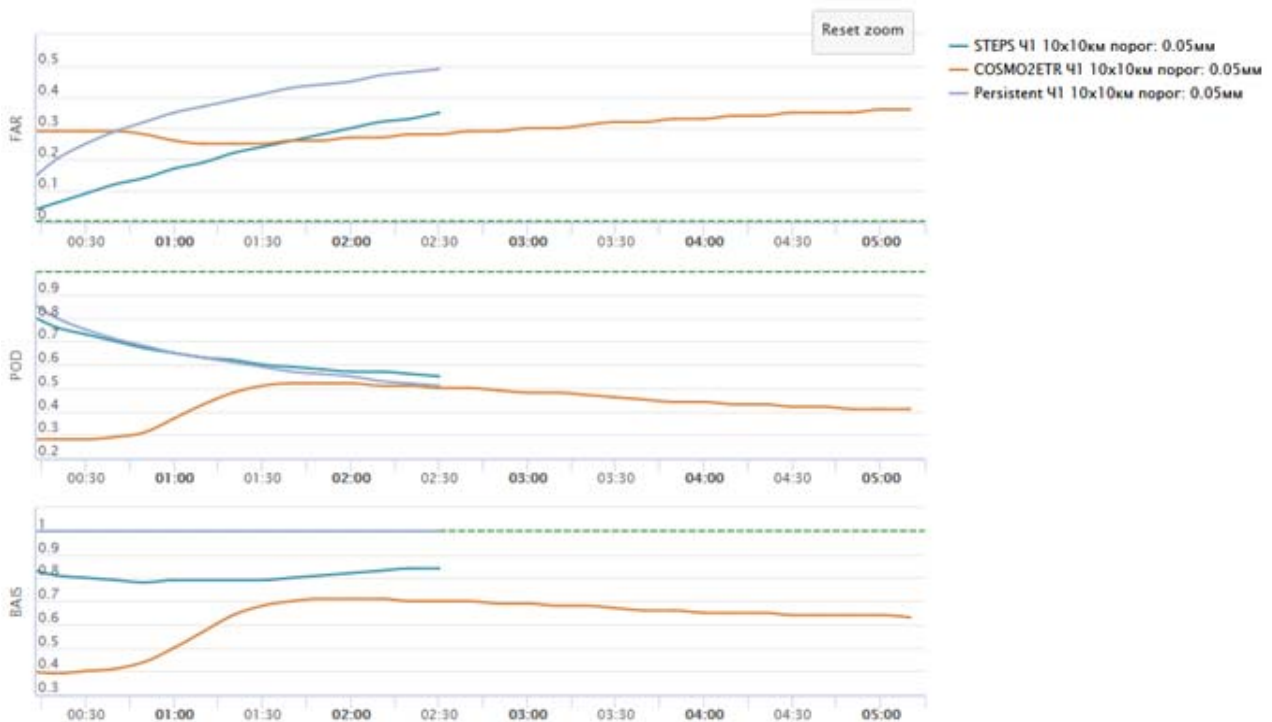


Рис. 4. Оценки качества FAR, POD, BIAS прогнозов осадков с интенсивностью от 0.05 мм/ч как функции заблаговременности прогноза. Оценки инерционного прогноза – сиреневые кривые, оценки качества для системы STEPS – синие кривые, оценки модельных прогнозов – оранжевые кривые.

В сравнении с инерционными прогнозами по некоторым критериям (здесь следует выделить FAR и FSS) прогнозы по схеме STEPS показывали явное превосходство (рис. 4). В то же время в терминах показателя POD успешность радарного наукастинга не сильно

отличалась от инерционного прогноза. Для заблаговременностей 2–3 ч и далее инерционный прогноз интенсивности осадков уже практически не представлял информационной ценности.

«Сшивка» результатов радарного наукастинга и модели COSMO-Ru2 проводилась в рамках схемы STEPS с каскадным разложением полей радарного наукастинга и численного прогноза [5] в интервале заблаговременностей от 1,5 до 3 часов с постепенным повышением веса модельного прогноза. Успешность прогнозов с заблаговременностью более трех часов уже полностью определялась качеством модельных прогнозов. При просмотре последовательности полей «сшитого» прогноза переход от радарного наукастинга к численному прогнозу для глаза происходит практически незаметно.

На рис. 4 графики оценок успешности радарного наукастинга и численного прогноза осадков показаны от одних и тех же моментов старта. На практике расчет прогнозов COSMO-Ru запаздывал, поэтому для «сшивки» радарного наукастинга и численного прогноза приходилось использовать не последний, а предпоследний доступный модельный прогноз. В результате графики показателей успешности «сшитых» прогнозов выглядят так, как это показано на рис. 5.

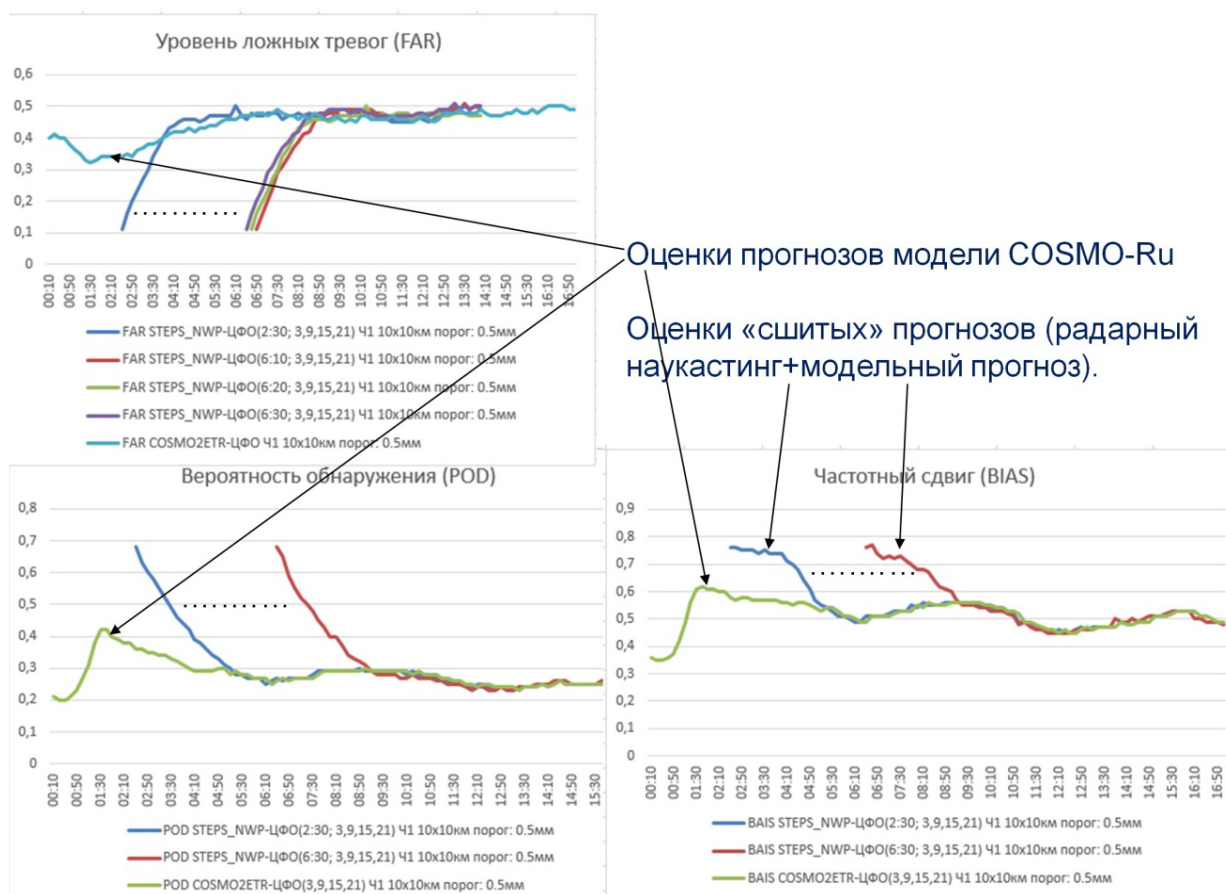


Рис. 5. Оценки FAR, POD и BIAS успешности прогнозов модели COSMO-Ru2 и «сшитых» прогнозов осадков с интенсивностью от 0,5 мм/ч в зависимости от заблаговременности прогноза.

Можно видеть (рис. 5), что один и тот же модельный прогноз многократно «сшивается» с рассчитываемыми каждые десять минут последовательными радарными наукастами до появления очередного нового численного прогноза модели COSMO-Ru2. При этом существует дополнительный потенциал повышения качества "сшитых" прогнозов за счет повышения частоты обновления модельных прогнозов и сокращения времени их расчета. Также качество прогнозов зависит от временного шага интеграции прогностических данных: для 10-минутных квантов качество прогноза при этом ниже, чем для прогнозов с, например, почасовой агрегацией прогностических данных.

Сверхкраткосрочный прогноз непрерывных метеорологических параметров (приземная температура, влажность, направление и скорость ветра)

Процедура статистической коррекции численных прогнозов погоды обычно начинается (а часто этим и заканчивается) с устранения систематического смещения в прогнозах той или иной атмосферной модели. Систематическое смещение оценивается по данным об ошибках прогнозов конкретной модели за некоторый предшествующий период ("тренировочный период"). Обычно тренировочный период выбирается достаточно продолжительным, чтобы получить статистически представительную оценку особенностей систематического поведения (систематических ошибок) модели. С другой стороны, при слишком длинном тренировочном периоде в оценках систематических ошибок прогнозов начинают проявляться посторонние эффекты, связанные с проявлением сезонного хода в метеорологических полях. В различные сезоны года прогностические модели имеют различные систематические ошибки, поэтому корректировать модельный прогноз для, например, зимнего периода, основываясь на оценках ошибок за летний сезон, неэффективно.

При наличии многолетних рядов прогнозов и соответствующих наблюдений можно скомпоновать тренировочные периоды из данных за соответствующий сезон за несколько предыдущих лет и повысить тем самым статистическую представительность оценок систематических ошибок моделей. Проблема здесь, однако, в том, что оперативные прогностические системы совершенствуются и достаточно часто изменяются, что затрагивает и особенности их систематического поведения (систематические ошибки). Выбор продолжительности тренировочного периода на практике обычно является компромиссом между различными достаточно противоречивыми требованиями. Тренировочный период продолжительностью в 20–30 суток обычно дает неплохие результаты.

Для непрерывных метеорологических параметров (температуры, относительной влажности, направления и скорости ветра) авторы настоящей работы комплексировали

полученные по данным последних стационарных наблюдений инерционные прогнозы с результатами как модельных (с использованием модели COSMO-2ETR), так и мульти-модельных прогнозов (с использованием моделей COSMO-2ETR, GEM (Канада), JMA (Япония), ICON (Германия)) после их предварительной статистической коррекции (устранения систематических ошибок). Рис. 6 иллюстрирует процедуру статистической коррекции результатов моделирования по данным последних стационарных наблюдений на примере прогноза температуры.

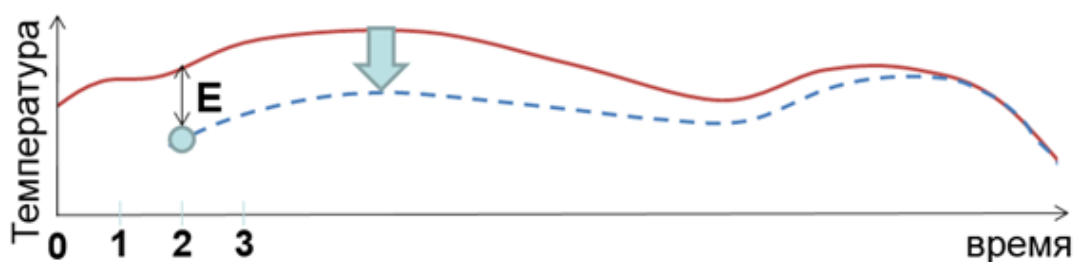


Рис. 6. Иллюстрация процедуры коррекции прогнозов непрерывных метеорологических параметров (температуры, относительной влажности, направления и скорости ветра) с использованием данных последних стационарных наблюдений. Коррекция модельного прогноза производится по мере появления новых данных стационарных наблюдений. Красная кривая – исходный (мульти-) модельный прогноз температуры от 00 ч.; синяя пунктирная кривая – прогноз, скорректированный по наблюдению за 02 ч; E – ошибка прогноза в 02 ч.

В общем виде использовавшаяся авторами процедуру построения сверхкраткосрочного прогноза непрерывных метеорологических параметров можно представить в виде:

$$F(t) = \alpha(t) \cdot O + (1 - \alpha(t)) \sum_i^N \beta_i(t) \cdot (f_i(t) - b_i(t)).$$

Здесь $F(t)$ – результирующий комплексный прогноз с заблаговременностью t ; i – номер прогностической системы в мульти-модельном ансамбле; O – значение последнего стационарного наблюдения в точке прогноза; $f_i(t)$ – прогноз i -й участвующей в ансамбле прогностической модели; $\alpha(t)$, $\beta_i(t)$ – весовые коэффициенты; $b_i(t)$ – систематическая ошибка прогноза для i -й прогностической модели за предшествующий "тренировочный" период.

В период испытаний с мая по сентябрь 2020 года для 710 станций на ЕТР сверхкраткосрочные прогнозы непрерывных метеорологических параметров обновлялись в режиме поступления свежих станционных наблюдений, т. е. раз в 3 часа (при наличии более частых наблюдений схема может быть настроена на режим их поступления). Для всех рассмотренных непрерывных метеорологических параметров оценки средних абсолютных ошибок прогнозов по данной методике на интервале сверхкраткосрочного (до 12–15 ч) прогноза в среднем были меньше, чем соответствующие ошибки инерционных прогнозов и прогнозов индивидуальных моделей, используемых для комплексирования (рис. 7).

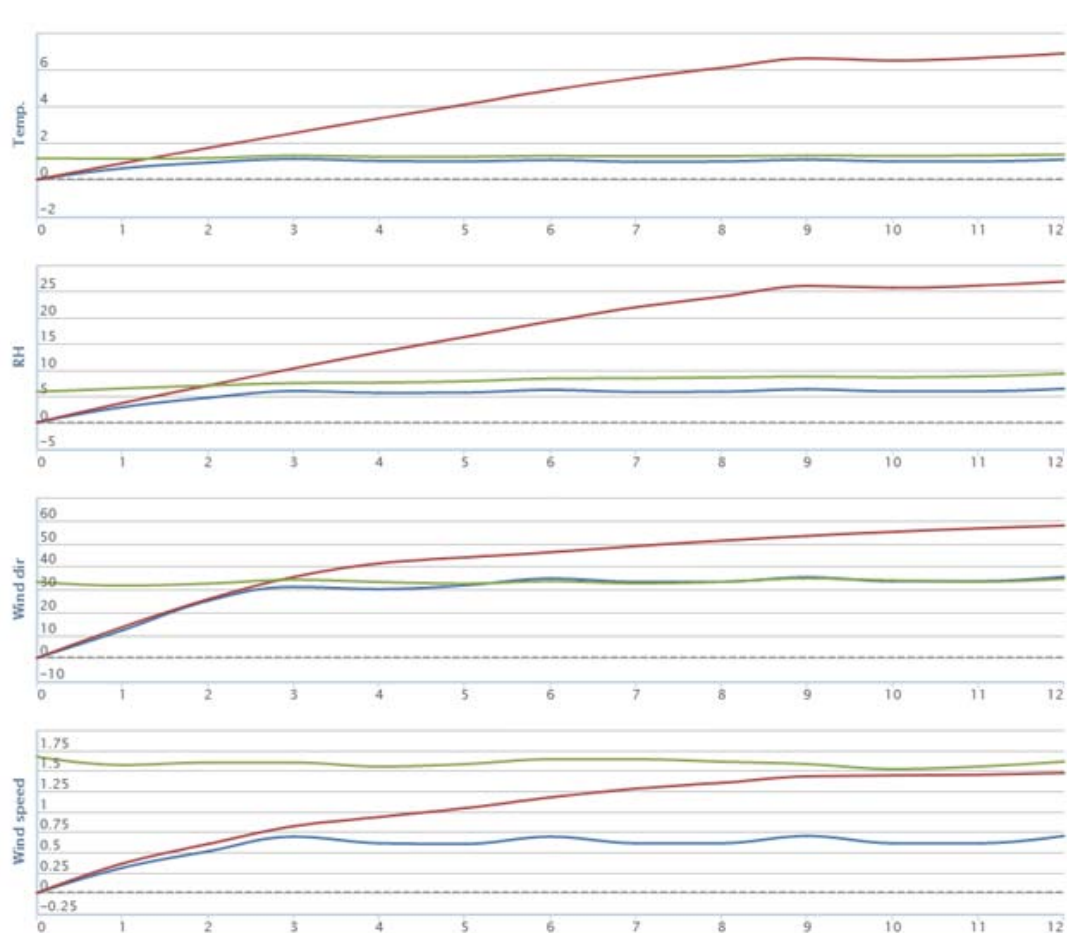


Рис. 7. Средние абсолютные ошибки прогноза температуры, относительной влажности, направления и скорости ветра как функция заблаговременности прогноза.

Синие кривые – прогноз по испытываемой методике; красные кривые – инерционный прогноз; зеленые кривые – прогноз модели COSMO-ETR2. Регион осреднения: ЕТР (710 станций).

Период осреднения: май – сентябрь 2020 г. Частота обновления прогноза: 8 раз/сут.

Заключение

Результаты оперативных испытаний усовершенствованной технологии вероятностного прогноза интенсивности осадков на срок до 2 часов на основе экстраполяции радиолокационных данных с пространственным разрешением 1 км и временной детализацией 10 минут показали следующее. По различным меркам новая схема демонстрирует либо заметное преимущество, либо сопоставимое качество в сравнении с качеством прогнозов по оперативной схеме в теплые периоды 2017 и 2019 гг. Важнейшее преимущество заключается в устранении графических дефектов, возникающих в предыдущей схеме на границах соседних областей радиолокационного обзора в определенных метеорологических ситуациях.

Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета решением от 16 декабря 2020 года рекомендовала «внедрить модернизированную технологию наукастинга интенсивности осадков с пространственным разрешением 1 км в оперативную практику ФГБУ «Гидрометцентр России» в качестве основной в теплый период года вместо ранее внедренной технологии наукастинга интенсивности осадков с пространственным разрешением 2 км (решение ЦМКП от 01.12.2017) и провести оперативные испытания данной технологии для холодного периода года».

ЦМКП также рекомендовала внедрить технологию "сшитого" с наукастингом сверхкраткосрочного прогноза погоды (интенсивности осадков, приземной температуры, относительной влажности, направления и скорости ветра) в оперативную практику ФГБУ «Гидрометцентр России» в качестве основной в теплый период года для Центрального региона ЕТР – до настоящего времени в Росгидромете не было оперативной технологии такого типа.

Список литературы

1. Киктев Д.Б., Муравьев А.В., Смирнов А.В. Прогнозирование осадков с помощью модели мультипликативного каскада: опыт радарного наукастинга // Международная конференция «Турбулентность, динамика атмосферы и климата», посвященная 100-летию со дня рождения академика А.М. Обухова, Москва, 16-18 мая 2018». Тезисы докладов. – 2018. – С. 27.
2. Киктев Д.Б., Муравьев А.В., Смирнов А.В. Наукастинг метеорологических параметров и опасных явлений: опыт реализации и перспективы развития // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2019. – № 4 (374). – С. 151–160.

3. *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.

4. *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.

5. *Bowler N., Pierce C., Seed A.* STEPS: A probabilistic precipitation forecasting scheme which merges an extrapolation nowcast with downscaled NWP // Q. J. R. Meteorol. Soc. – 2006. – Vol. 132. – P. 2127–2155/2006.

6. *Gofa F., Bundel A, Tesini M.S., Marsigli C., Mazur A., Linkowska J., Hoff M., Boucouvala D., Duniec G., Cattani D., Tatarinovich E., Muraviev A.* Appraisal of Challenging Weather forecasts (AWARE) in COSMO // Program and abstracts of the Nov 2020 International Verification Method Workshop. Online. – P. 47. – https://backend.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/i_jwgfvr/Abstracts Book 2020 ivmwo.pdf

7. *Pulkkinen S., Nerini D., Hortal A., Velasco-Forero C., Seed A., Germann U., Foresti L.* Pysteps: an open-source Python library for probabilistic precipitation nowcasting (v1.0) // Geosci. Model Dev. – 2019. – Vol. 12. – P. 4185–4219. – <https://doi.org/10.5194/gmd-12-4185-2019>

8. *Smirnov A.V., Muravev A.V., Kiktev D.B.* Combining precipitation fields on the basis of radar data and mesoscale model output products in nowcasting systems of Hydrometcenter of Russia // Research activities in Earth system modelling. Working Group on Numerical Experimentation. Report No. 50. WCRP Report No.12/2020. – WMO. Geneva. – P. 2–19.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СМЕРЧЕОПАСНОСТИ ВБЛИЗИ ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ РОССИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕЕ ИСПЫТАНИЙ

Научно-производственное объединение «Тайфун», г. Обнинск

Введение

По современным оценкам, у Черноморского побережья России ежегодно возникают около 40 смерчей [2]. Подавляющее большинство из них приходится на прибрежную акваторию Краснодарского края. Как правило, смерчи непродолжительны по времени, малоподвижны и распадаются в море. Однако из истории известны случаи выхода их на берег, повлекшие за собой как сильные разрушения, так и человеческие жертвы [7]. Подобная сосредоточенность смерчей в пределах столь небольшой территории обуславливает ее особый статус – самого смерчеопасного региона России. По этой причине в оперативной практике Росгидромета предусматривается выпуск специализированных штормовых предупреждений о возможном образовании смерчей над Черным морем. Ввиду отсутствия утвержденных методик оценки риска образования черноморских смерчей, прогноз смерчеопасности по данной территории дается в рамках традиционного подхода к анализу синоптических карт. Заблаговременность выдаваемых предупреждений, как правило, невысока.

В 2017 году в НПО «Тайфун» была разработана автоматизированная методика оценки смерчеопасности вблизи Черноморского побережья России, в основу которой были положены современные подходы к прогнозу водяных смерчей, используемые во всем мире, а также региональные особенности смерчеобразования. Эта методика стала первой известной на сегодняшний момент методикой прогноза смерчей в прибрежной акватории Черного моря. Методика включает в себя три этапа, два из которых связаны с краткосрочным прогнозом соответственно смерчеопасных областей в пределах восточной части акватории и смерчеопасных участков побережья Краснодарского края и Республики Крым, один – с наукастингом смерчеобразующих облаков.

Разработанная методика была включена в План испытания и внедрения новых и усовершенствованных технологий (методов) гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов Росгидромета на 2019 год. В испытаниях принимали участие Северо-Кавказское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Северо-Кавказское УГМС) и Специализированный центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Черного и Азовского морей (СЦГМС ЧАМ).

Используемые данные

Краткосрочный прогноз в методике строится на базе выходной продукции модели COSMO-Ru2 и результатов объективного анализа температуры поверхности океана (Sea Surface Temperature, SST), формируемых центром NCEP/NOAA (США).

Файлы с прогнозами по модели COSMO-Ru2 в формате gr1b дважды в сутки скачиваются с сервера ГВЦ Росгидромета (обрабатываются результаты счета по модели от 00 ч и 12 ч по ВСВ). Прогнозы имеют часовой шаг по времени, шаг по пространству составляет 2,2 км, заблаговременность прогнозов до 42 ч [6]. В работе методики используются прогнозы стандартных метеоэлементов на различных расчетных уровнях: давления, температуры воздуха, относительной влажности воздуха, компонент скорости ветра, геопотенциальной высоты.

Файлы с данными SST в формате gr1b ежедневно скачиваются с сервера NOAA [14]. Они имеют разрешение 0,083°. Для сопоставления с прогностическими полями модели COSMO-Ru2 они интерполируются под расчетную сетку данной модели.

Для реализации предложенной в методике схемы наукастинга используются оперативно обновляемые данные радиолокационных наблюдений сети Росгидромета (ДМРЛ-С) разрешением 4×4 км, а также выходная продукция обработки данных от геостационарных спутников серии Meteosat Second Generation, представленная набором облачных ячеек с сопутствующими характеристиками. Обработка осуществляется на базе программного обеспечения SAFNWC/MSG [16].

Описание методики

Прогноз смерчопасных областей. Расчет прогноза производится по методу номограммы Силадьи (Szilagyí Waterspout Nomogram) и по региональному индексу смерчопасности.

Метод номограммы был предложен канадским метеорологом В. Силадьи (W. Szilagyí) для оценки риска образования водяных смерчей над Великими озерами [18]. Метод

базируется на эмпирически полученной номограмме, описывающей множество значений специально отобранных предикторов, при которых прогнозируется высокая вероятность формирования смерчей. Указанное множество на номограмме представлено областью ограниченной красными кривыми (рис. 1). В качестве предикторов рассматриваются разность температуры поверхности моря и температуры воздуха на уровне 850 гПа ($SST - T_{850}$) и глубина конвекции (разность высот уровня равновесия EL и уровня конденсации LCL). Для учета степени устойчивости вихря используется дополнительное ограничение на значение скорости ветра на уровне 850 гПа (V_{850}): если $V_{850} > 21$ м/с, то смерч не прогнозируется, даже если точка попадает в смерчеопасную область.

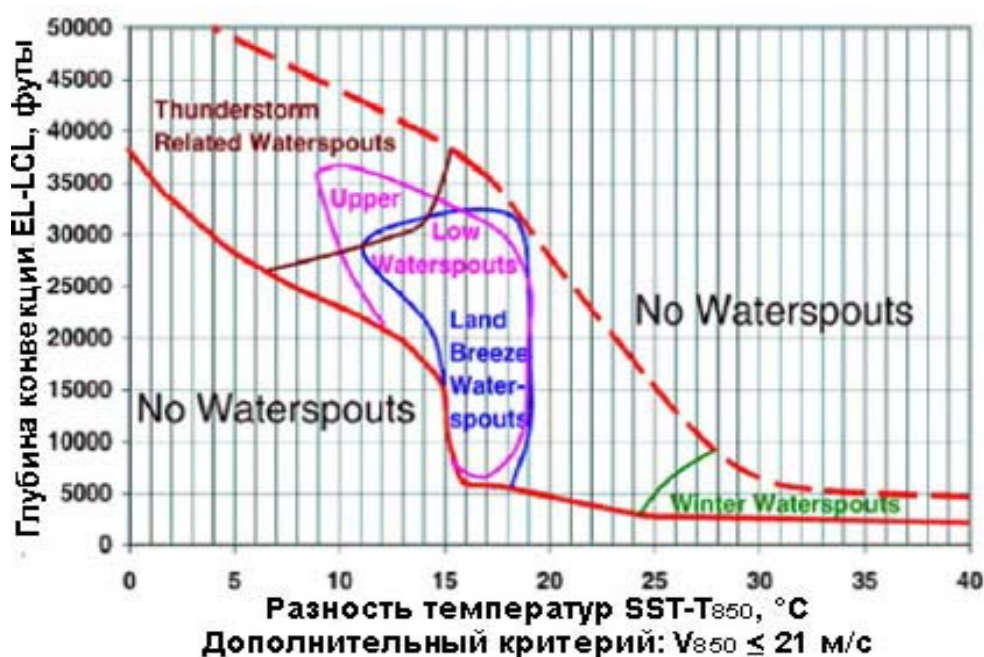


Рис. 1. Номограмма Силады.

В пределах смерчеопасной области на номограмме выделяются подобласти смерчей различных классов:

- смерчи, возникающие из грозовых облаков (thunderstorm related waterspouts – сплошная бордовая кривая);
- смерчи, обусловленные бризовой циркуляцией (land breeze waterspouts – сплошная синяя кривая);
- смерчи, формируемые в условиях высотных циклонов (upper low waterspouts – сплошная розовая кривая);
- зимние смерчи (winter waterspouts – сплошная зеленая кривая).

Номограмма получила широкое распространение. При анализе случаев возникновения водяных смерчей над Средиземным [12], Адриатическим [15], Ионическим [17]

и Балтийским морями [9] была продемонстрирована возможность ее эффективного использования для прогноза смерчей в указанных акваториях.

По результатам авторских испытаний номограммы в акватории Черного моря в 2017–2018 гг. было установлено, что в теплый смерчеопасный период (с мая по октябрь) она показывает большую долю ложных тревог, при этом все возникающие смерчи успешно прогнозируются. Погрешность локализации смерчеопасной области варьируется от 2 до 27 км. В более холодный и значительно менее смерчеопасный период (январь – апрель, ноябрь – декабрь) оправдываемость прогнозов доходит до 88 %, т. е. всего 12 % из них оказываются ложными (с учетом того, что в рассматриваемый переходный период 2017–2018 гг. не было смерчей). Как предполагается, избыточно прогнозируемая по номограмме смерчеопасность может быть использована для оценки временных границ активного смерчеобразования.

Анализ случая возникновения так называемого зимнего смерча вблизи Сочи 3 декабря 2016 г. показал, что номограмма может быть использована и для прогноза подобного рода нетипичных редких смерчей, которые, как правило, возникают из недостаточно развитых по вертикали облаков (рис. 2). Как видно из рис. 2, рассматриваемый смерч возник в непосредственной близости от спрогнозированной по номограмме смерчеопасной области, обозначенной розовым цветом.



Рис. 2. Смерчеопасные области по номограмме Силады на 06 ч ВСВ 03.12.2016 г. (прогноз от 06 ч ВСВ 02.12.2016 г.).

Региональный индекс смерчопасности, получивший название Waterspout Risk Index (WRI), был разработан по результатам статистического анализа выборки значений наиболее известных предикторов водяных смерчей. Выборка относилась к моментам времени регистрации смерчей над Черным морем в 2014-2016 гг. Подобный подход позволил, во-первых, выделить информативные для Черноморского региона варианты расчета предикторов, а во-вторых, определить для них пороговые значения, описывающие локальные условия смерчегенеза. В [1] дано подробное описание данного подхода.

Формула расчета индекса WRI имеет следующий вид:

$$WRI = \frac{1}{6} \cdot [(DT_1 \geq 8) + (DD_{10} \geq 3,3) + (RH_1 \geq 80,7) + (CD \geq 7,6) + (DU_1 \leq 2,5) + (S_1 \leq 6,3)],$$

где DT – разность температуры поверхности моря и температуры воздуха на уровне 1 км ($^{\circ}C$); DD_{10} – потенциал вертикальной завихренности на уровне 10 м ($^{\circ}/км$); RH_1 – относительная влажность воздуха, осредненная в слое 0–1 км (%); CD – глубина конвекции (км); DU_1 – абсолютное значение разности скоростей ветра на уровнях 10 м и 1 км (м/с); S_1 – сдвиг ветра, осредненный в слое 0–1 км (м/(с·км)).

Потенциал вертикальной завихренности – количественная мера горизонтальной деформации поля ветра, используемая для выделения областей, в пределах которых уже отмечается или в перспективе может возникнуть соответствующая завихренность. Как известно, наличие данной завихренности вблизи поверхности является одним из важнейших факторов образования немезоциклонных смерчей [13]. Подавляющее большинство смерчей, возникающих над Черным морем, имеют немезоциклонное происхождение, что в частности обуславливает их малую интенсивность. Для расчета потенциала используется следующая формула:

$$DD_{i,j} = \frac{|DD_{i,j+1} - DD_{i,j}|}{dy} + \frac{|DD_{i+1,j} - DD_{i,j}|}{dx},$$

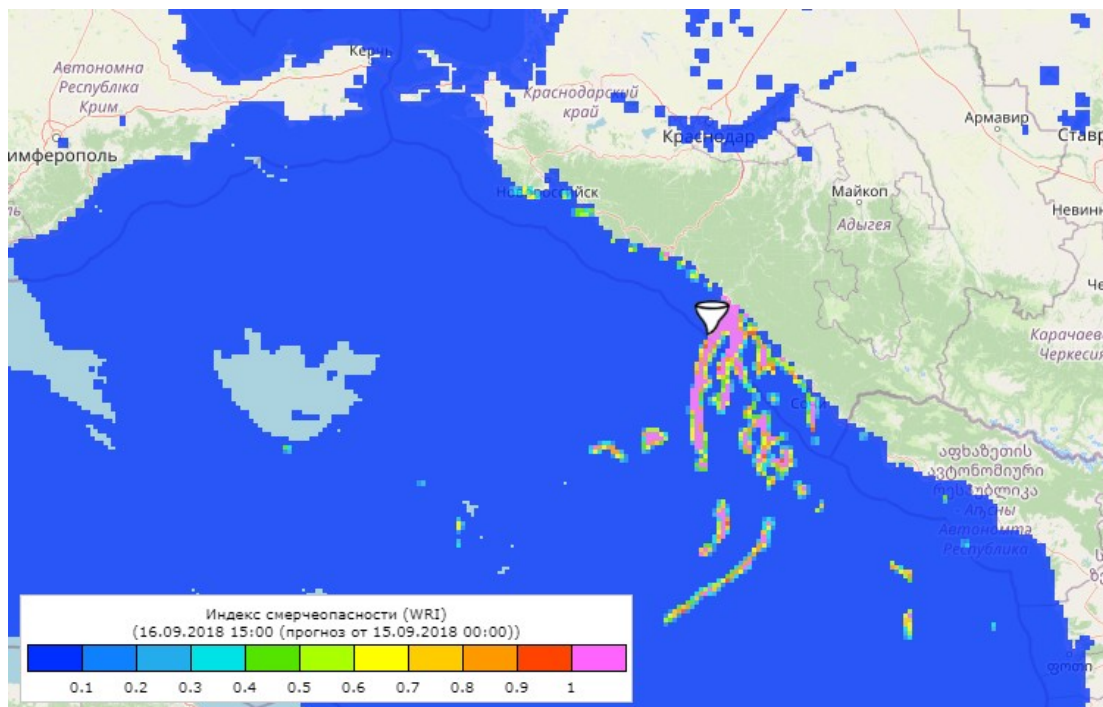
где $DD_{i,j}$ – направление ветра в узле расчетной сетки; dx и dy – шаги сетки в горизонтальной плоскости.

Индекс WRI принимает ограниченный набор значений из диапазона [0, 1/6, 1/3, 0.5, 2/3, 5/6, 1]. Значение индекса характеризует вероятность образования смерчей. Формулу расчета индекса следует интерпретировать следующим образом. Учитывается сумма вкладов от выполнения условий, закрепленных за каждым предиктором. Вклад считается положительным, в количественном плане выражается единицей, если условие выполняется, и отрицательным, выражается нулем, если условие не выполняется. Положительный вклад

от предикторов DU_1 и S_1 учитываются только в том случае, если выполняются условия для первых четырех так называемых образующих предикторов, описывающих благоприятные состояния для инициирования механизма формирования вихря. Предикторы DU_1 и S_1 используются для оценки однородности поля ветра по вертикали. Как известно, большой вертикальный сдвиг и перепады скоростей ветра на различных вертикальных уровнях, могут стать причиной распада только что сформировавшегося вихря [13]. Поэтому отдельное рассмотрение данных предикторов вне связи с образующими предикторами не имеет смысла.

По результатам авторских испытаний индекса WRI в 2017–2018 гг. было установлено, что в теплый смерчеопасный период он обеспечивает наилучшее качество прогноза черноморских смерчей по сравнению с другими известными протестированными индексами [2]. Общая оправдываемость прогноза достигает 78 %, оправдываемость наличия – 43 %, предупрежденность смерчей – 85 %, критерий Багрова – Хайдке – 0,441. Погрешность локализации смерчеопасной области варьируется от 60 до 86 км. В холодный период индекс может давать пропуски смерчей по причине того, что используемое в формуле расчета индекса пороговое значение глубины конвекции относится к теплому периоду. В дальнейшем по мере накопления данных о редких зимних черноморских смерчах планируется получить пороговое значение глубины конвекции и для холодного периода.

На рис. 3 показан пример расчета смерчеопасных областей по индексу WRI на момент регистрации смерча вблизи г. Туапсе 16 сентября 2018 года.



**Рис. 3. Смерчеопасные области по индексу WRI на 15 ч ВСВ 16.09.2018 г.
(прогноз от 00 ч ВСВ 15.09.2018 г.).**

Из рис. 3 видно, что наиболее вероятные области формирования смерчей (показаны розовым) достаточно точно воспроизводили положение участка акватории, вблизи которого в итоге и возник смерч.

Таким образом, методика базируется на двух прогностических методах расчета смерчеопасных областей, каждый из которых предлагается использовать в определенный период года: в теплый период – индекс WRI, в холодный период – метод номограммы Силады.

Для упрощения интерпретации прогнозов в методике предусматривается построение так называемых зон риска смерчей. Рассматриваются зоны трех типов:

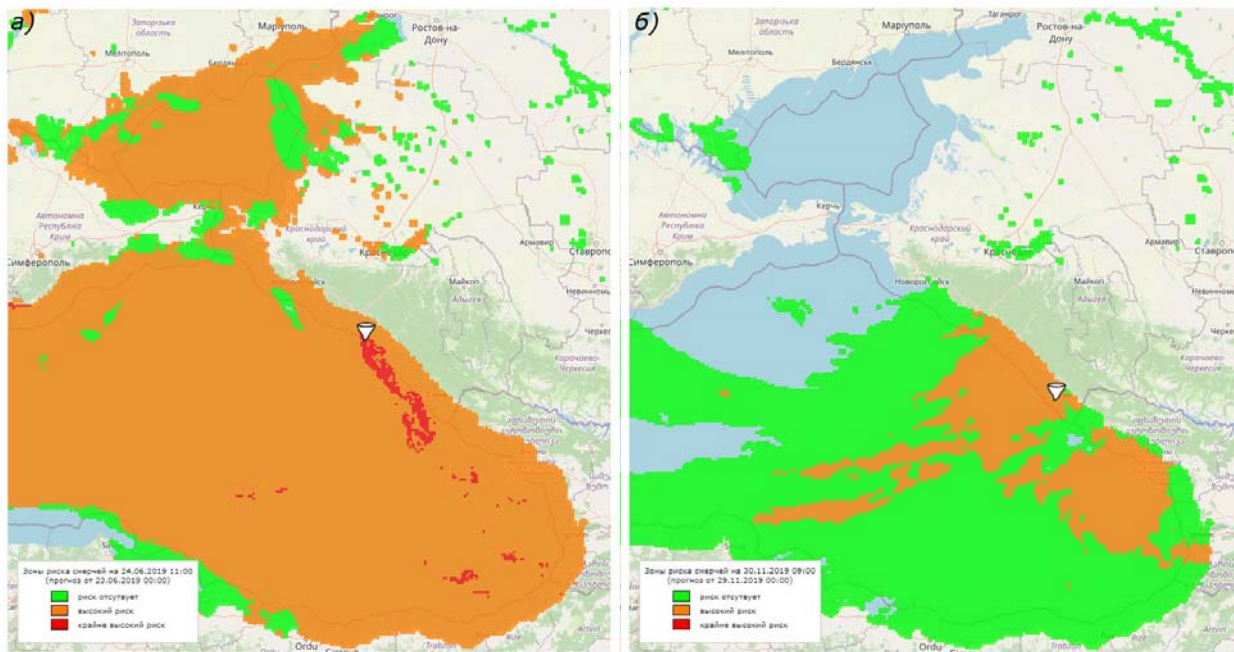
- красная зона – зона крайне высокого риска образования смерчей, в пределах которой дается прогноз смерчеопасности как по индексу WRI (в качестве порогового используется максимальное значение индекса, равное 1), так и по методу номограммы Силады; в теплый период года служит ориентиром для прогнозирования участков побережья, вблизи которых следует ожидать появления смерчей;

- оранжевая зона – зона высокого риска, в пределах которой прогноз смерчеопасности дается по одному из методов, как правило, по методу номограммы Силады; служит ориентиром для прогнозирования смерчеопасных участков побережья в холодный период года;

- зеленая зона – зона, в пределах которой появление смерчей не прогнозируется ни по одному из двух рассматриваемых методов.

На рис. 4 показаны примеры зон риска смерчей для теплого и холодного периодов года, пиктограммами в форме воронки обозначены местоположения регистрировавшихся в это время смерчей.

По результатам авторского тестирования предложенного подхода к расчету зон риска в 2017–2018 гг. были выявлены следующие, хорошо демонстрируемые на указанных примерах особенности рассматриваемых методов прогноза смерчей. В теплый период смерчеопасная область по номограмме (оранжевая зона на рис. 4а) достаточно обширна, в пределе может охватывать всю исследуемую часть акватории, что обуславливает высокую долю ложных тревог, в холодный период прогнозы по номограмме, как правило, более точно локализованы в пространстве (оранжевая зона на рис 4б); смерчеопасная область по индексу WRI в большинстве случаев имеет вытянутую форму, обусловленную локализацией областей горизонтального сдвига поля ветра, в холодный период года эта область, как правило, не обнаруживается, так как индекс WRI не достигает максимального значения по предиктору глубины конвекции.



**Рис. 4. Зоны риска смерчей: на 11 ч ВСВ 24.06.2019 г.,
теплый период, прогноз от 00 ч ВСВ 23.06.2019 г. (а); на 09 ч ВСВ 30.11.2019 г.,
холодный период, прогноз от 00 ч 29.11.2019 г. (б).**

Распознавание смерчеобразующих облаков. Распознавание осуществляется при одновременном выполнении двух условий отбора. В качестве первого условия рассматривается присвоение облачной ячейке максимального класса опасности образования смерчей, в качестве второго – выявление в пределах ячейки смерчеопасных областей по радиолокационным данным. Под облачной ячейкой при этом понимается отдельно взятое облако, обнаруженное по результатам обработки спутниковых и/или радиолокационных данных. В автоматизированной технологии, реализующей расчет по методике, о которой будет сказано далее, для выделения ячеек используется алгоритм Rapid Developing Thunderstorm (RDT), разработанный метеослужбой Франции [8]. Он основан на поиске локальных экстремумов радиояркостной температуры канала IR10.8 мкм по спутниковым данным.

Присвоение классов опасности осуществляется на основании пространственной принадлежности ячейки к той или иной зоне риска смерчей. Рекомендуется при этом учитывать возможную погрешность определения границ ячеек. В частности, для используемого алгоритма RDT по полученным оценкам значение этой погрешности составляет около 9 км. Если ячейка расположена в пределах нескольких зон, то в качестве итогового класса опасности выбирается максимальный (рис. 5). Таким образом, в соответствии с первым условием отбора потенциально несущие смерч облака должны формироваться в красной зоне максимального риска.

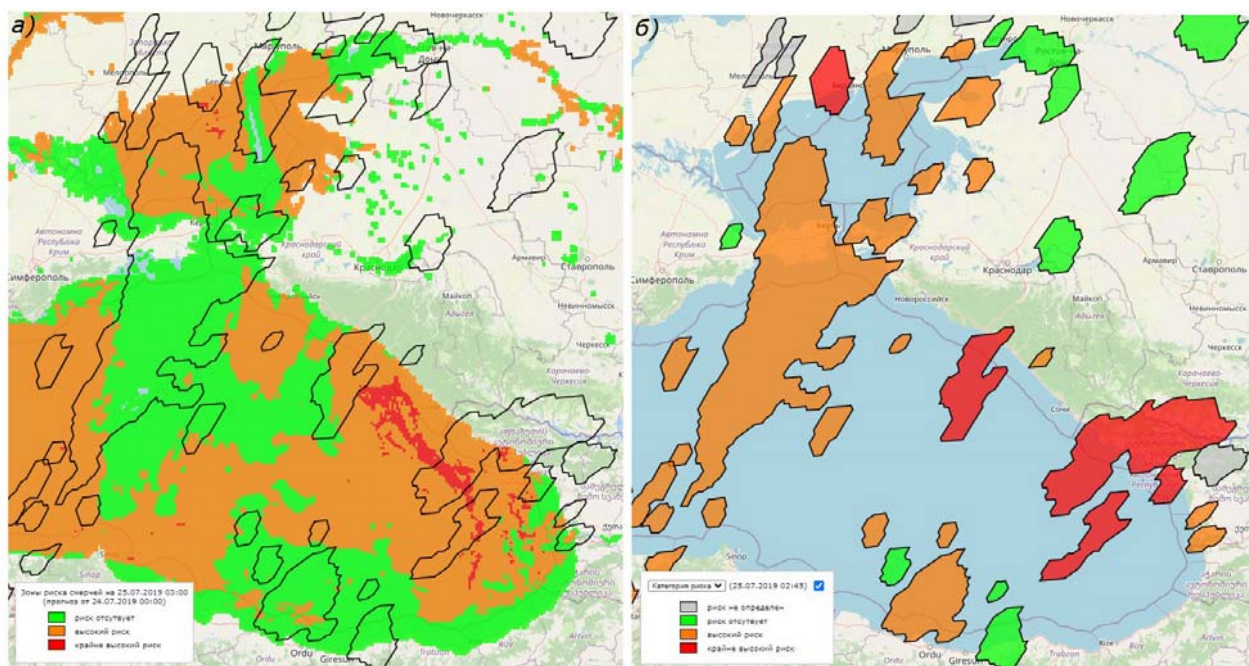


Рис. 5. Пример присвоения облачным ячейкам классов опасности формирования из них смерчей: прогноз зон риска смерчей и положение облачных ячеек (а); облачные ячейки с присвоенным классом опасности (б).

Для выявления смерчеопасных областей по второму условию рассматривается комбинация специально отобранных радиолокационных характеристик, для каждой из которых на выборке данных о смерчеобразующих облаках над Черным морем в 2017 г. были получены пороговые значения:

$$P = \begin{cases} dBZ_m \geq 40dBZ \\ H_{ВГО} \geq 10 \text{ км} \\ VIL \geq 1 \text{ кг/м}^2 \\ C_{я} \in [\text{осадки, ливень, гроза}] \end{cases}$$

где P – риск смерчеобразования, величина, принимающая значение 0 или 1 в зависимости от выполнения всех поставленных условий; dBZ – максимальная отражаемость; $H_{ВГО}$ – высота верхней границы облачности; VIL – вертикально-интегрированная водность; $C_{я}$ – класс метеоявлений. Указанные пороги относятся к теплему периоду года. По этой причине в холодный период распознавание смерчеобразующих облаков не производится.

На рис. 6 показан пример расчета смерчеопасных областей для материнского облака смерча, возникшего вблизи г. Туапсе 26 июля 2019 г. Из рисунка видно, что смерч сформировался на небольшом расстоянии (около 10 км) от выявленной области риска, обозначенной розовым цветом.

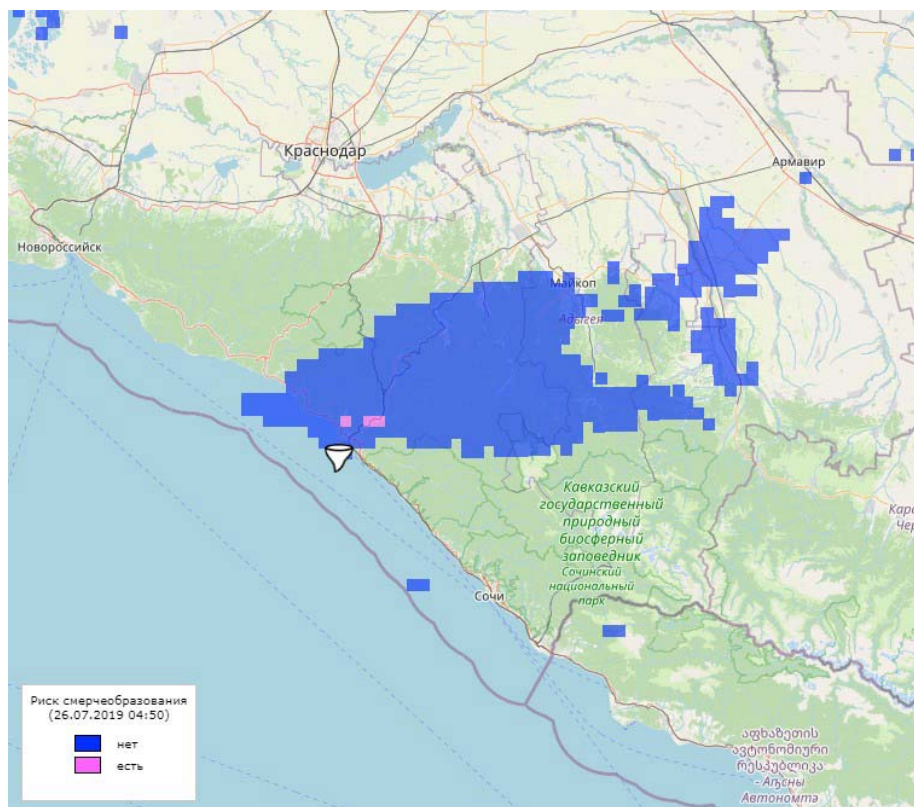


Рис. 6. Риск смерчеобразования по радиолокационным данным на примере материнского облака смерча вблизи г. Туапсе 26.07.2019 г.

Следует подчеркнуть, что предложенный алгоритм выявления смерчопасных областей есть результат обобщения данных о смерчеобразующих облаках. Он лишь указывает на то, что подобные облака, как правило, имеют достаточно высокие значения радиолокационных характеристик, однако, как известно, эти особенности присущи всему классу конвективных облаков, генерирующих опасные явления. По этой причине для целенаправленного выявления материнских облаков смерчей предложенный алгоритм следует рассматривать в совокупности с имеющимся прогнозом опасности их образования. Это обстоятельство обуславливает требование на одновременное выполнение двух выше поставленных условий распознавания смерчеобразующих облаков.

По результатам авторских испытаний предложенной схемы распознавания облаков с потенциальными смерчами в 2018 г. были получены следующие результаты. Показатель предупрежденности смерчеобразующих облаков (отношение количества случаев верного отнесения облаков к классу смерчеобразующих к общему количеству проанализированных случаев облаков со смерчами) составил 66 %. При этом в 63 % случаев присвоение облаку смерчопасной категории осуществлялось заблаговременно, в среднем за час до момента возникновения смерча, а для оставшихся 37 % – непосредственно в этот момент.

Прогноз смерчеопасных участков побережья. Рассчитываемый по методике прогноз смерчеопасных областей относится ко всей исследуемой части акватории Черного моря. Однако с практической точки зрения наибольший интерес представляют прибрежные прогнозы смерчеопасности по определенным участкам побережья. Это объясняется, во-первых, тем, что смерчи – локальные явления, фиксируемые наблюдателями, и верифицировать прогнозы их появления можно лишь в пределах видимой с побережья части акватории, а во-вторых, тем, что смерчи, формирующиеся на достаточно удаленном расстоянии от берега, как правило, не представляют опасности ни для людей, ни для мореходства.

Прогнозы опасности образования смерчей вблизи различных участков побережья в методике даются по результатам анализа предварительно рассчитанных прогнозов смерчеопасных областей за весь период их действия. При этом прогноз по конкретному участку дается в пределах соответствующей ему прибрежной области (рис. 7). В прогнозе указывается на промежуток времени, в течение которого вблизи рассматриваемого участка следует ожидать появления смерчей, а также время выдачи прогноза.

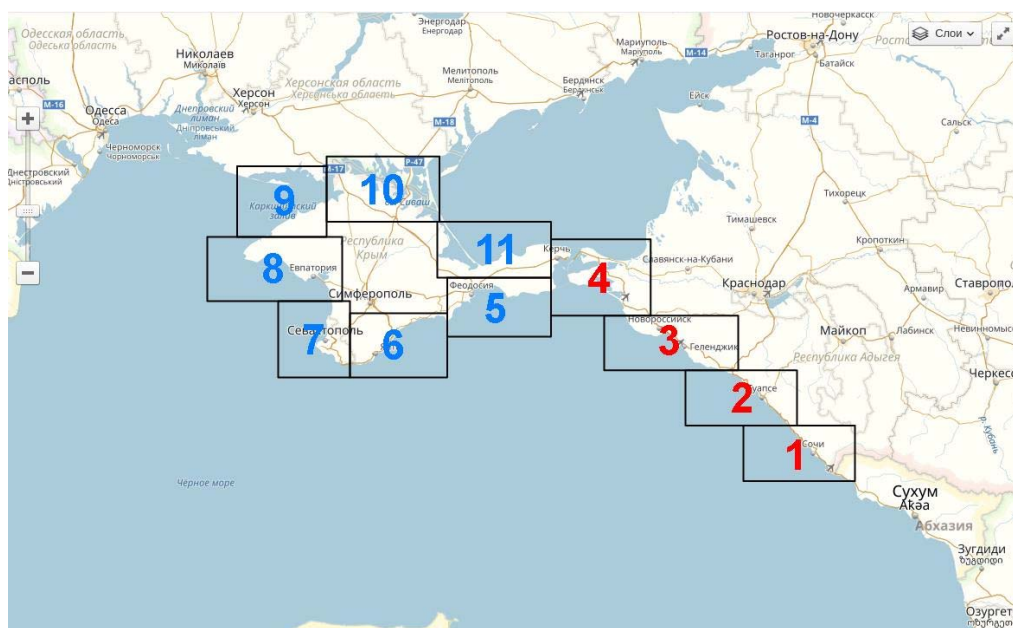


Рис. 7. Участки Черноморского побережья, по которым в методике дается прогноз возможного формирования смерчей (красным обозначены участки Краснодарского края, синим – Республики Крым).

Прогнозы от различных счетов по модели заносятся в журнал смерчеопасности, в рамках используемой схемы работы с выходной продукцией модели COSMO-Ru2 они уточняются каждые 12 ч (рис. 8). Журнал формируется на каждый день месяца. Если прогнозируемый период появления смерчей выходит за рамки рассматриваемых суток,

то он разбивается на части – часть, относящаяся к текущим суткам, и часть – к последующим. В журнале указывается время выдачи прогноза (левый столбец в таблицах на рис. 8). По результатам обобщения записей журнала принимается решение, считать ли день смерчеопасным или нет. При наличии в журнале как минимум трех согласованных по времени прогнозов смерчеопасности, выданных на срок 3 часа и более, по рассматриваемому участку рекомендуется сформировать соответствующее предупреждение о смерчах.

На рис. 8 показаны примеры сформированных по методике журналов смерчеопасности на 16 июля и 28 декабря 2019 г. Как видно из рисунка, на указанные дни по всем участкам побережья Краснодарского края давались согласованные по времени прогнозы возможного образования смерчей, вследствие чего эти дни считались смерчеопасными. Прогнозы оправдались: 16 июля над морем вблизи каждого из четырех рассматриваемых участков побережья отмечались смерчи, 28 декабря смерч возник вблизи г. Сочи.

На 16.07.2019

Участок № 1 (Сочи)

14.07.2019 12 ч	с 02 до 04 ч
15.07.2019 00 ч	с 00 до 16 ч
15.07.2019 12 ч	с 00 до 14 ч, с 21 до 23 ч
16.07.2019 00 ч	с 00 до 16 ч, с 19 до 20 ч
16.07.2019 12 ч	с 13 до 14 ч, с 16 до 23 ч

Участок № 2 (Туапсе)

14.07.2019 12 ч	с 01 до 07 ч
15.07.2019 00 ч	с 00 до 16 ч
15.07.2019 12 ч	с 02 до 19 ч
16.07.2019 00 ч	с 01 до 19 ч
16.07.2019 12 ч	с 12 до 21 ч

Участок № 3 (Геленджик - Новороссийск)

14.07.2019 12 ч	с 00 до 07 ч
15.07.2019 00 ч	с 00 до 14 ч
15.07.2019 12 ч	с 00 до 19 ч
16.07.2019 00 ч	с 00 до 09 ч
16.07.2019 12 ч	с 13 до 20 ч, с 22 ч до конца дня

Участок № 4 (Анапа)

14.07.2019 12 ч	с 05 до 07 ч
15.07.2019 00 ч	с 01 до 17 ч
15.07.2019 12 ч	с 00 до 12 ч
16.07.2019 00 ч	с 00 до 07 ч, с 09 до 13 ч
16.07.2019 12 ч	-

На 28.12.2019

Участок № 1 (Сочи)

26.12.2019 12 ч	с 05 до 06 ч
27.12.2019 00 ч	с 07 до 10 ч
27.12.2019 12 ч	с 01 до 10 ч
28.12.2019 00 ч	с 04 до 08 ч
28.12.2019 12 ч	-

Участок № 2 (Туапсе)

26.12.2019 12 ч	с 01 до 06 ч
27.12.2019 00 ч	с 00 до 08 ч
27.12.2019 12 ч	с 00 до 08 ч
28.12.2019 00 ч	с 01 до 09 ч
28.12.2019 12 ч	-

Участок № 3 (Геленджик - Новороссийск)

26.12.2019 12 ч	с 01 до 07 ч
27.12.2019 00 ч	с 00 до 07 ч
27.12.2019 12 ч	с 00 до 10 ч
28.12.2019 00 ч	с 00 до 12 ч
28.12.2019 12 ч	-

Участок № 4 (Анапа)

26.12.2019 12 ч	с 03 до 07 ч
27.12.2019 00 ч	с 02 до 09 ч
27.12.2019 12 ч	с 03 до 13 ч
28.12.2019 00 ч	с 03 до 04 ч, с 06 до 08 ч, с 10 до 13 ч
28.12.2019 12 ч	с 12 до 16 ч, с 20 ч до конца дня

Рис. 8. Журналы смерчеопасности участков побережья Краснодарского края на 16 июля (слева) и 28 декабря 2019 г. (справа).

Автоматизированная технология расчета по методике

Для проведения расчетов по методике оценки смерчопасности была разработана одноименная автоматизированная технология (рис. 9).

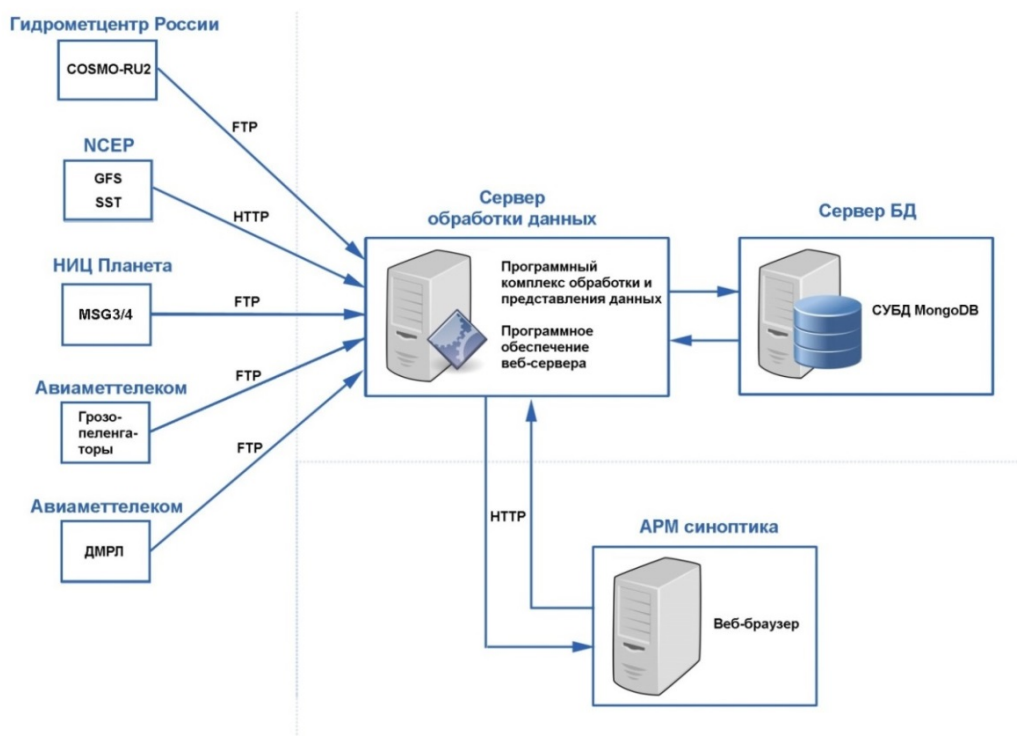


Рис. 9. Схема работы технологии.

Основу работы технологии составляет программный комплекс обработки и представления данных. Он включает в себя четыре подсистемы: подсистему предварительной подготовки данных, подсистему расчета смерчевых предикторов, подсистему оценки смерчопасности и подсистему визуализации (рис. 10).

Подсистема предварительной подготовки данных представлена набором сервисов сбора, обработки и архивации исходных данных, необходимых для работы методики (так называемая технология мониторинга смерчопасных ситуаций) [3], а также блоком численного моделирования атмосферы. Помимо чтения файлов с прогнозами модели COSMO-Ru2 в формате grib, данный блок позволяет проводить расчеты по модели WRF-ARW [19]. Таким образом, технология может работать с выходной продукцией нескольких моделей атмосферы.

Подсистема расчета смерчевых предикторов обеспечивает формирование прогнозов смерчопасных областей по методу номограммы Силады и по региональному индексу смерчопасности WRI. Подсистема оценки смерчопасности отвечает за программную реализацию алгоритмов работы методики.

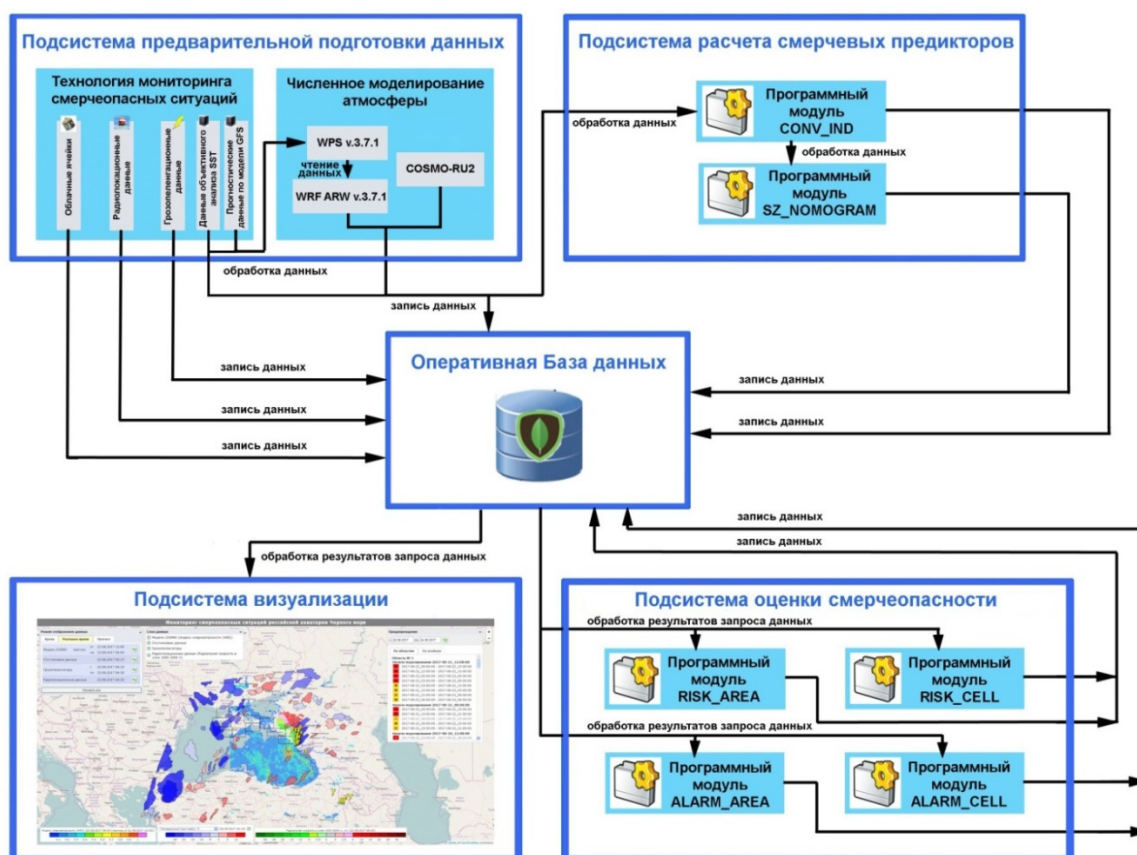


Рис. 10. Структура программного комплекса обработки и представления данных.

Подсистема визуализации предназначена для наглядного представления результатов расчетов по методике на интерактивной картографической основе и с применением графических и табличных форм. Подсистема имеет клиент-серверную архитектуру. Клиентская часть подсистемы реализована в виде веб-приложения, которое может работать на любых стационарных и портативных устройствах с предустановленным средством просмотра веб-страниц (веб-браузером).

С июля 2017 года разработанная технология в непрерывном режиме работы функционирует на вычислительных мощностях НПО «Тайфун».

Результаты испытаний методики

В соответствии с Планом испытаний Росгидромета, с апреля по декабрь 2019 г. методика оценки смерчеопасности проходила независимые испытания при участии специалистов Северо-Кавказского УГМС и СЦГМС ЧАМ. В ходе испытаний указанным организациям был предоставлен доступ к результатам расчетов по методике. Сами расчеты выполнялись в НПО «Тайфун».

Испытания касались используемого в методике расчетного метода прогноза смерчеопасных областей и участков Черноморского побережья. Предложенный в методике алгоритм распознавания смерчеобразующих облаков не участвовал в испытаниях. По результатам испытаний анализировались обобщенные прогнозы, в которых давалась оценка, является ли день смерчеопасным или нет, относящиеся к прибрежной акватории Краснодарского края на каждый день тестируемого периода. В табл. 1 представлены данные по количеству дней со смерчами в пределах данной части акватории за каждый месяц периода испытаний. Принимались во внимание как официальные донесения о смерчах из штормовых предупреждений, так и сообщения очевидцев в сети Интернет.

Таблица 1

Количество дней со смерчами вблизи побережья Краснодарского края с апреля по декабрь 2019 г. (в числителе указаны официальные данные, в знаменателе официальные данные, дополненные сообщениями очевидцев)

Месяц	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
Количество дней со смерчами	-	-	$\frac{2}{2}$	$\frac{8}{12}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{3}$

В табл. 2–6 приведены полученные в ходе испытаний таблицы сопряженности прогнозов за теплый и холодный периоды года отдельно при учете официальных данных и официальных данных и сообщений очевидцев. На основании этих таблиц были рассчитаны различные показатели успешности прогнозов (табл. 6). Формулы расчета показателей даны в [4, 5, 10].

На основании полученных значений показателей успешности прогнозов можно сделать следующие выводы. Достаточно высокие значения оправдываемости отсутствия смерчей указывают на то, что вероятность их образования в условиях отсутствия соответствующего прогноза смерчеопасности крайне мала. Иными словами, смерчеопасные ситуации, при которых возникают смерчи, по методике прогнозируются достаточно хорошо. Однако, как показывает практика, не все смерчеопасные ситуации приводят к образованию смерчей, вследствие чего прогнозируемая смерчеопасность оказывается избыточной. В рассматриваемом случае доля ложных прогнозов варьировалась от 73 до 79 % в теплый период и от 57 до 86 % в холодный период. Подобные значения тем не менее соответствуют уровню мировых показателей: в США, к примеру, доля ложных прогнозов смерчей доходит до 80 % [11].

Таблица 2

Таблица сопряженности прогнозов смерчопасности за май-октябрь 2019 г.
(официальные данные)

Прогноз	Наблюдалось		Сумма
	Явление	Без явления	
Явление	11	41	52
Без явления	4	128	132
Сумма	15	169	184

Таблица 3

Таблица сопряженности прогнозов смерчопасности за май-октябрь 2019 г.
(официальные данные и сообщения очевидцев)

Прогноз	Наблюдалось		Сумма
	Явление	Без явления	
Явление	14	38	52
Без явления	8	124	132
Сумма	22	162	184

Таблица 4

Таблица сопряженности прогнозов смерчопасности за апрель, ноябрь,
декабрь 2019 г. (официальные данные)

Прогноз	Наблюдалось		Сумма
	Явление	Без явления	
Явление	1	6	7
Без явления	1	83	84
Сумма	2	89	91

Таблица 5

Таблица сопряженности прогнозов смерчопасности за апрель, ноябрь,
декабрь 2019 г. (официальные данные и сообщения очевидцев)

Прогноз	Наблюдалось		Сумма
	Явление	Без явления	
Явление	3	4	7
Без явления	1	83	84
Сумма	4	87	91

**Показатели успешности прогнозов смерчопасности
за теплый и холодный периоды года 2019 г.**

Показатель	Май-октябрь 2019 г.		Апрель, ноябрь, декабрь 2019 г.	
	Официальные данные	Официальные данные и сообщения очевидцев	Официальные данные	Официальные данные и сообщения очевидцев
Общая оправдываемость прогноза, %	75.5	75	92.3	94.5
Оправдываемость наличия, %	21.2	26.9	14.3	42.8
Оправдываемость отсутствия, %	97	93.9	98.8	98.8
Предупрежденность явления, %	73.3	63.6	50	75
Предупрежденность отсутствия явления, %	75.7	76.5	93.2	95.4
Доля ложных тревог, %	78.8	73.1	85.7	57.2
Вероятность ложного обнаружения, %	24.3%	23.5%	0.07%	0.05%
Критерий Пирси-Обухова	0.49	0.40	0.43	0.70
Индекс критического успеха (CSI)	0.20	0.23	0.13	0.38
Критерий Багрова-Хайдке (HSS)	0.23	0.25	0.20	0.52
Индекс экстремальной зависимости (EDI)	0.64	0.52	0.59	0.83

Поскольку смерчи – довольно редкие явления, для оценки качества их прогноза лучше всего оперировать такими показателями, как критерий Багрова – Хайдке HSS и индекс EDI.

Критерий Багрова – Хайдке HSS отражает долю оправдавшихся прогнозов после исключения из них тех, которые могли бы быть случайными. Значения критерия варьируются в диапазоне от -1 до 1. Положительные значения указывают на наличие полезного прогностического сигнала. В рассматриваемом случае, очевидно, ввиду большого числа ложных прогнозов значение критерия оказалось ниже рекомендованного уровня в 0,33. Исключением стал вариант расчета критерия в холодный период при учете официальных данных и сообщений очевидцев, тогда же отмечалось и наименьшее значение ложных тревог.

Индекс экстремальной зависимости EDI разработан специально для оценки качества прогноза редких явлений. Его основное свойство – независимость от частоты их появления. Индекс отражает качество прогноза с точки зрения разграничения условий благоприятных

для образования явлений и условий, при которых они не возникают [10]. Значения индекса варьируются в диапазоне от 0 до 1. В рассматриваемом случае как в холодный (прогноз по номограмме Силады), так и в теплый период (прогноз по индексу WRI) индекс имел довольно высокие значения. Как было упомянуто выше, это связано с тем, что по методике достаточно точно прогнозируются как смерчеопасные, так и несмерчеопасные ситуации, а вероятность возникновения смерчей при прогнозе несмерчеопасной ситуации крайне мала.

Решение о целесообразности внедрения методики

На заседании Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета, проходившем 18 сентября 2020 г., в рамках рассмотрения результатов испытаний разработанной методики в части расчетного метода прогноза смерчей было заслушано решение Технического совета Северо-Кавказского УГМС, включающее в себя следующие положения.

Рассматриваемая методика на сегодняшний момент является единственной известной методикой прогноза смерчей в прибрежной акватории Черного моря. В большинстве случаев периоды действия выданных в 2019 г. штормовых предупреждений о смерчах и прогнозов смерчеопасности по тестируемой методике были согласованы. В теплый период (май – октябрь) количество ложных смерчеопасных дней по тестируемой методике на текущем этапе ее работы превышает аналогичное количество в штормовых предупреждениях по синоптическому методу о смерчах, в то же время прогнозируется большинство действительно отмечавшихся формирований смерчей над морем. Анализ динамики избыточно прогнозируемой по тестируемой методике в теплый период смерчеопасности позволяет выделить возможные границы активного смерчеобразования, в холодный период (ноябрь – апрель), когда смерчи, как правило, не отмечаются, количество ложных прогнозов по методике стремится к нулю. В большинстве случаев, когда на побережье наблюдались опасные и неблагоприятные явления конвективного характера (27 случаев), по методике отмечались смерчеопасные дни (21 случай). Таким образом, данная методика может служить ориентиром для синоптиков при принятии решений о выдаче соответствующих штормовых предупреждений.

На основании вышеприведенных результатов испытаний методики оценки смерчеопасности и заслушанного решения Технического совета Северо-Кавказского УГМС ЦМКП Росгидромета приняла следующие решения:

– одобрить работу ФГБУ «НПО «Тайфун» по разработке автоматизированной технологии оценки и прогноза смерчеопасности на российской акватории Черного моря, а также работу ФГБУ «СЦГМС ЧАМ» и ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС» по проведению

испытаний, анализу и обобщению их результатов, формулировке рекомендаций по совершенствованию испытываемой технологии;

– внедрить автоматизированную технологию оценки и прогноза смерчеопасности на российской акватории Черного моря в ФГБУ «СЦГМС ЧАМ» и ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС» в качестве консультативного метода прогноза смерчей к основному синоптическому методу;

– ФГБУ «НПО «Тайфун» продолжить работу по совершенствованию технологии, главным образом – в части уменьшения количества ложных тревог.

Список литературы

1. *Калмыкова О.В., Шершаков В.М.* Индекс смерчеопасности российской акватории Черного моря // Труды ГГО им. А.И. Воейкова. – 2017. – Вып. 284. – С. 142–163.

2. *Калмыкова О.В.* Оценка смерчеопасности вблизи Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Обнинск: Научно-производственное объединение «Тайфун», 2019. 30 с.

3. *Калмыкова О.В., Шершаков В.М.* Технология мониторинга смерчеопасных ситуаций на российской акватории Черного моря // Метеорология и гидрология. – 2016. – № 10. – С. 93–102.

4. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов.

5. РД 52.27.724-2009. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения.

6. *Ривин Г.С., Розинкина И.А., Багров А.Н., Блинов Д.В., Курсанов А.А., Кузьмина Е.В., Шатунова М.В., Чумаков М.М., Алферов Д.Ю., Бундель А.Ю., Зайченко М.Ю., Никитин М.А.* Мезомасштабная модель COSMO-Ru2 и результаты ее оперативных испытаний // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2017. – Информационный сборник № 44. – С. 25–55.

7. *Шнюков Е.Ф., Митин Л.И., Цемко В.П.* Катастрофы в Черном море. – Киев: Манускрипт, 1994. – 296 с.

8. Algorithm Theoretical Basis Document for Rapid Development Thunderstorms. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.nwcsaf.org/AemetWebContents/ScientificDocumentation/ Documentation/MSG/SAF-NWC-CDOP2-MFT-SCI-ATBD-11_v3.0.pdf](http://www.nwcsaf.org/AemetWebContents/ScientificDocumentation/Documentation/MSG/SAF-NWC-CDOP2-MFT-SCI-ATBD-11_v3.0.pdf) (дата обращения 18.12.2020).

9. *Dotzek N., Emeis S., Lefebvre C., Gerpott J.* Waterspouts over the North and Baltic Seas: Observations and climatology, prediction and reporting // *Meteorologische Zeitschrift*. – 2010. – Vol. 19, no. 1. – P. 115–129.

10. Forecast Verification for the African Severe Weather Forecasting Demonstration Projects [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.wmo.int/pages/prog/www/Documents/1132_en.pdf (дата обращения 18.12.2020).

11. How the National Weather Service Is Working to Reduce Tornado Warning False Alarms [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://weather.com/storms/tornado/news/2018-05-30-tornado-warning-false-alarms-research-nws> (дата обращения 18.12.2020).

12. *Keul A.G., Sioutas M.V., Szilagyi W.* Prognosis of Central-Eastern Mediterranean Waterspouts // *Atmospheric Research*. – 2009. – Vol. 93. – P. 426–436.

13. *Markowski, P.M., Richardson Y.P.* Mesoscale Meteorology in Midlatitudes. – New Jersey: Willey, 2010. – P. 407.

14. Real-time, global, sea surface temperature (RTG_SST) analysis [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nomads.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod/> (дата обращения 18.12.2020).

15. *Renko T., Kozari T., Tudor M.* An assessment of waterspout occurrence in the Eastern Adriatic basin in 2010: Synoptic and mesoscale environment and forecasting method // *Atmospheric Research*. – 2013. – Vol. 123. – P. 71–81.

16. Satellite Application Facility on support to Nowcasting and Very Short-Range Forecasting [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nwcsaf.org> (дата обращения 18.12.2020).

17. *Sioutas M., Szilagyi W., Keul A.* Waterspout outbreaks over areas of Europe and North America: Environment and predictability // *Atmospheric Research*. – 2013. – Vol. 123. – P. 167–179.

18. *Szilagyi W.* A waterspout forecasting technique [Электронный ресурс] / 5th European Conference on Severe Storms: preprints. – Landshut (Germany), 2009. – Режим доступа: <https://www.essl.org/ECSS/2009/preprints/O05-14-sziladgyi.pdf> (дата обращения: 18.12.2020).

19. WRF-ARW Version 3 Modeling System User's Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/ARWUsersGuideV3.pdf (дата обращения 18.12.2020).

*Е.А. Адаренко¹, Г.А. Шепоренко²,
М.Я. Здерева³, В.М. Токарев³, Н.А. Хлучина³, Л.П. Воробьева³*

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЕРАТИВНОГО ИСПЫТАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОГНОЗА ГРОЗ В УРАЛО-СИБИРСКОМ РЕГИОНЕ С ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ ДО 60 ЧАСОВ

¹Обь-Иртышское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, г. Омск;

²Уральское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, г. Екатеринбург;

³Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, г. Новосибирск

В рамках выполнения темы 1.1.1.2. плана НИР Росгидромета на 2014–2016 годы в ФГБУ «СибНИГМИ» разработан метод и автоматизированная технология прогноза гроз (авторы – М.Я. Здерева, В.М. Токарев). Метод основан на физико-статистической интерпретации модельной продукции мезомасштабной модели COSMO-Ru_Sib13 с шагом 13,2 км и глобальной модели GFS (NCEP) с шагом 0,5° сетки. Выходные параметры моделей, отвечающие за температурно-влажностную конвекцию и отражающие неустойчивость/устойчивость атмосферных слоев, служат признаками, на базе которых построены бинарные логические деревья распознавания гроз [1, 2]. Решения построены для каждой метеостанции Урало-Сибирского региона на каждый срок заблаговременности до трех суток с шагом по времени 6 и 12 часов. Для локальных явлений конвективного характера указать с приемлемой достоверностью точку возникновения с заблаговременностью больше, чем несколько часов, невозможно, так как они «проваливаются» даже в наблюдениях. Поэтому помимо «деревьев» распознавания по станциям (радиус наблюдения примерно 10 км), получено несколько вариантов по кластерам с радиусами 50, 100, 150 км.

В 2017 г. технология прошла оперативные испытания в ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС». Решением Технического совета, подтвержденным Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 01.12.2017 г., технология получила статус для использования в качестве основного расчетного метода на сроки до двух суток.

С дополнением обучающих выборок данными 2017–2018 гг. были обновлены бинарные «деревья» для прогноза гроз и переданы на оперативные испытания в ФГБУ «Уральское УГМС» и «Обь-Иртышское УГМС». Ежедневно в оперативном режиме расчеты производились в Западно-Сибирском региональном вычислительном центре по разработанной технологии. Результаты в виде таблиц выкладывались на сервере ftp://nsk.meteorf.ru/incoming/THUNDER/ и на сайте ФГБУ «СибНИГМИ» http://sibnigmi.ru/cgi-bin/inst/ в разделе «Продукция» (рис. 1).

В технологию встроен расчет автоматизированной оценки прогнозов, для которой используются данные фактических наблюдений по грозам по станциям региона, поступающие по каналам связи в коде КН-01.

СИБИРСКИЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

СИБНИГМИ
РОСГИДРОМЕТ
ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

630099, г. Новосибирск
ул. Советская, 30
Тел: (383) 222-25-30, 222-41-39
Факс: (383) 222-25-30
E-mail: adm@sibnigmi.ru

Главная | Институт | Новости | Исследования | Публикации | **Продукция** | Метод. кабинет | Фото/видео | Ссылки | Контакты

Модель COSMO-13
Модель COSMO-6
COSMO-2 (неоперативный прогноз)
Модель SLAV(ПЛАВ)
Система визуализации гидрометеорологических данных (тема НИР ЦНТП 1.1.1.4 2011-2013)
Интерактивные метеограммы2012(COSMO)
Интерактивные метеограммы2012(ПЛАВ)

Прогнозы получены по сертифицированному Росгидрометом автоматизированному расчетному методикам, разработанным в СибНИГМИ. При выпуске официальной продукции гидрометслужбы автоматизированные прогнозы уточняются и дополняются специалистами территориальных управлений Росгидромета

Продукция подготовлена совместно с Западно-Сибирским региональным вычислительным центром (ЗСРВЦ)

Табличные прогнозы по территориальным управлениям:

Дата составления прогноза: 10.08.2021 | Уральское | 00 | Грозы | Показать

10.08.2020 4:20
Прогноз гроз по методу СибНИГМИ (расчет ЗСРВЦ) модель GFS от xxh UTC на 10.08-12.08 2020

СВЕРДЛОВСКАЯ обл
Прогноз по станциям и в радиусе 100км на 10.08 - 12.08

№ индекс	ТАБОРЫ.....	10.08 : 11.08 : 12.08 :					
		00-12:	12-24	24-36	36-48	48-60	:
		день :	ночь	день :	ночь	день :	ночь
7 28158	ТАБОРЫ.....	+/-	+/-	-/-	-/+	-/-	-/-
9 28255	ТУРИНСК.....	-/+	-/-	-/+	-/-	-/-	-/-
10 28264	ТАБИ.....	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+
12 28346	АРТЕМОВСКИЙ.....	+/+	-/+	+/+	-/+	-/+	-/+
13 28359	ТУГУЛЬМ.....	0/+	-/-	-/+	-/-	-/-	-/-
16 28449	КАМЕНСК-УРАЛЬСКИ	+/+	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-

Примечание: прогноз на станции/в радиусе 100 км
+/- - отсутствие гроз *+/- - наличие гроз "0" - нет расчета

КУРГАНСКАЯ обл
Прогноз по станциям и в радиусе 100км на 10.08 - 12.08

№ индекс	ШАДРИНСК.....	10.08 : 11.08 : 12.08 :					
		00-12:	12-24	24-36	36-48	48-60	:
		день :	ночь	день :	ночь	день :	ночь
1 28552	ШАДРИНСК.....	-/+	+/-	-/+	-/+	-/+	-/+
2 28655	ШИРКА.....	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-

Рис. 1. Пример таблицы прогнозов гроз на сайте ФГБУ «СибНИГМИ».

1. Результаты испытаний технологии по территории ответственности ФГБУ «Уральское УГМС»

В ФГБУ «Уральское УГМС» испытания проводились в отделе метеопрогнозов Гидрометцентра в период май – сентябрь 2019 г. в соответствии с утвержденной программой. Автоматизированные прогнозы составлялись по 33 пунктам территории Свердловской, Курганской, Челябинской областей и Пермского края.

Оценке подлежали расчеты по утреннему сроку 00 ч ВСВ. Согласно программе испытаний, оценка прогноза гроз по территории (областям, краю) проводилась в радиусе 100 км ($R=100$), а также по конкретному пункту ($R=0$) с заблаговременностью 12–60 часов.

Испытания проводились согласно Методическим указаниям [3] и Наставлению [4].

Автоматизированная оценка проведена для более 10 тысяч прогнозов по пункту и для такого же числа прогнозов в кластере 100 км. Количество случаев грозы в четырех областях Урала составило 192 ночью и 238 в дневное время.

На рис. 2 представлены основные оценки испытываемого прогностического метода по областям, которые рассчитываются по таблице сопряженности:

– предупрежденность явления: $P_y = \frac{k_{11}}{k_{01}} \cdot 100\%$;

– оправдываемость явления: $O_y = \frac{k_{11}}{k_{10}} \cdot 100\%$;

– общая оправдываемость прогнозов: $O_p = \frac{k_{11} + k_{22}}{k_{00}} \cdot 100\%$;

– критерий Пирси-Обухова: $Tr = \frac{k_{11}}{k_{01}} - \frac{k_{12}}{k_{02}}$.

По таблице сопряженности рассчитываются оценки испытываемого прогностического метода, представленные ниже в табл. 1:

– оправдываемость случаев без явления: $O_n = \frac{k_{22}}{k_{20}} \cdot 100\%$;

– предупрежденность случаев без явления: $P_n = \frac{k_{22}}{k_{02}} \cdot 100\%$;

Отметим, что средняя оценка считается из суммарной матрицы сопряженности по всем станциям в области за весь период, то есть с учетом попадания прогноза на каждую точку. Оценка прогнозов по территории по Наставлению [4], акцентированная на наличие/отсутствие явления независимо от точки его обнаружения, не производилась.

Видно, что общая оправдываемость прогнозов по площади с радиусом 100 км примерно одинакова – в районе 80%, по пунктам она выше в среднем на 2–4% (в основном за счет меньшего числа «ложных тревог»), а предупрежденность и оправдываемость прогнозов наличия явления тем выше, чем больше радиус кластера. Неустойчивость в оценках для Курганской области объясняется малым числом метеостанций (всего 4) и, соответственно, малым числом отмеченных гроз на ее территории.

На остальной части территории виден суточный ход в оценках, с уменьшением качества прогнозов в дневное время. Оправдываемость прогноза отсутствия гроз высока, 91–99 %, тогда как оправдываемость прогноза наличия гроз значительно ниже (17–54 %), т. е. методические прогнозы склонны преувеличивать вероятность возникновения грозы, что характерно для расчетных методов. Критерии успешности прогнозов Пирси-Обухова в большинстве случаев удовлетворяют требованиям Методических указаний [3] и находятся в пределах 0,26–0,66.

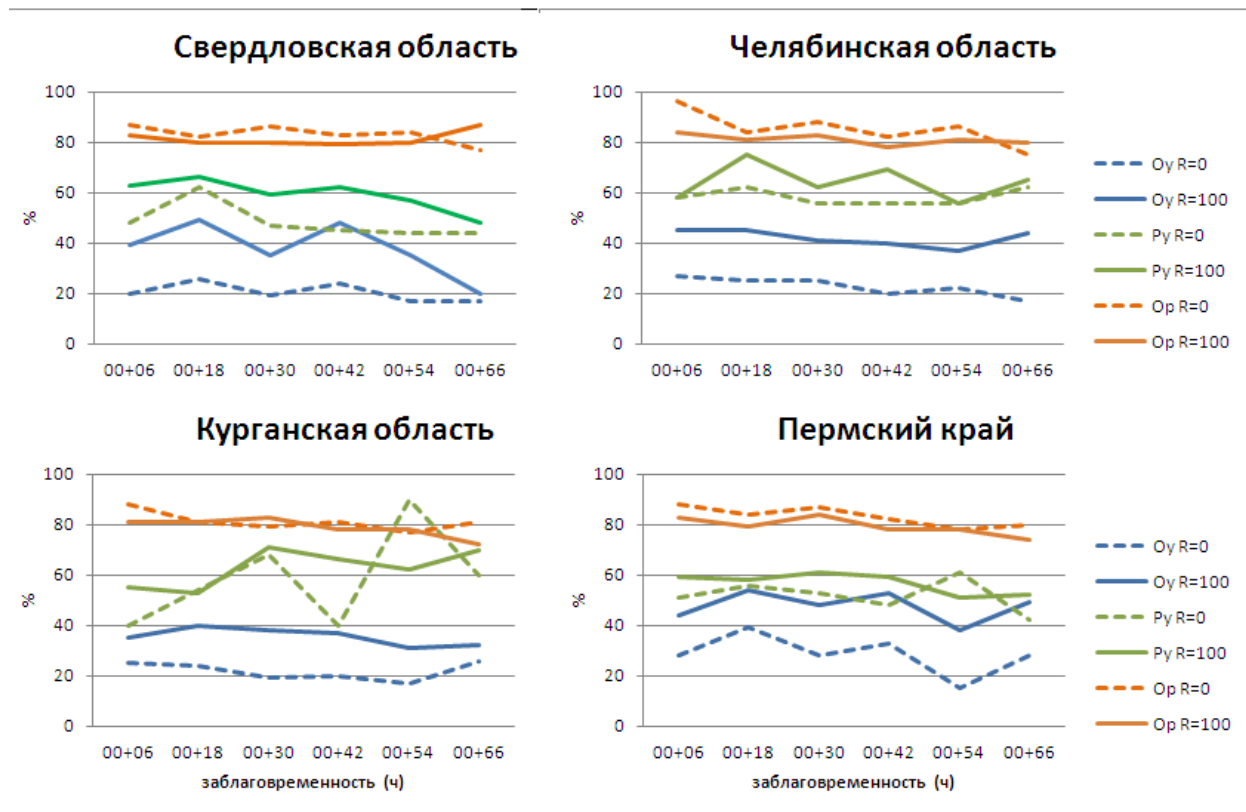


Рис. 2. Оценки прогнозов гроз по областям Уральского региона за период май–сентябрь 2019 г. для пункта ($R=0$) и в радиусе 100 км ($R=100$).

По пунктам ($R=0$) число отмеченных гроз было незначительным: на период ближайшая ночь – завтрашний день больше всего случаев было в Перми (ночь–день, 14–16 случаев соответственно), в Кургане 9–14, в Екатеринбурге, Челябинске по 8–9 случаев. Недостаточность случаев грозы опять же отражалась на неустойчивости в оценках. Так, прогноз по Кургану ($R=0$) показал предупреденность гроз на период +42 ч – 8 %, тогда как смежные заблаговременности прогноза оправдались лучше: +30ч – 81 %, +54ч – 67 %. В целом предупреденность возникновения гроз составила 47–71 % при высокой оправдываемости прогнозов их отсутствия – 88–100 %.

Для сравнения проведена оценка синоптических прогнозов на период 24–36 часов по пунктам (столицам областей) при $R=0$ (рис. 3). Методический прогноз в испытываемом периоде имел преимущество главным образом по предупредительности гроз (от 4 до 40 %), что сказалось и на более высоких оценках критерия Пирси-Обухова. Исключение составили прогнозы на день для Екатеринбурга, где метод предсказал лишь две грозы, а синоптики – пять из девяти наблюдаемых. Общая оправдываемость синоптических и методических прогнозов близка: 87–91 % на ночь, 79–85 % на день.

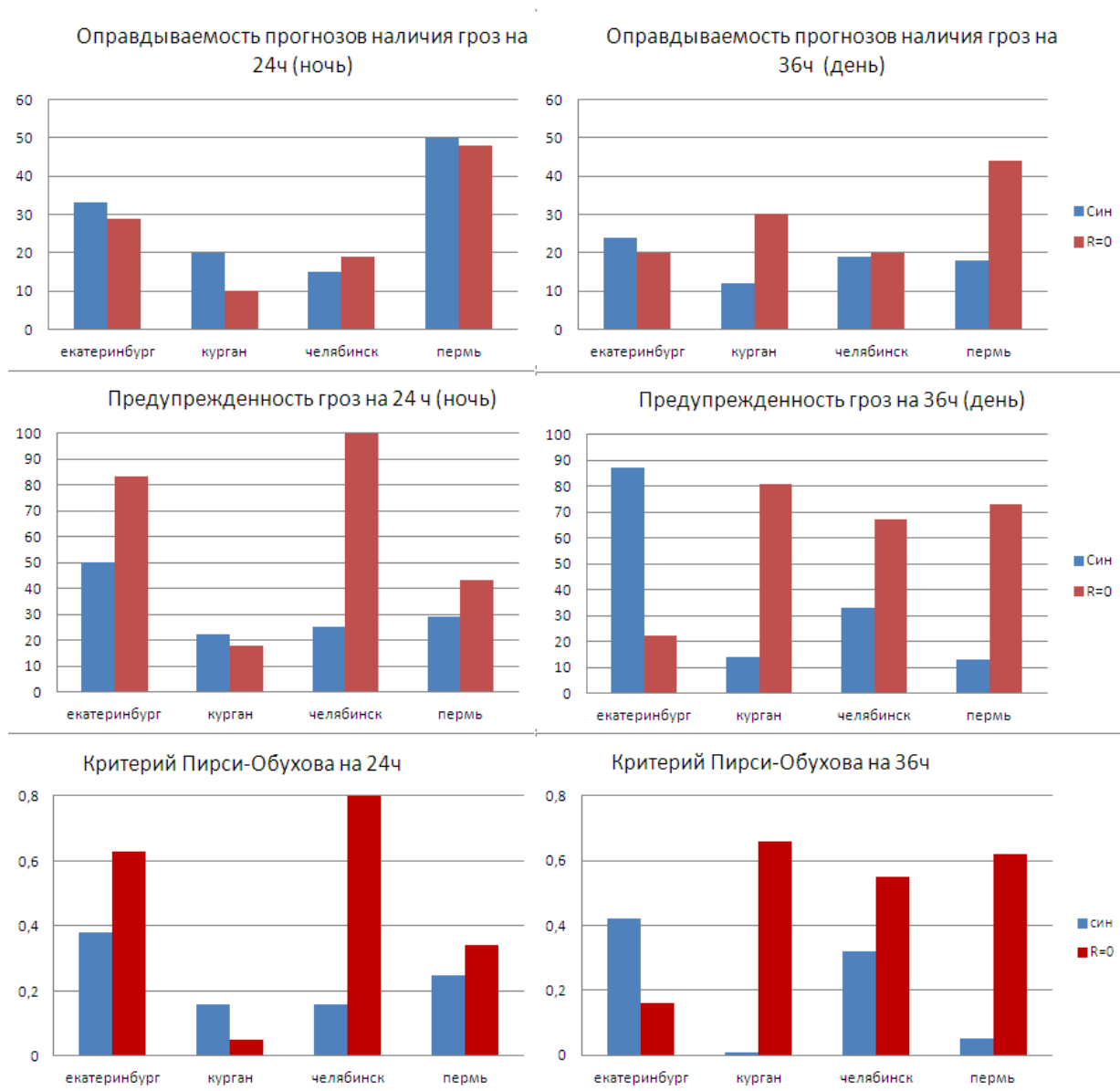


Рис. 3. Сравнение оценок оперативных (Син - синоптик) и автоматизированных методических прогнозов гроз по пунктам ($R=0$) ФГБУ «Уральское УГМС», май–сентябрь 2019 г.

Были рассмотрены барические поля АТ-500, давления на уровне моря и ОТ500–1000, а также в некоторых случаях термическое поле на АТ-850 гПа в периоды

развития грозовой деятельности. Анализ синоптических процессов в дни с грозами и результатов расчетов гроз показывает, что испытываемый метод достоверно отражает процессы в атмосфере, ведущие к развитию грозовой деятельности.

2 Результаты испытаний технологии по территории ответственности ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС»

Автоматизированные прогнозы гроз оценивались ежедневно в оперативном режиме, результаты представлены по каждой станции Омской области (20 станций), югу Тюменской области (12 станций), Ханты-Мансийскому АО (27 станций).

На рис. 4 приведены основные показатели успешности прогнозов по территории Омской области, югу Тюменской области и Ханты-Мансийскому АО. При этом так же, как по территории Урала, в расчетах средних оценок по территории учитывается факт попадания/не попадания на каждую метеостанцию в рассматриваемой области, то есть это более строгие оценки, чем принятые в оперативной практике.

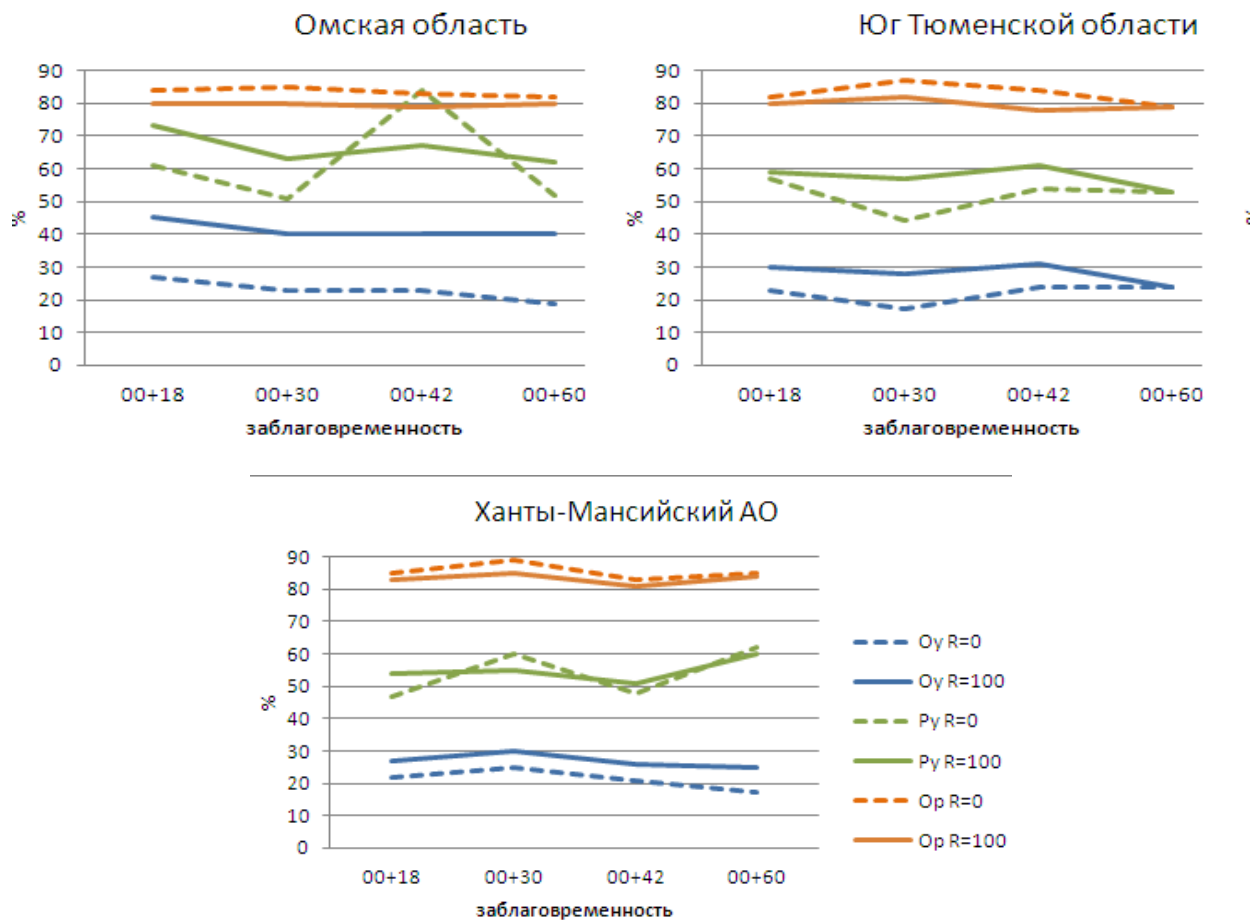


Рис. 4. Оценки прогнозов гроз по областям ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС», май – сентябрь 2019 г.

Средняя общая оправдываемость по всей территории была получена в районе 80-90%, оправдываемость отсутствия явления – 92–98 %. В целом оценки по югу Тюменской области и по территории Ханты-Мансийского округа близки, а по Омской области оправдываемость явления выше на 8–12 %, предупреденность – на 8–20 %.

Автоматизированная оценка качества методических прогнозов гроз на 1–2 суток для административных центров (Омск, Тюмень, Ханты-Мансийск) для кластеров 100 км (R=100) за период май – сентябрь 2019 г. приведена в табл. 1.

Таблица 1

**Средние показатели методического прогноза гроз по центральным городам
ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС». Вариант R=100 км, май–сентябрь 2019 г.**

Заблаговременность, ч	Таблица сопряженности					Оценки прогнозов гроз					
	k_{11}	k_{12}	k_{21}	k_{22}	k_{00}	Oy	On	Py	Pn	Op	Tr
Омск											
12–24	24	21	8	93	146	53	92	75	82	80	0,57
24–36	17	16	8	101	142	52	93	68	86	83	0,54
36–48	21	17	11	93	142	55	89	66	85	80	0,5
48–60	14	23	10	89	136	38	90	58	79	76	0,38
Тюмень											
12–24	14	24	7	93	138	37	93	67	79	78	0,67
24–36	10	22	7	101	140	31	94	59	82	79	0,59
36–48	12	29	8	81	130	29	91	60	74	72	0,6
48–60	12	23	4	96	135	34	96	75	81	80	0,75
Ханты-Мансийск											
12–24	6	13	4	111	134	32	97	60	90	87	0,5
24–36	5	15	4	110	134	25	96	56	88	86	0,43
36–48	6	15	4	96	121	29	96	60	86	84	0,46
48–60	6	38	3	82	129	14	96	67	68	68	0,35

Общая оправдываемость прогнозов гроз по полусуткам по всем центрам изменяется в пределах 68–87 %, наиболее низкая по Тюмени –72–80 %. Оправдываемость прогнозов с наличием явления наиболее высокая для Омска – 52–55 % на первые сутки и 38 % на второй день; по Тюмени она уже в районе 30 % на все сроки, самая низкая по Ханты-Мансийску на дневные сроки – 14–25 %. Оправдываемость отсутствия явления – 89–96 %. Предупреденность явления изменяется от 56 до 75 %, случаев без явлений – от 76 до 85 %.

Проведен сравнительный анализ методических прогнозов гроз с оперативными прогнозами, составленными синоптиками по трем административным центрам (Омск,

Тюмень, Ханты-Мансийск) в радиусе 0 км (гроза на станции). Автоматизированная оценка качества методических прогнозов для пунктов (в радиусе 0 км) была выполнена для 1654 случаев. Суммарное число случаев с грозой составило 114, из них в ночные часы – 71, в дневные часы – 43. По станциям: Омск – ночью 26, днем 20; Тюмень – ночью 29, днем 13; Ханты-Мансийск – ночью 16, днем 10 случаев.

За период испытания гроза прогнозировалась и наблюдалась по Омску в 21 случае, Тюмени – в 22, Ханты-Мансийску – в 14 случаев, что по Омску и Тюмени на 11 случаев меньше, чем у синоптиков ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС», по Ханты-Мансийску – на 4 случая меньше.

Число «ложных тревог» по методическому автоматизированному методу превышает на 15–16 % их количество в оперативных прогнозах. Следует отметить, что «пропуск цели» по Омску примерно одинаковый, а по остальным пунктам предупреденность явления у автоматизированного метода выше: так, по Ханты-Мансийску выше на 48 %.

Общая оправдываемость прогнозов грозы для полусуток по испытываемому методу составила 79–86 %, что на 4–8 % ниже уровня оправдываемости оперативных прогнозов (83–91 %) (рис. 5).

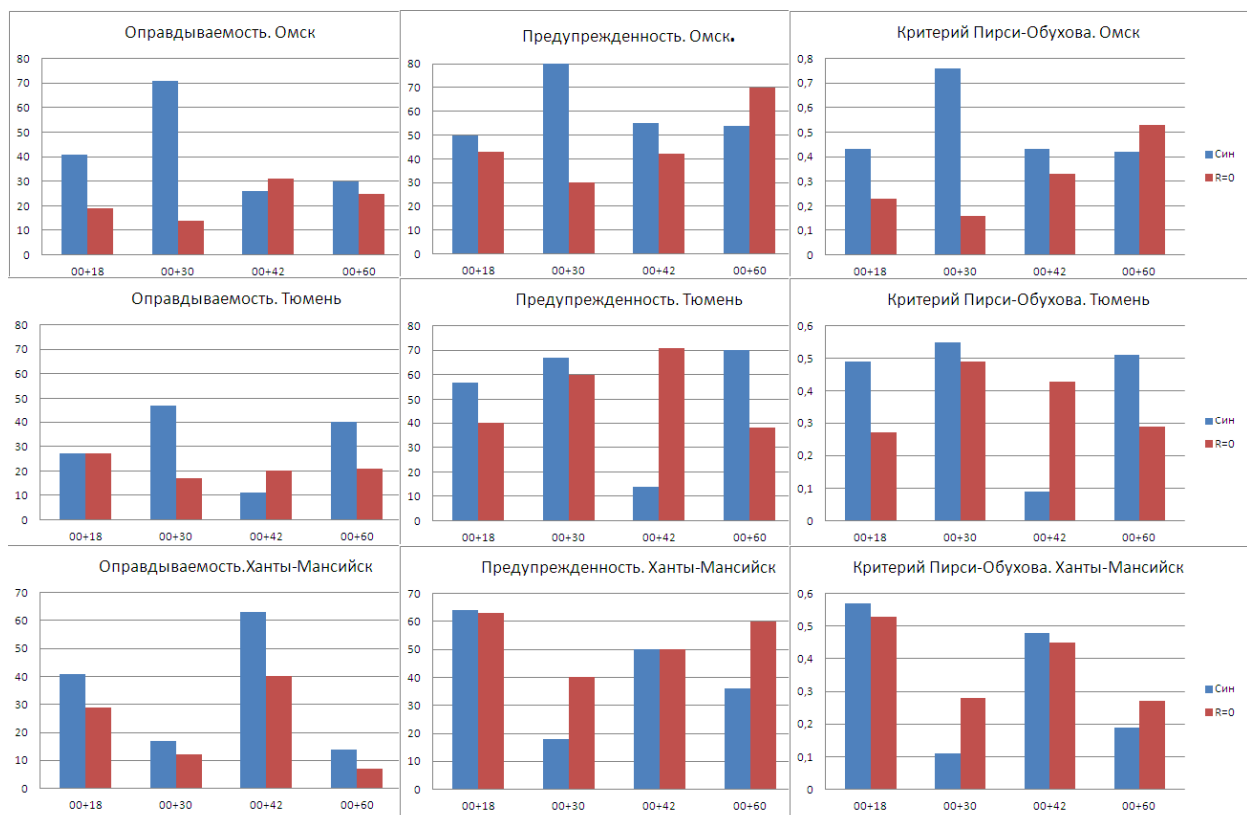


Рис. 5. Сравнение оценок оперативных (Син) и методических автоматизированных прогнозов гроз по пунктам (R=0) ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС», май–сентябрь 2019 г.

Оправдываемость прогнозов наличия грозы по методу в целом уступала оперативным прогнозам на 3–31 %, причем наиболее значительный разрыв отмечен при прогнозе на день первых суток (00+30) по Омску – на 57 %. Предупрежденность грозы по испытываемому методу на первые сутки составила 43–49 %, что на 8–12 % ниже уровня предупрежденности синоптических прогнозов, на вторые сутки составила 54–56 %, что на 3–14 % выше уровня синоптических прогнозов. Следует отметить, что наилучшая предупрежденность грозы испытываемого метода по Омску – 70 % на день вторых суток, по Тюмени – 71 % на ночь вторых суток и по Ханты-Мансийску 40–60 % на день первых и вторых суток.

Выводы

Испытываемая автоматизированная технология прогноза гроз по пунктам и кластерам, созданная на основе физико-статистической интерпретации современных гидродинамических моделей COSMO и GFS (NCEP), предоставляет синоптикам Урало-Сибирского региона объективную основу прогнозирования неблагоприятного конвективного явления погоды с возможностью пространственно-временной детализации с некоторой вероятностью до двух суток.

Большинство показателей успешности метода удовлетворительные, а в части прогноза отсутствия явления – хорошие. По территории Урала сравнительные оценки показывают, что качество автоматизированного метода в основном не уступает оперативным прогнозам, а в отдельных областях превосходит их. Для Тюмени оценки сравнимы, для Ханты-Мансийска предупрежденность гроз по испытываемой технологии выше на ночные сроки, для Омска лучше прогнозы синоптиков, но на день вторых суток предупрежденность у автоматизированного метода была выше.

По решению Технического совета ФГБУ «Уральское УГМС» от 28.11.2019 г. разработанный автоматизированный метод прогноза гроз рекомендовано внедрить в оперативную практику ФГБУ «Уральское УГМС» в качестве основного расчетного.

По решению Технического совета ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС» от 26.11.2019 г. разработанный автоматизированный метод прогноза гроз рекомендовано внедрить в оперативную практику ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС» в качестве вспомогательного метода.

ЦМКП Росгидромета рекомендовала:

– внедрить метод и технологию прогноза гроз на 1–2 суток в ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС» по территории Омской области, юга Тюменской области и Ханты-Мансийскому АО в качестве вспомогательного начиная с теплого периода 2021 г.;

– внедрить метод и технологию прогноза гроз на 1–2 суток в ФГБУ «Уральское УГМС» по территории Свердловской, Челябинской, Курганской областей, Пермского края в качестве основного расчетного начиная с теплого периода 2021 г.;

– продолжить совершенствование метода краткосрочного прогноза гроз с использованием современных технологий дистанционного зондирования (ДМРЛ, грозопеленгация, спутниковая информация) как для внедрения новых информативных предикторов в прогностических схемах, так и для уточнения пространственной и временной диагностики грозовой деятельности и наземной верификации результатов прогнозов.

Технологии дистанционного зондирования, безусловно, необходимы в прогностической системе наукастинга. В представленном на испытание подходе диагностику явления по данным ДМРЛ, грозопеленгаторов или спутникового зондирования можно использовать как дополнительную возможность для определения факта наличия/отсутствия явления при разработке или верификации прогностического метода. Однако привлекать данные ДМРЛ за Уралом невозможно в силу отсутствия таковых (их всего два, работают нестабильно). Распознавание гроз по спутниковому зондированию имеет определенную вероятность. Данные грозопеленгаторов в оперативные службы Сибири не поступают. Новые технологии, безусловно, надо использовать при их наличии.

Список литературы

1. *Здерева М.Я., Токарев В.М., Хлучина Н.А., Воробьева Л.П., Бабошина Н.А.* Оперативная технология прогноза гроз в Сибири и результаты ее испытаний // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2018. – №2 (368). – С. 27-43.
2. *Лбов Г.С., Манохин А.Н.* Распознавание образов при разнотипных признаках в условиях малой выборки // Статистические проблемы управления. – 1976. – Вып. 14. – С. 57-63.
3. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. – 149 с.
4. РД 52.27.724-2009. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. – 50 с.

Е.В. Волкова¹, А.В. Кухарский¹, Г.В. Санникова², И.Н. Павлов³

**ВАЛИДАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ
ДИАГНОЗА ПАРАМЕТРОВ ОБЛАЧНОГО ПОКРОВА,
ОСАДКОВ И ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПОГОДЫ
ПО ДАННЫМ РАДИОМЕТРА SEVIRI С ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ
МЕТЕОСПУТНИКОВ СЕРИИ МЕТЕОСАТ MSG**

¹ Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета», Москва;

² ОМП ФГБУ «Центрально-Черноземное УГМС», г. Курск;

³ Филиал ФГБУ «Северное УГМС» «Вологодский ЦГМС», г. Вологда

Введение

В ФГБУ «НИЦ «Планета» разработана и внедрена в оперативную практику автоматизированная технология диагноза параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды (ОЯП) для Европейской территории России (ЕТР) и Европы по данным радиометра SEVIRI с геостационарных метеоспутников серии Meteosat MSG (точка стояния экватор 0° в. д.) [1, 2]. Работа по созданию и валидации технологии выполнялась в рамках Плана научно-исследовательских и технологических работ Росгидромета «Развитие методов и технологий космического мониторинга и системы сбора данных с наблюдательной сети Росгидромета на базе Государственной территориально-распределенной системы приема, обработки, архивации и распространения информации с использованием существующих и перспективных космических аппаратов наблюдения Земли на полярных, геостационарных и высокоэллиптических орбитах» по заказу УГМАВ Росгидромета.

В основе технологии лежат оригинальные авторские методы автоматизированного порогового попиксельного дешифрирования и классификации спутниковой информации по косвенным признакам. Подробнее см. в [2].

На основе технологии создан и в 2017 г. внедрен в оперативную практику автоматизированный специализированный программный комплекс (АСПК) «SEVIRI-0-Europe» (ОИС № 2020662381). В процессе работы АСПК в автоматическом режиме обеспечивает:

- сбор необходимых для его работы данных (из соответствующих баз данных);
- предварительную подготовку спутниковой и прогностической информации;
- дешифрирование и классификацию параметров облачного покрова, осадков и ОЯП;
- расчет суточных, месячных и годовых сумм осадков;
- запись выходных продуктов в файлы и их передачу пользователям.

Результатом работы АСПК в режиме реального времени являются файлы-матрицы метеопараметров в точных значениях или кодах классов, а также растровые графические файлы (черно-белые или цветные обзорные (диагностические) карты) с исходным разрешением спутниковой информации для региона «Европа и ЕТР» ($\sim 15^\circ$ з. д. – $\sim 50^\circ$ в. д. и $\sim 45\text{--}69^\circ$ с. ш.) и с высоким пространственным разрешением на регулярной сетке (с шагом $1,25' = 0,02^\circ$ по широте и $1,5' = 0,025^\circ$ по долготе) для региона «ЕТР и сопредельные страны» ($42,0\text{--}63,0^\circ$ с. ш., $20,0\text{--}51,25^\circ$ в. д.).

Время компьютерной обработки одного срока спутникового наблюдения, включая все стадии работы АСПК, не превышает 0,5 мин (в зависимости от параметров ПЭВМ). В результате на карте отображена синоптическая ситуация, фактически существовавшая 6–8 мин назад. Высокая периодичность обновления карт (каждые 15 мин), а также возможность обзора большого количества метеопараметров для достаточно протяженной территории, в т. ч. с помощью слайд-шоу, позволяет дежурному синоптику анализировать динамику развития синоптической ситуации и атмосферных процессов за последние несколько часов и выдавать оперативный краткосрочный локальный и/или региональный прогноз их дальнейшего развития.

1. Авторское испытание технологии

Авторские испытания технологии проводились на материале архива синхронных спутниковых и наземных на метеостанциях (МС) наблюдений (балл общей облачности, погода в срок наблюдения, в последний час и между сроками, суточное количество осадков) и грозопеленгационной системы (ГПС) Московского региона (за 2017–2019 гг.). Также использовались климатические оценки метеопараметров для рассматриваемой территории. Результаты валидации показали [1, 2], что выходные продукты АСПК хорошо согласуются с данными наземных метеонаблюдений и климатическими значениями с учетом ежегодных аномалий (по данным Всемирной метеорологической организации и Росгидромета). Подавляющее большинство макро- и микрофизических параметров облачности, а также осадки и ОЯП детектируется АСПК в зависимости от метеопараметра, сезона, времени суток, региона и др. в 70–90 % случаев с точностью ± 1 класс/градация и в 80–99 % случаев с точностью ± 2 класс/градация. Грубых ошибок, т. е. когда ошибочно детектируются

диаметрально противоположные классы/градации метеопараметра, выявлено не было. Точность детектирования может немного (обычно на ± 1 класс/градация) падать для оптически тонкой и многослойной облачности, над водоемами с большой амплитудой температур относительно суши, при наличии температурной инверсии и в горах, а также при больших углах спутникового визирования. На качество классификации также влияет точность используемой прогностической информации.

2. Независимые испытания технологии

Независимые испытания карт спутникового диагноза некоторых параметров облачности, осадков и ОЯП были проведены в Центрально-Черноземном УГМС и Вологодском ЦГМС в ручном режиме в соответствии с Наставлением [4], Методическими указаниями [3] и методическими рекомендациями авторов методики на примере архива синхронных спутниковых и наземных наблюдений с июня 2019 г. по май 2020 г.

В «Вологодском» ЦГМС испытания проводились «по пункту» (МС Вологда), а в Центрально-Черноземном УГМС – «по пункту» (шесть МС: Курск, Курчатов, Железногорск, Обоянь, Тим, Рыльск) и «по территории» (Курская область) с использованием карт высокого разрешения (регион «ЕТР и сопредельные страны») с нанесенными на них местоположениями МС с окрестностями. Испытания проводились для двух стандартных сроков метеонаблюдений: 0 и 12 ч ВСВ, им соответствуют спутниковые сроки 23:45 (предыдущий день) и 11:45 ч ВСВ (текущий день). Оценивалось качество детектирования: зон осадков (факт наличия осадков любой интенсивности и фазы), интенсивности осадков, типа осадков у поверхности земли, типа облачности, грозы (факт наличия грозы над МС и в окрестностях) и града (факт наличия града в облаках и возможного выпадения на поверхность земли). Подробнее процедуру валидации см. в [2].

2.1. Центрально-Черноземное УГМС

1) При детектировании **зон осадков** средняя за год успешность спутниковой методики по территории Курской области составляет 91,5 % (ночью – 91,9 %, днем – 90,9 %). Она зависит от сезона: самые низкие значения (89,2 %) – зимой, самые высокие (93,2 %) – летом. Изменчивость дневных и ночных значений успешности относительно средних за сутки значений см. на рис. 1. Амплитуда от минимальной до максимальной успешности детектирования для большинства МС составляет 11,1–14,5 % в зависимости от времени суток и сезона. По большинству МС самые низкие значения успешности за месяц отмечались

в холодный период года: на МС Курск – днем в декабре (84,5 %), на МС Железногорск – ночью в декабре (83,9 %), а на всех остальных МС – днем в октябре 82,8–86,2 %.

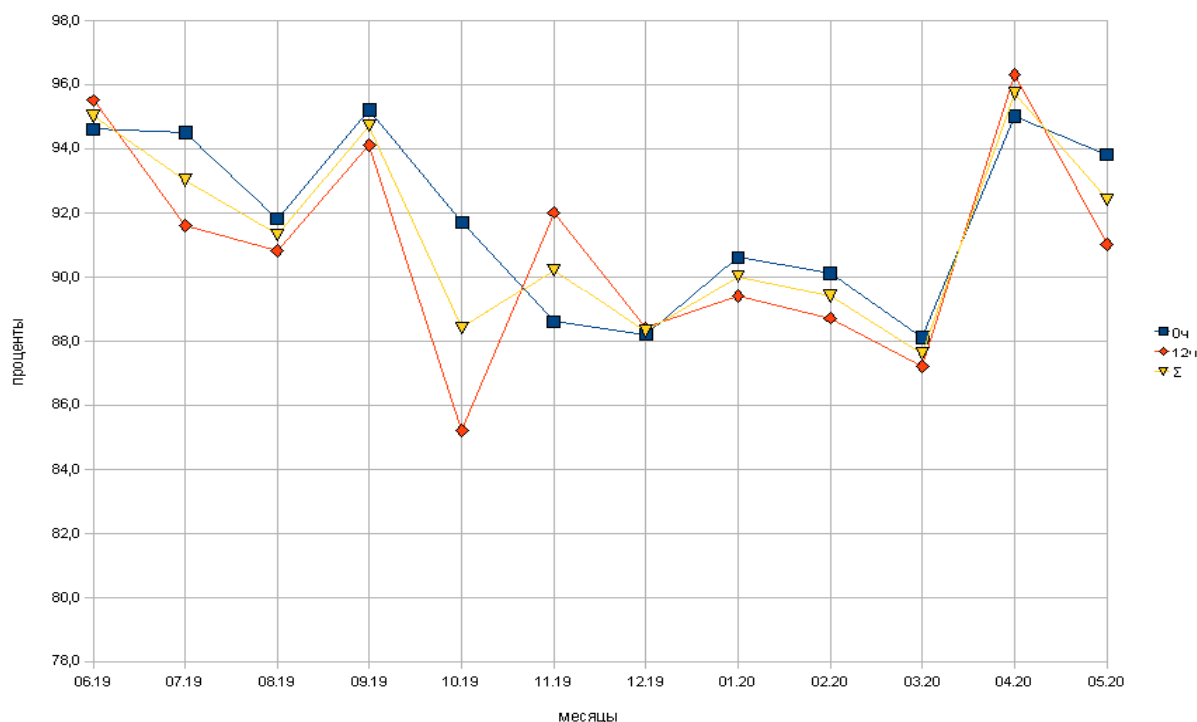


Рис. 1. Годовой ход средних за месяц значений успешности детектирования зон осадков спутниковой технологией отдельно для дня (12 ч ВСВ) и ночи (0 ч ВСВ) и суммарно за сутки «по территории» Курской области.

Максимальные значения успешности на большинстве МС отмечены в дневные часы в теплое время года (в апреле и июне 96,7–97,5 %), на МС Тим и Рыльск – в ночные часы в сентябре и августе (96,7–97,3 %). Такое распределение успешности по сезонам обусловлено, возможно, завышением методикой вероятности выпадения осадков в холодный период года из плотных слоистообразных облаков при достаточно сухом приземном слое воздуха, когда слабые осадки испаряются, не долетая до поверхности земли, или преувеличением возможности к осадкообразованию облаков, состоящих, в основном, из твердых фракций воды. В октябре 2019 г. (когда отмечалась самая низкая успешность детектирования зон осадков по региону), за исключением первой декады, в Курской области преобладал антициклональный характер погоды, в третьей декаде было больше дней с туманами и низкими слоистыми облаками.

2) Успешность детектирования *интенсивности осадков* спутниковой методикой сопоставима с успешностью детектирования зон осадков и в среднем за год составляет 90,9 % (91,4 % ночью и 90,4 % днем). На рис. 2 представлена изменчивость дневных и ночных среднемесячных значений успешности относительно средних за сутки значений.

Чаще всего ошибка детектирования по отдельной МС в конкретный срок была связана с осадками небольшой интенсивности или их отсутствием, но встречались и другие случаи. Например, ночью 01.06.2019 г. по Курской области на атмосферном фронте с волнами прошли умеренные и сильные дожди с грозами (8–36 мм/12ч): оправдываемость диагноза зон осадков составила 75–100 % (100 % только на МС Рыльск); интенсивности осадков – 0–100 % (100 % только на МС Рыльск – 36 мм/12ч); типа осадков – 0–75 %; наличия гроз – все станции на 0 %, кроме МС Железнодорожск (100 %). Детектирование интенсивности осадков для дождя, в целом, показало несколько более высокий результат, чем для снега или смешанных осадков. Успешность для интенсивности осадков летом составила 92,7 % (92,9 % ночью и 92,4 % днем), осенью и весной – 90,7–91,4 % (91,5–91,8 % ночью и 89,8–90,4 % днем), зимой – 88,9 % (89,6 % ночью и 88,5 % днем).

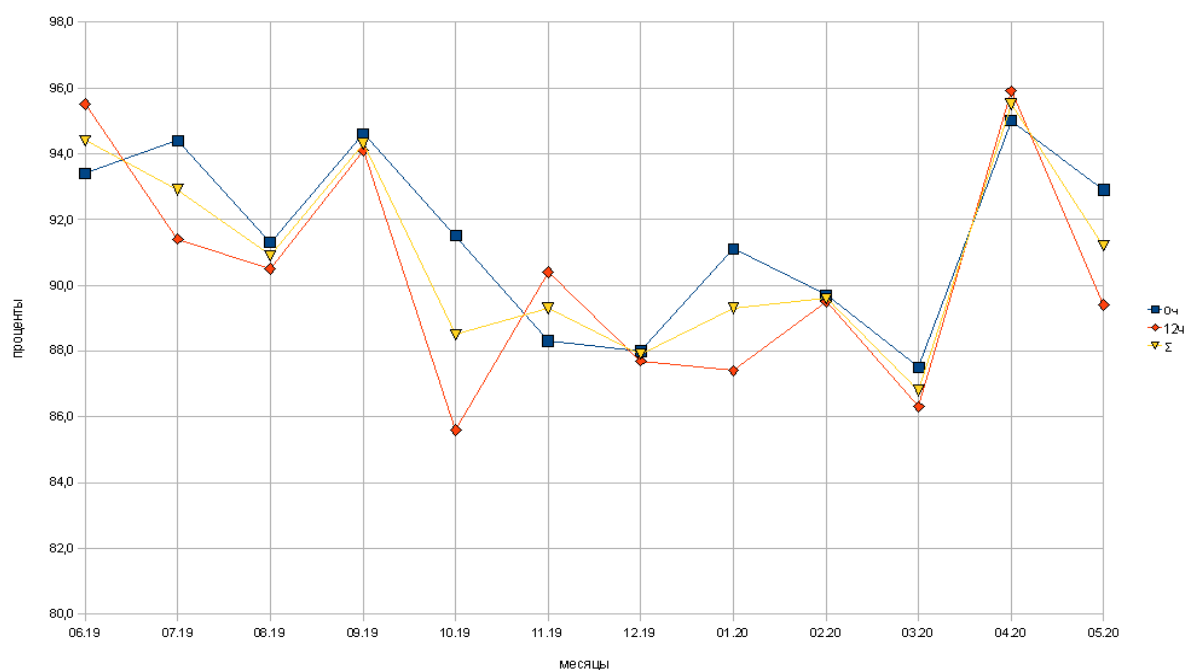


Рис. 2. Годовой ход средних за месяц значений успешности детектирования интенсивности осадков спутниковой технологией отдельно для дня (12 ч ВСВ) и ночи (0 ч ВСВ) и суммарно за сутки «по территории» Курской области.

3) Для *типа осадков* в среднем за год успешность ниже, чем для интенсивности. Так, если при определении интенсивности осадков успешность редко опускается ниже 88 %, то при определении типа осадков она может быть и ниже 80 %, например днем в январе 2020 г. (см. рис. 3). Это можно было бы объяснить довольно коротким световым днем в январе, что могло привести к ошибкам визуальной оценки, но успешность в январе ночью была выше дневной успешности (84,7 и 78,7 % соответственно). По данным МС Курск, наблюдатель в январе 2020 г. чаще фиксировал осадки ливневого характера (хотя и небольшой

интенсивности): в сроки 00 и 12 ч (BCB) было лишь 4 случая выпадения обложных осадков. Возможно, расхождения в оценке характера выпадающих осадков связаны с тем, что зимой это обычно вынужденная конвекция, которая может наблюдаться в довольно небольшом слое приземного воздуха, в то время как сверху могут располагаться плотные слоистые или перистые облака. В январе 2020 г. над Черноземьем преобладал циклонический характер погоды с быстрой и частой сменой воздушных масс на фоне значительно повышенного температурного режима.

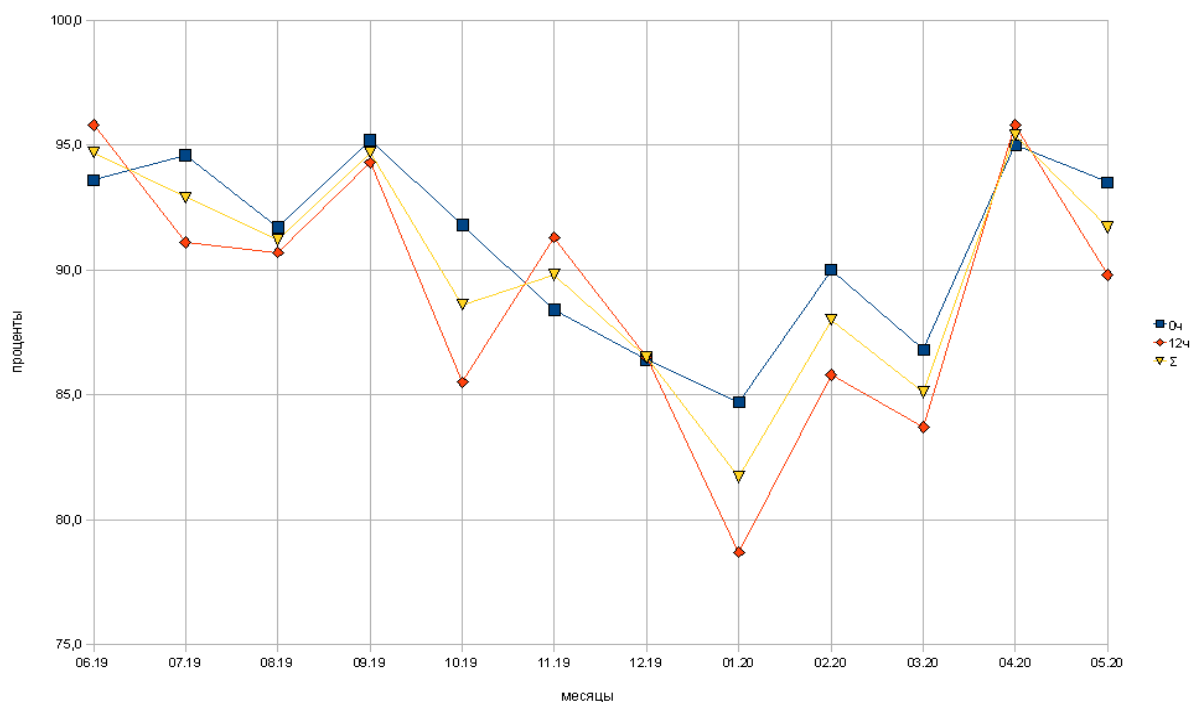


Рис. 3. Годовой ход средних за месяц значений успешности детектирования типа осадков спутниковой технологией отдельно для дня (12 ч ВСВ) и ночи (0 ч ВСВ) и суммарно за сутки «по территории» Курской области.

Самая высокая успешность детектирования типа осадков отмечалась в теплом сезоне в переходные месяцы – апрель 2020 г. и сентябрь 2019 г. (95,4 и 94,7 % соответственно). Это было связано, скорее, с преобладанием антициклонального характера погоды в указанные месяцы (на МС Курск выпало 27 и 38 мм осадков соответственно, или 64 и 75 % месячной нормы), а значит, с отсутствием осадков в большинстве дней месяца. Кроме того, в подавляющем большинстве случаев в соответствующие сроки (00 и 12 ч) наблюдатель на МС Курск в сентябре и апреле отмечал осадки ливневого характера, то есть, в целом, технологией лучше диагностируются конвективные осадки, что связано с большей вертикальной протяженностью осадкообразующих облаков и, соответственно, с большей их «узнаваемостью» на спутниковых изображениях. Анализ успешности детектирования типа осадков по отдельным МС выявил наименьшую сопоставимость типа визуально

зафиксированных осадков с детектируемыми на МС Железнодорожск (см. рис. 4–6). По данным пространственного контроля, проводимого в отделе метеорологии ФГБУ «Центрально-Черноземное УГМС», за 2019 г. на МС Железнодорожск в целом занижено число дней и продолжительность ливневых осадков, соответственно — завышена повторяемость обложных осадков, по сравнению с остальными МС, что может говорить о случаях ошибочного определения типа осадков наблюдателем.

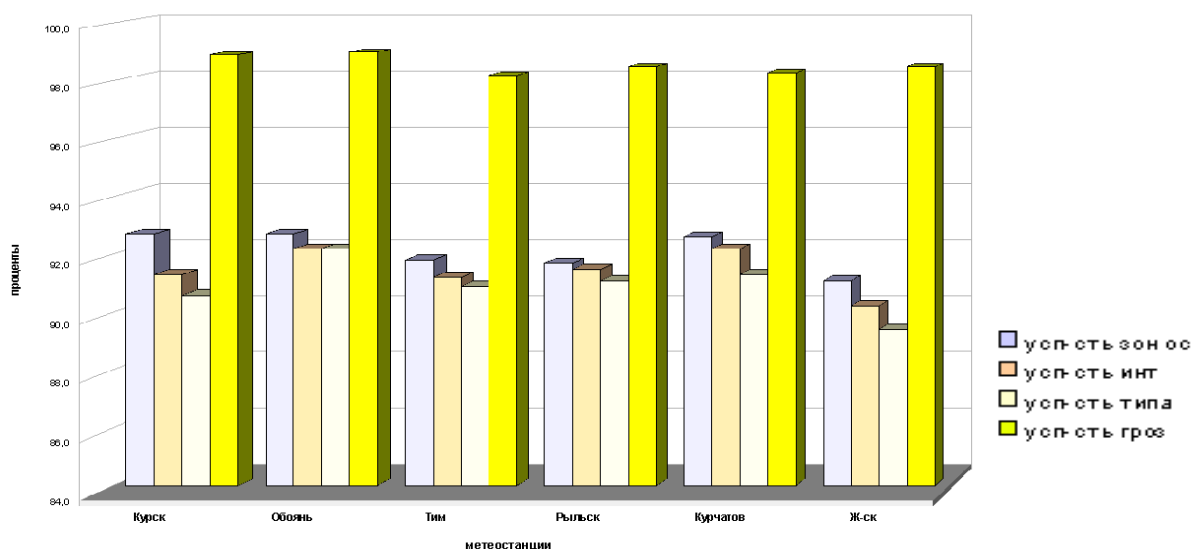


Рис. 4. Средняя за год успешность детектирования зон осадков, их интенсивности и типа, а также зон гроз спутниковой технологией для отдельных МС Курской области в ночное время (0 ч ВСВ).

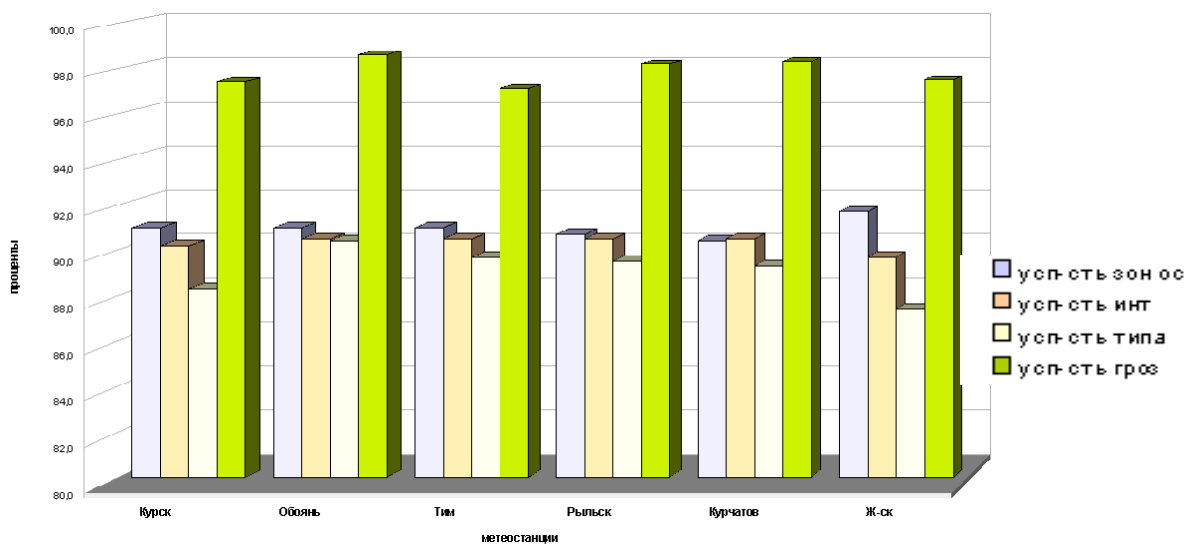


Рис. 5. Средняя за год успешность детектирования зон осадков, их интенсивности и типа, а также зон гроз спутниковой технологией для отдельных МС Курской области в дневное время (12 ч ВСВ).

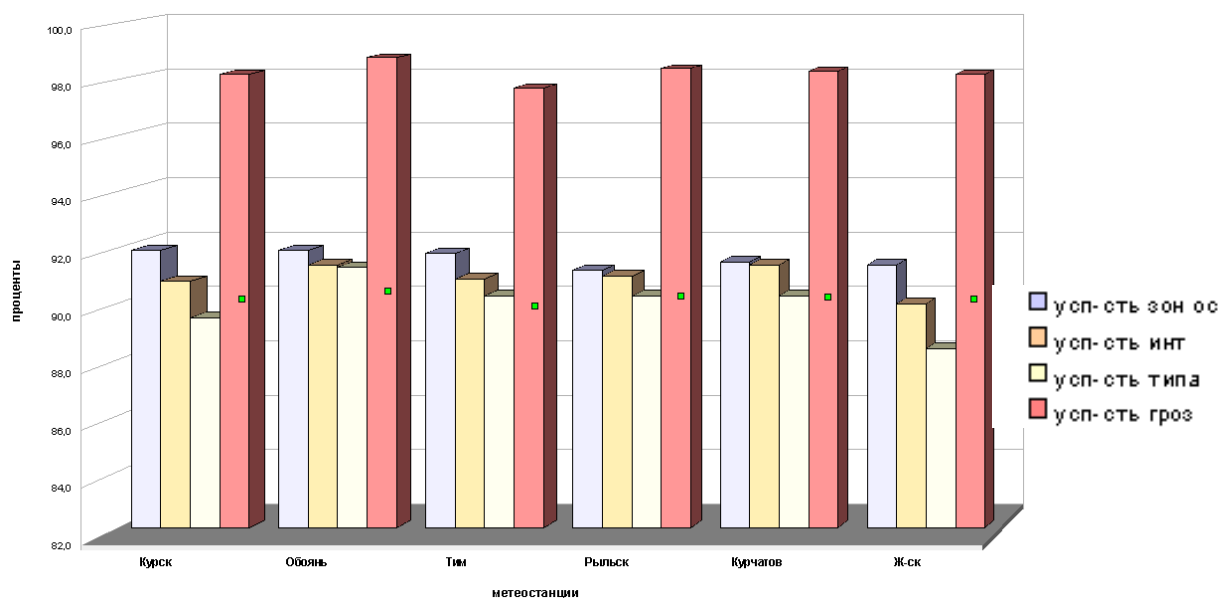


Рис. 6. Средняя за год успешность детектирования зон осадков, их интенсивности и типа, а также зон гроз спутниковой технологией для отдельных МС Курской области в среднем за сутки.

4) Успешность детектирования *зон гроз* спутниковой технологией в среднем за год составляет 98,2 %: в холодный период года (при фактическом и диагностируемом отсутствии гроз) она составляет 100 % (январь, февраль, март), в теплый падает до 95,4 % (см. рис. 7). В октябре, ноябре и декабре 2019 г. (при отсутствии фактических гроз на МС Курской области) успешность их детектирования колеблется от 99,3 до 100 % по полусуткам, т. е. иногда методика обработки спутниковых данных выдает завышенную вероятность наличия гроз.

В дневное время точность немного ниже, чем в ночное, это особенно заметно в июле 2019 г. и в мае 2020 г. (соответственно, 95,7 и 98,3 % в июле и 93 и 96,8 % в мае). Если в июле 2019 г. ошибка, вероятно, была связана с локализацией гроз (по региону УГМС отмечено 24 дня с грозами, в то время как по Курской области – только 14 дней, причем не всегда грозы были на большинстве МС), то в мае 2020 г. – со значительно пониженным температурным режимом по сравнению с нормой (на 2–3 градуса), когда при преобладающем циклоническом характере погоды (на МС Курск выпало 186 % нормы осадков за месяц) грозы по области реализовывались только в течение 9 дней. В июне и августе 2019 г. дневная и ночная успешность детектирования гроз была практически одинакова (колебалась от 93,0 и 93,3 % в июне до 95,7 и 95,4 % в августе), что связано, вероятно, с преобладанием сухой погоды в эти периоды времени и небольшим числом гроз;

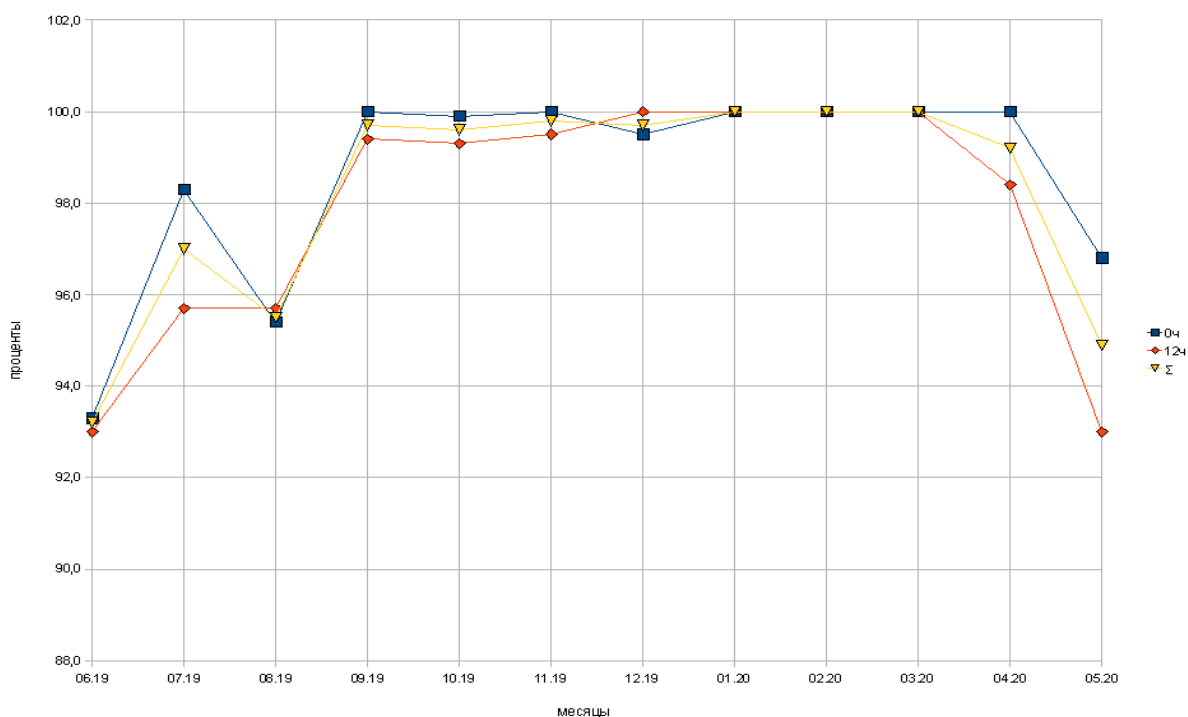


Рис. 7. Годовой ход средних за месяц значений успешности детектирования зон гроз спутниковой технологией отдельно для дня (12 ч ВСВ) и ночи (0 ч ВСВ) и суммарно за сутки «по территории» Курской области.

В целом, успешность спутниковой методики по всем валидируемым метеоявлениям (4 метеопараметра) за год составляет 92,7 % (ночью – 93,2 %, днем – 92,1 %). В летние и переходные месяцы она колеблется от 92,9 до 93,6 % (ночью – 93,8–93,9 %, днем – 92,2–93,3 %), зимой составляет 90,7 % (91,5 % ночью и 90,2 % днем), несмотря на практически 100%-ную успешность детектирования одной из составляющих – зон гроз в холодном сезоне (ввиду их отсутствия). При этом стоит учесть, что зима 2019–2020 гг. в Курской области была аномально теплой, снежный покров с декабря по февраль часто образовывался и вновь таял, что способствовало образованию туманов, а при их рассеивании у поверхности земли – формированию плотных слоистых облаков. Возможно, этот фактор сыграл одну из решающих ролей в ошибках детектирования метеоявлений, характерных для описываемого холодного периода.

Несмотря на описанные выше недочеты, в целом использование спутниковых карт для анализа текущей погоды показало удовлетворительные результаты. Они могут быть рекомендованы в качестве дополнения к другим видам наблюдений за погодой для региона «ЕТР и сопредельные страны». Как преимущество можно оценить возможность просмотра анимации за несколько последних сроков, что позволяет синоптику быстро оценить тренд развития конвективных явлений.

2.2. ФГБУ «Вологодский ЦГМС»

1) Средняя за год успешность детектирования *зон осадков* спутниковой методикой по МС Вологда и ее окрестностям составляет 92,7 %. Она значимо (при $p < 0,05$) не зависит ни от времени суток, ни от сезона (рис. 8). Самые низкие значения успешности отмечались в период с октября по декабрь (~90 %), наиболее высокие – в июне (95,1 %). В целом, успешность детектирования зон осадков значимо выше при отсутствии осадков, чем при их наличии (табл. 1). Успешность детектирования зон осадков достаточно сильно зависит от типа осадков: наибольшие значения успешности отмечаются при смешанных осадках, наименьшие – при твердых (табл. 2).

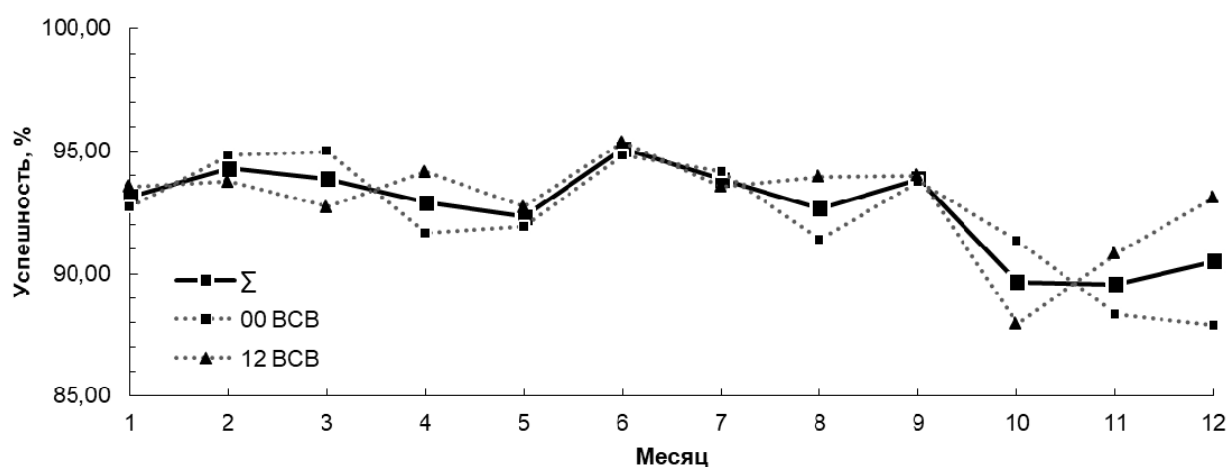


Рис. 8. Годовой ход средних за месяц значений успешности детектирования зон осадков спутниковой технологией отдельно для дня (12 ч ВСВ) и ночи (0 ч ВСВ) и суммарно за сутки по МС Вологда.

Таблица 1

Средняя за год успешность спутниковой методики при детектировании зон с осадками, а также без осадков при наличии и отсутствии облачности по МС Вологда

Класс по спутниковым наблюдениям	Успешность, %	Н сроков
Осадки	89,5	372
Облачно/без осадков	95,8	252
Безоблачно	97,3	75

Средняя за год успешность спутниковой методики по детектированию зон осадков
в зависимости от типа осадков по МС Вологда

Класс по наземным наблюдениям	Успешность, %	Н сроков
Жидкие осадки	96,7	137
Смешанные осадки	99,2	33
Твердые осадки	91,9	92

2) Успешность детектирования *интенсивности осадков* спутниковой методикой в среднем за год составляет 89,0 %. Она существенно не зависит от времени суток (ночью – 88,1 %, днем – 89,9 %). Успешность в зависимости от сезона значительно отличается только между зимой и летом, весной и осенью, а также летом и осенью. Аналогичных значимых различий между зимой, осенью и весной не обнаружилось, так же отсутствуют значимые различия между весной и летом (рис. 9). Самые низкие значения успешности отмечались в октябре (82,1 %), наиболее высокие – в июне (94,2 %).

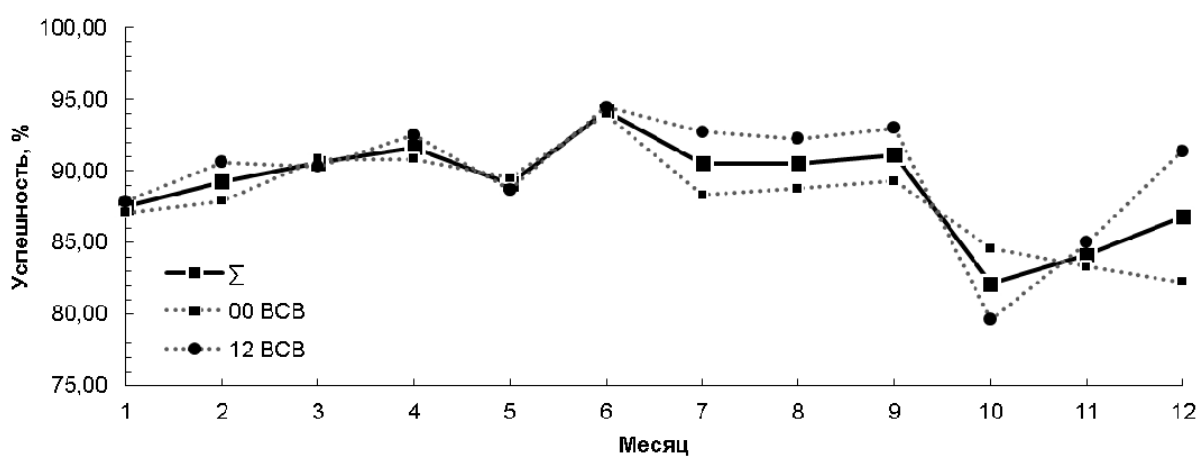


Рис. 9. Годовой ход средних за месяц значений успешности детектирования интенсивности осадков спутниковой технологией отдельно для дня (12 ч ВСВ) и ночи (0 ч ВСВ) и суммарно за сутки по МС Вологда.

Успешность детектирования интенсивности осадков зависит от их типа (табл. 3): самые высокие значения отмечаются при смешанных осадках, самые низкие – при твердых. Также она зависит и от интенсивности осадков (табл. 4): при отсутствии осадков она значительно выше, чем во всех остальных случаях, кроме случаев с твердыми слабыми осадками. Успешность

детектирования соседних по интенсивности классов жидких осадков значимо не отличается друг от друга, существенны различия лишь между жидкими слабыми и жидкими сильными осадками. В то же время успешность детектирования твердых осадков значимо отличается даже для соседних по интенсивности классов.

Таблица 3

Средняя за год успешность спутниковой методики по детектированию интенсивности осадков в зависимости от типа осадков по МС Вологда

Класс по наземным наблюдениям	Успешность, %	Н сроков
Жидкие осадки	87,4	137
Смешанные осадки	90,2	33
Твердые осадки	82,6	92

Таблица 4

Средняя за год успешность спутниковой методики по детектированию интенсивности осадков в зависимости от типа осадков по МС Вологда

Класс по спутниковым наблюдениям	Успешность, %	Н сроков
Без осадков	96,4	321
Жидкие слабые	83,8	188
Жидкие умеренные	83,9	59
Жидкие сильные	76,2	21
Твердые слабые	91,7	45
Твердые умеренные	78,9	52
Твердые сильные	67,3	13

3) Успешность детектирования *типа осадков* спутниковой методикой в среднем за год составляет 92,0 % (выше, чем успешность детектирования интенсивности осадков). Она практически не зависит от времени суток (ночью – 91,6 %, днем – 92,3 %). Статистически значимая разница в значениях успешности отмечена только между летом и осенью, а между другими сезонами существенных различий не обнаружено (рис. 10). Самые низкие значения успешности отмечались в ноябре и декабре (~88 %), наиболее высокие – в июне (95,1 %). Сравнительно низкая успешность детектирования типа осадков наблюдалась в холодный период года и, возможно, объясняется аномально высокой температурой воздуха, отмечавшейся в зимний период 2019–2020 гг. Среднесуточная температура, близкая к нулю градусов, привела к частому выпадению смешанных осадков, а также частому и порой

резкому переходу от жидких к твердым осадкам и наоборот, что могло затруднять их детектирование. Лучше всего распознавались смешанные осадки – 95,5 %. Успешность детектирования жидких осадков составила 93,3 %, твердых — 92,7 %, однако различия между этими группами статистически незначимы.

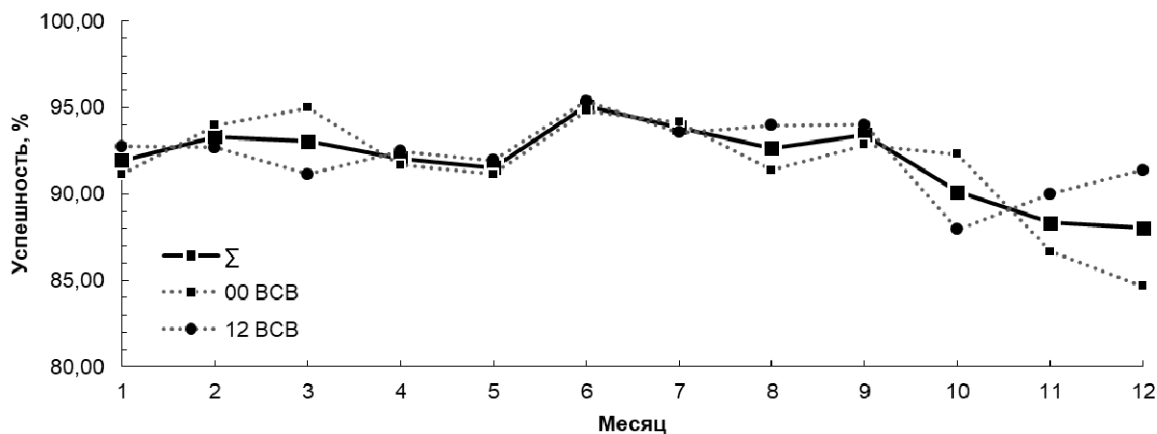


Рис. 10. Годовой ход средних за месяц значений успешности детектирования типа осадков спутниковой технологией отдельно для дня (12 ч ВСВ) и ночи (0 ч ВСВ) и суммарно за сутки по МС Вологда.

4) Успешность детектирования *типа облачности* спутниковой методикой составляет 82,6 %. Она значимо зависит от времени суток (ночью – 80,5 %, днем – 84,6 %). Статистически значимая разница в успешности отмечена только между летом и осенью, между другими сезонами существенных различий в успешности не обнаружено (рис. 11). Самые низкие значения успешности отмечались в ноябре (74,6 %), наиболее высокие – в июне (91,4 %).

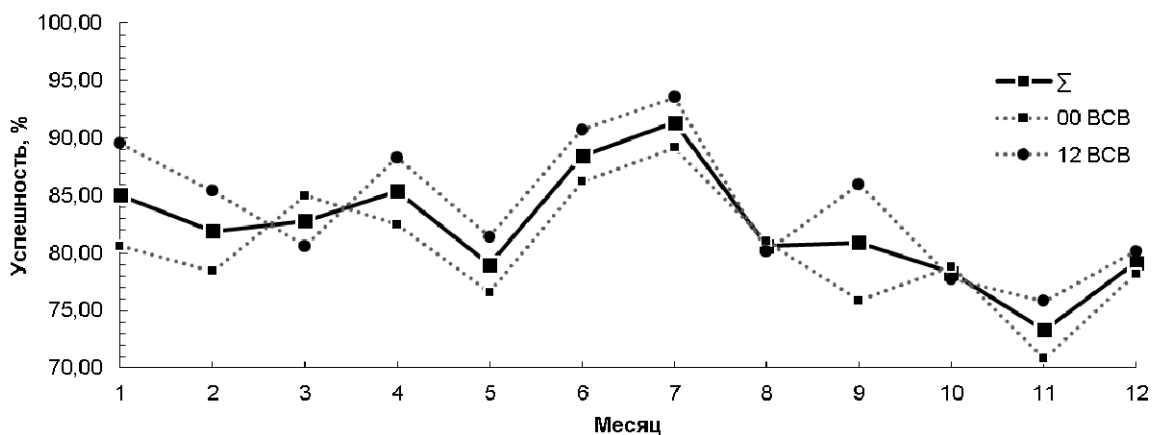


Рис. 11. Годовой ход средних за месяц значений успешности детектирования типа облачности спутниковой технологией отдельно для дня (12 ч ВСВ) и ночи (0 ч ВСВ) и суммарно за сутки по МС Вологда.

Анализ успешности классифицирования различных типов облачности (табл. 5) показал, что лучше всего распознаются облачные классы «Cu, Sc» (кучевообразные) и «Ns, Cb» (включает в себя слоисто-дождевые (Ns), слоистые разорванные (St fr.), разорванно-дождевые (Fr nb), кучевые разорванные облака плохой погоды (Cu fr.), кучево-дождевые плоские (Cb hum.) и кучевые мощные (Cu cong.) в стадии распада), а также класс отсутствия облачности. Хуже всего классифицируются классы «Cb+Ci» (облака верхнего яруса над кучево-дождевыми облаками) и «Cs+As+Ns» (многослойная преимущественно слоистообразная: верхняя облачность над нижней и/или средней облачностью). Количество случаев с классами «Ci,Cs» (перистая), «Cb inc» (мощные кучево-дождевые в стадии начала распада), «Cb cap» (мощные кучево-дождевые в стадии максимального развития) и «Ac, As+Ci» (многослойная: перистые над облачностью среднего яруса) было слишком мало для адекватной оценки. Сравнительно низкая успешность классифицирования классов многослойной облачности может быть объяснена тем, что при наблюдении на станции идентификация облачности верхнего и среднего яруса может быть затруднена при наличии плотной облачности нижнего яруса.

Таблица 5

**Средняя за год успешность спутниковой методики при детектировании
типа облачности по МС Вологда**

Класс по спутниковым наблюдениям	Успешность, %	Н сроков
Ясно	95,0	109
Ci, Cs	100,0	3
Cu, Sc	95,3	134
Cb inc	87,5	2
Cb calv	72,1	17
Ns, Cb	91,3	60
Cb cap	55,0	10
Cb+Ci	66,6	83
Ac	84,3	81
As	80,4	28
Cu,Ns, Cb+As	71,4	90
Ac, As+Ci	75,0	1
St	77,2	23
Cs+As+Ns	67,7	55

5) Успешность спутниковой технологии для *зон гроз* в среднем за год составляет 99,2 %: 100 % в холодный период года, в теплый падает до 97,0 %; в дневное время точность методики немного ниже, чем в ночное, однако эти различия не существенны (рис. 12). В холодный период года и в ночное время успешность спутниковой методики получается выше, чем летом и днем, так как при ее расчете помимо случаев наличия грозы рассматривались и случаи ее отсутствия. Таким образом, проведенная валидация показывает, что методика не переоценивает грозовые облака в неблагоприятные для ее развития периоды времени.

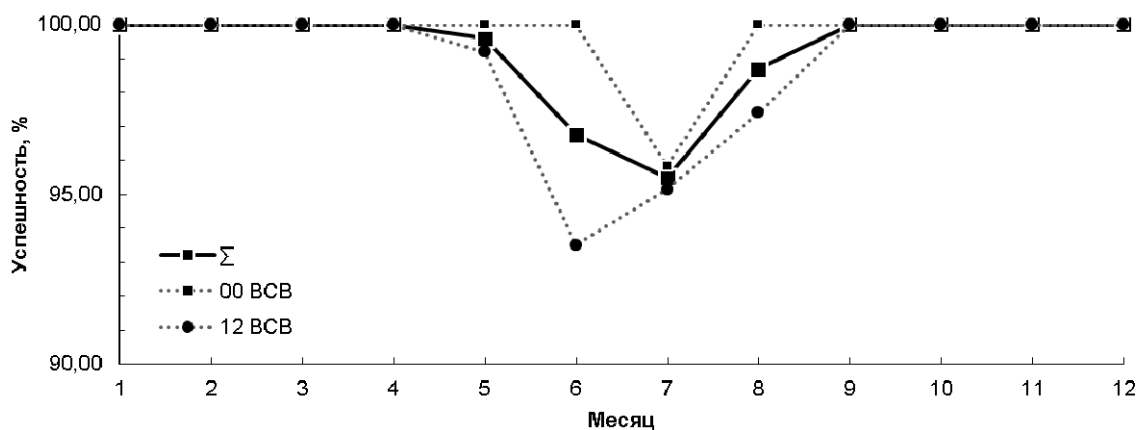


Рис. 12. Годовой ход средних за месяц значений успешности детектирования зон гроз спутниковой технологией отдельно для дня (12 ч ВСВ) и ночи (0 ч ВСВ) и суммарно за сутки по МС Вологда.

6) Средняя успешность для *зон града в облаках и у земли* составляет 99,6 %: в холодный период года 100 %, в теплый падает до 98,7 %; в дневное время точность немного ниже, чем в ночное (рис. 13). Более высокие значения успешности в ночное время в теплый период года, а также зимой объясняются следующим. Град в облаках летом ночью и в холодный период образуется значительно реже, чем летом днем. А так как при расчете успешности спутниковой методики учитываются также и случаи отсутствия града, то получается, что спутниковая методика не завышает значимо количество и размеры градоносных облаков в условиях, неблагоприятных для его образования.

В среднем за год успешность спутниковой методики по всем валидируемым метеоявлениям (6 метеопараметров) составляет 92,4 % (92,0 % ночью и 92,9 % днем). Успешность спутниковой методики существенно не зависит от времени суток во все сезоны, кроме зимы. В период с декабря по февраль успешность диагноза была значимо выше днем, чем ночью. Для разных сезонов значения успешности значимо различаются только между летом и осенью, в остальных случаях различия не существенны.

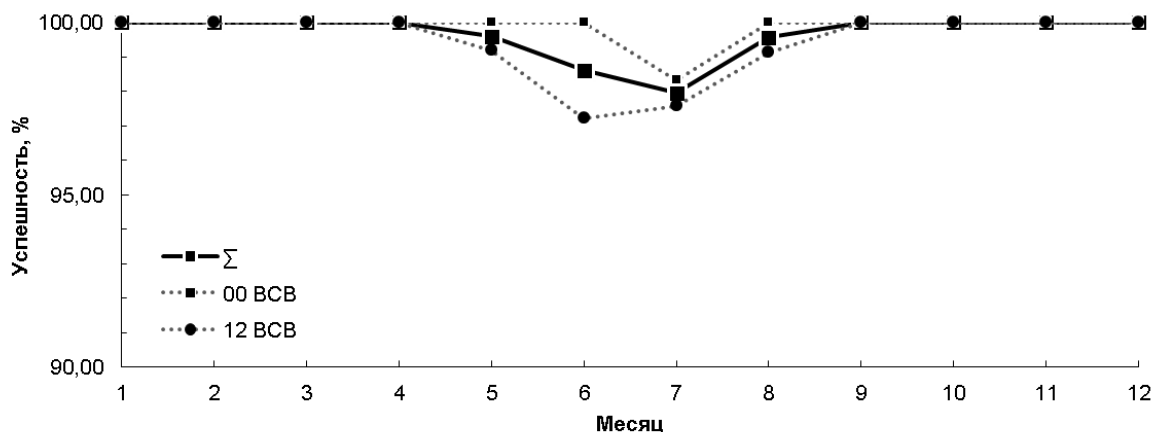


Рис. 13. Годовой ход средних за месяц значений успешности детектирования зон града в облаках и у земли спутниковой технологией отдельно для дня (12 ч ВСВ) и ночи (0 ч ВСВ) и суммарно за сутки по МС Вологда.

В целом, использование спутниковых карт для анализа текущей погоды показало хорошие результаты на протяжении всего года. Они позволяют получить обзорное представление о наличии, типе и интенсивности осадков, типе облачности и развитии конвективных явлений на всей территории Вологодской области за исключением северо-восточных районов. Возможность просмотра анимации позволяет оперативно отслеживать динамику атмосферных процессов, что представляет очевидную ценность для наукастинга и составления штормовых предупреждений.

Ограничение использования спутниковых карт связано с тем, что территория Вологодской области расположена на границе зоны «спутниковой» видимости, что не позволяет получать информацию о состоянии атмосферы при перемещении воздушных масс с северных и восточных направлений. Пространственное разрешение спутниковой методики по детектированию зон конвективных явлений уступает данным ДМРЛ-С, однако при отсутствии данных радарных наблюдений спутниковые карты могут использоваться в качестве альтернативы удовлетворительного качества.

Заключение

Учитывая удовлетворительные результаты испытаний спутниковой методики, Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета решением от 6.11.2020 г. рекомендовала:

– внедрить автоматизированную технологию диагноза параметров облачного покрова, осадков и ОЯП для ЕТР по данным радиометра SEVIRI/Meteosat в оперативную работу ФГБУ «НИЦ «Планета»;

– внедрить выходную продукцию технологии в оперативную работу ОМП ФГБУ «Центрально-Черноземное УГМС» в качестве вспомогательного материала в теплый период года и в качестве консультативного материала – в холодный период года;

– внедрить выходную продукцию технологии в оперативную работу ОМП Филиала ФГБУ «Северное УГМС» «Вологодский ЦГМС» в качестве вспомогательного метода карты зон и типа осадков для всех сезонов года, карты интенсивности осадков, зон гроз и града для весенне-летнего периода, в качестве консультативного метода – карты интенсивности осадков для осенне-зимнего периода и карты типа облачности для всех сезонов года.

Список литературы

1. Волкова Е.В., Кухарский А.В. Специализированный программный комплекс получения оценок параметров облачности и осадков по данным радиометра SEVIRI с геостационарного метеоспутника Meteosat (0° в. д.) для Европейской территории России и Европы // Информационные технологии в дистанционном зондировании Земли – RORSE 2018 (Электронный сборник статей 16-й конференции, 12-16 ноября 2018 г., Москва, Россия). – С. 248-255. DOI 10.21046/rorse 2018.248.

2. Волкова Е.В., Кухарский А.В. Автоматизированная технология диагноза параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды для Европейской территории России по данным радиометра SEVIRI с геостационарных метеоспутников серии Meteosat MSG // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 4 (378). – С. 43-62. DOI 10.37162/2618-9631-2020-4-43-62.

3. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиографических прогнозов. – 151 с.

4. РД 52.27.724-2019. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. – 66 с.

*Р.В. Волгутов, В.А. Кровотынцев,
А.А. Максимов, И.С. Тренина*

**МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ ПО СОЗДАНИЮ КАРТ
МОРСКОГО ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ
ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОГО, ИНФРАКРАСНОГО
И МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНОВ
В МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ
«PLANETAMULTISAT»**

Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета», г. Москва

Методическое пособие по созданию карт морского ледяного покрова на основе спутниковых данных оптического, инфракрасного и микроволнового диапазонов в многофункциональной программной среде «PlanetaMultiSat», подготовленное специалистами НИЦ «Планета», основано на сочетании методических положений, выпущенных в 70–80-е годы прошлого столетия, и современных сведений, полученных на опыте использования информации с новых космических аппаратов, новой бортовой аппаратуры, в т. ч. высокого пространственного разрешения (включая радиолокационной), а также на более чем тридцатилетнем опыте проведения в НИЦ «Планета» космического мониторинга морского ледяного покрова Арктики, Антарктики и замерзающих морей России, включающего построение ледовых карт.

В пособии отражены:

- уточненные характеристики спутниковых данных, используемых при составлении ледовых карт;
- расширенный перечень характеристик морского льда, определяемых на спутниковых изображениях;
- современные принципы визуального дешифрирования ледовых объектов с использованием комплексирования спутниковых данных в различных спектральных диапазонах и разного пространственного разрешения;

- этапы построения ледовых карт в многофункциональной программной среде «PlanetaMultiSat»;

- примеры построения ледовых карт в многофункциональной программной среде «PlanetaMultiSat».

Практической реализацией Методического пособия является создание в ФГБУ «НИЦ «Планета» многофункционального программного комплекса (ПК) «PlanetaMultiSat», в программной среде которого проводится полный цикл построения ледовых карт по спутниковым данным, в том числе в международном формате SIGRID-3.

Созданная технология позволила, наряду со спутниковыми данными малого и среднего пространственного разрешения, использовать в оперативном режиме космические изображения высокого разрешения для выявления на них опасных ледовых явлений (торосы, гряды торосов, стамухи, мелкие и крупные айсберги) и подготовки детализированных ледовых карт, в том числе в векторном формате.

Основными информационными продуктами, производимыми с помощью ПК «PlanetaMultiSat», являются ледовые карты, составленные по спутниковым данным оптического, инфракрасного и микроволнового диапазонов.

Ледовые карты являются высокотехнологическими информационными продуктами, созданными на основе комплексирования спутниковых данных различных спектральных диапазонов и разного пространственного разрешения с привлечением результатов наземных измерений ледовых параметров, а также экспертных знаний. В настоящее время для мониторинга ледовой обстановки в НИЦ «Планета» преимущественно используется информация видимого и инфракрасного диапазонов с полярно-орбитальных российских КА Метеор-М №2, 2-2 Канопус-В №3, 4, 5, 6, Канопус-В-ИК и зарубежных КА NOAA-18, 19, 20, Metop-A, B, Suomi NPP, спутников серии EOS (Aqua, Terra).

Ледовые карты создаются на основе методов интерактивного дешифрирования спутниковых изображений. Основные этапы технологии построения ледовых карт в графическом и векторном форматах представлены на рис. 1 и 2.

Среди новых российских разработок в технологии ледового картирования впервые использованы данные МСУ-ИК-СРМ российского космического аппарата Канопус-В-ИК (длина волны 8,4–9,4 мкм, пространственное разрешение 200 м, ширина обзора 2000 км) для детализированного мониторинга ледовой обстановки, что особенно важно для построения ледовых карт в бухтах, заливах, проливах и в других непротивопоказанных акваториях, а также для уточнения некоторых характеристик морского ледяного покрова, таких как возраст льда, границы распространения льда, сплоченность, формы льда, пространства чистой воды среди льда и др. (рис. 3).

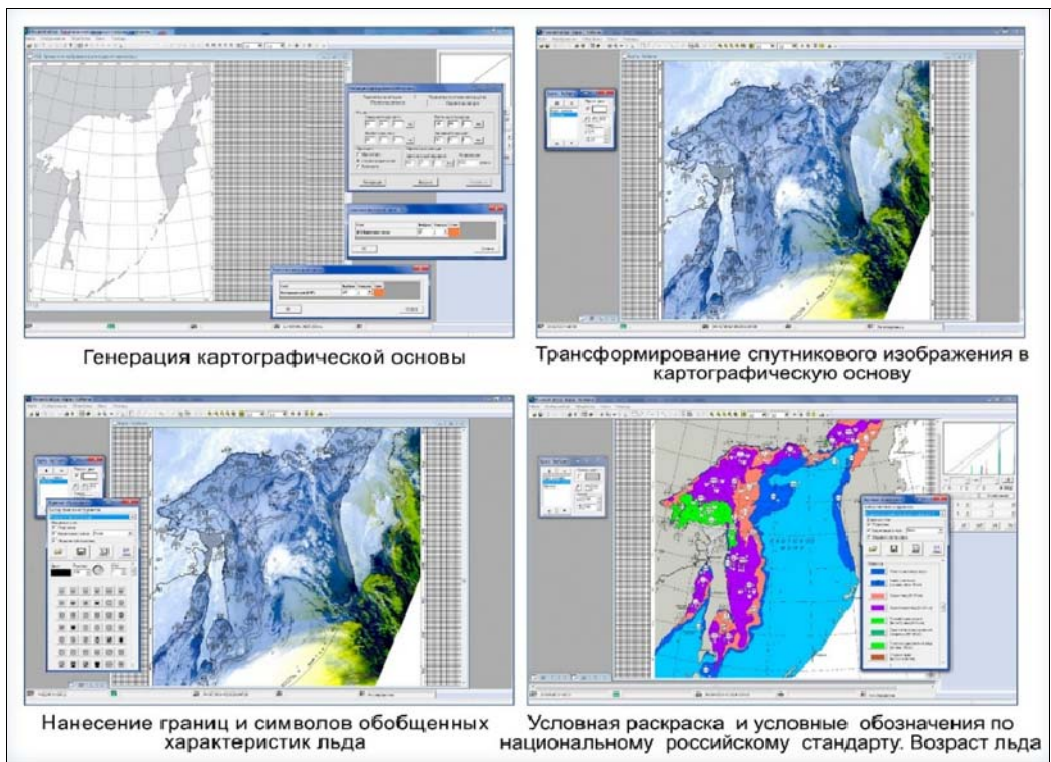


Рис. 1. Основные этапы технологии построения ледовых карт в графическом формате в многофункциональном ПК «PlanetaMultiSat».

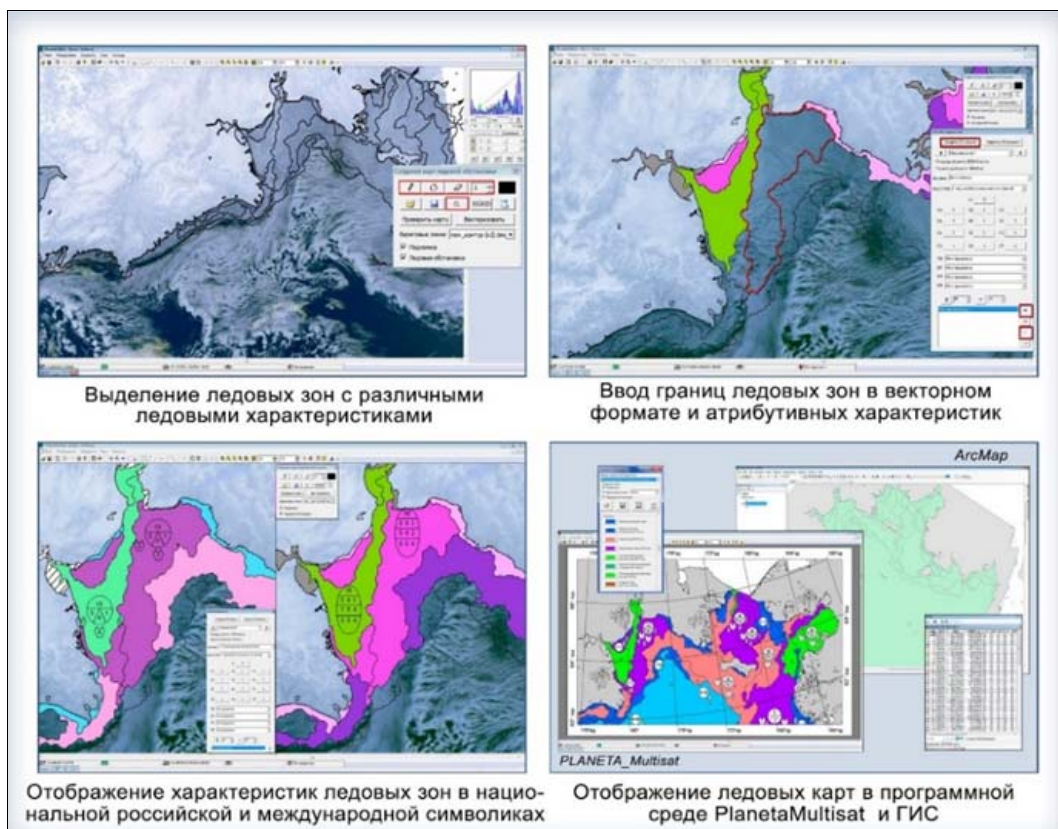


Рис. 2. Основные этапы технологии построения ледовых карт в векторном формате SIGRID-3 в многофункциональном ПК «PlanetaMultiSat».

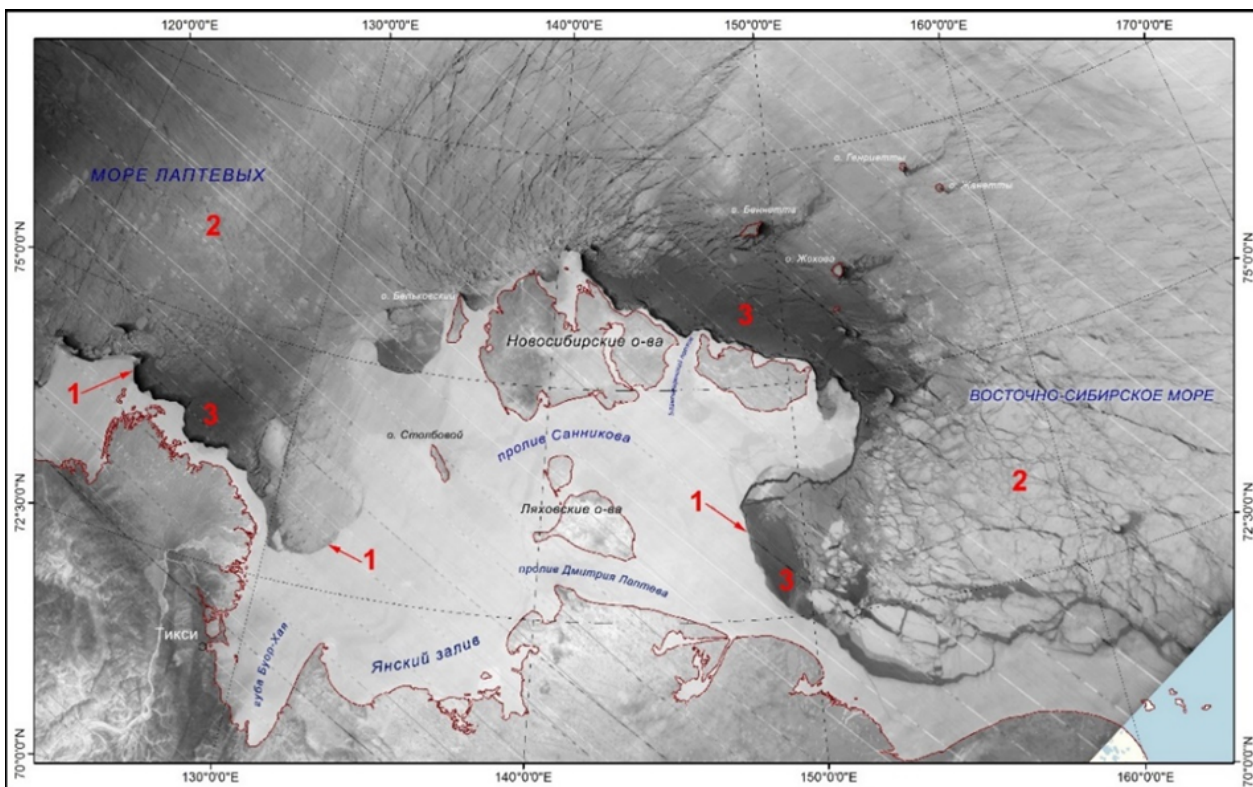


Рис. 3. Инфракрасное спутниковое изображение параметров ледяного покрова. Район Новосибирских островов. КА Канопус-В-ИК/МСУ-ИК-СРМ (8.4 – 9.4 мкм), разрешение 200 м, 25.03.2020 г. 1 – граница между неподвижным (припаем) и дрейфующим льдом; 2 – дрейфующий лед; 3 – заприпайная полынья, покрытая начальными видами льда и ниласом.

Разработка первой версии ПК «PlanetaMultiSat» относится к началу 2000-х годов. За эти годы ПК много раз дорабатывался, развивался и совершенствовался. Последняя его доработка связана и добавлением модуля построения ледовых карт в векторном формате SIGRID-3.

Все эти годы на основе ПК «PlanetaMultiSat» в НИЦ «Планета» строились ледовые карты арктических и замерзающих морей России. Достоверность картографирования была проверена многолетним опытом работы с потребителями.

Ледовые карты Азовского, Каспийского, Берингова, Охотского и Японского морей, выпускаемые в НИЦ «Планета» по данной технологии, используются для составления долгосрочных прогнозов ледовых условий; уточнения прогнозов ледовой обстановки на месяц; уточнения ледовых характеристик в отдельных акваториях с использованием спутниковых данных высокого пространственного разрешения; в качестве исходной

информации в оперативных прогностических моделях Азовского и Каспийского морей Гидрометцентра России; представления еженедельных морских докладов (презентаций) на оперативных совещаниях Росгидромета и др.

Данная информационная продукция передается в территориальные органы Росгидромета, Минобороны России (ГМС ВС РФ и др.), МЧС России (НЦУКС и др.). Ледовые карты также размещаются в Мировом центре данных по морскому льду наряду с ледовой продукцией различных национальных ледовых служб и ведущих спутниковых центров мира. Примеры карт-схем ледовой обстановки неарктических морей России, выпущенных в ледовый сезон 2018–2019 гг., приведены на рис. 4.

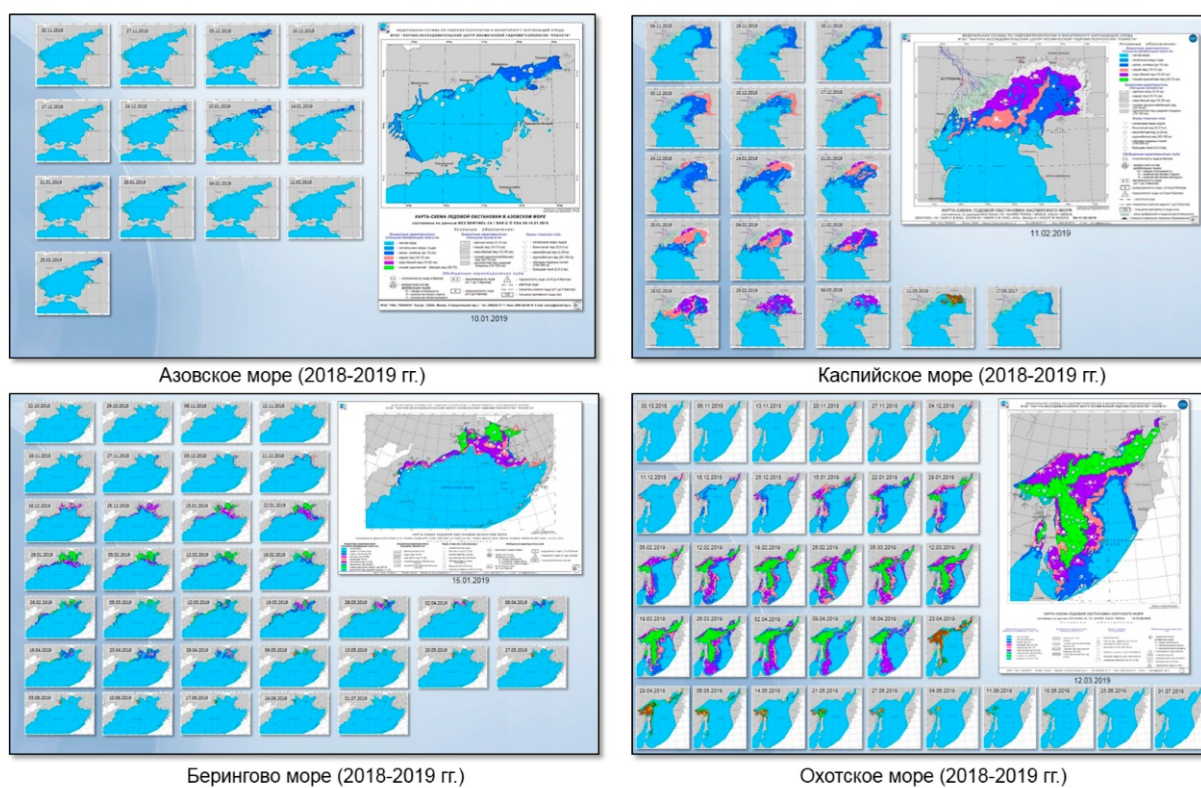


Рис. 4. Карты-схемы ледовой обстановки Азовского, Каспийского, Берингова и Охотского морей, построенные НИЦ «Планета» в программном комплексе «PlanetaMultiSat».

Ледовый сезон 2018–2019 гг.

Долговременные ряды ледовой продукции, выпускаемой в НИЦ «Планета», размещаются на русскоязычном (СЕАКИЦ) и англоязычном (СЕАКС) сайтах Северо-Евразийского климатического центра и используются в качестве индикаторов изменения климата. (<http://seакс.meteoinfo.ru>, <http://neacc.meteoinfo.ru>). Пример ледовой продукции с климатически значимыми характеристиками представлен на рис. 5.

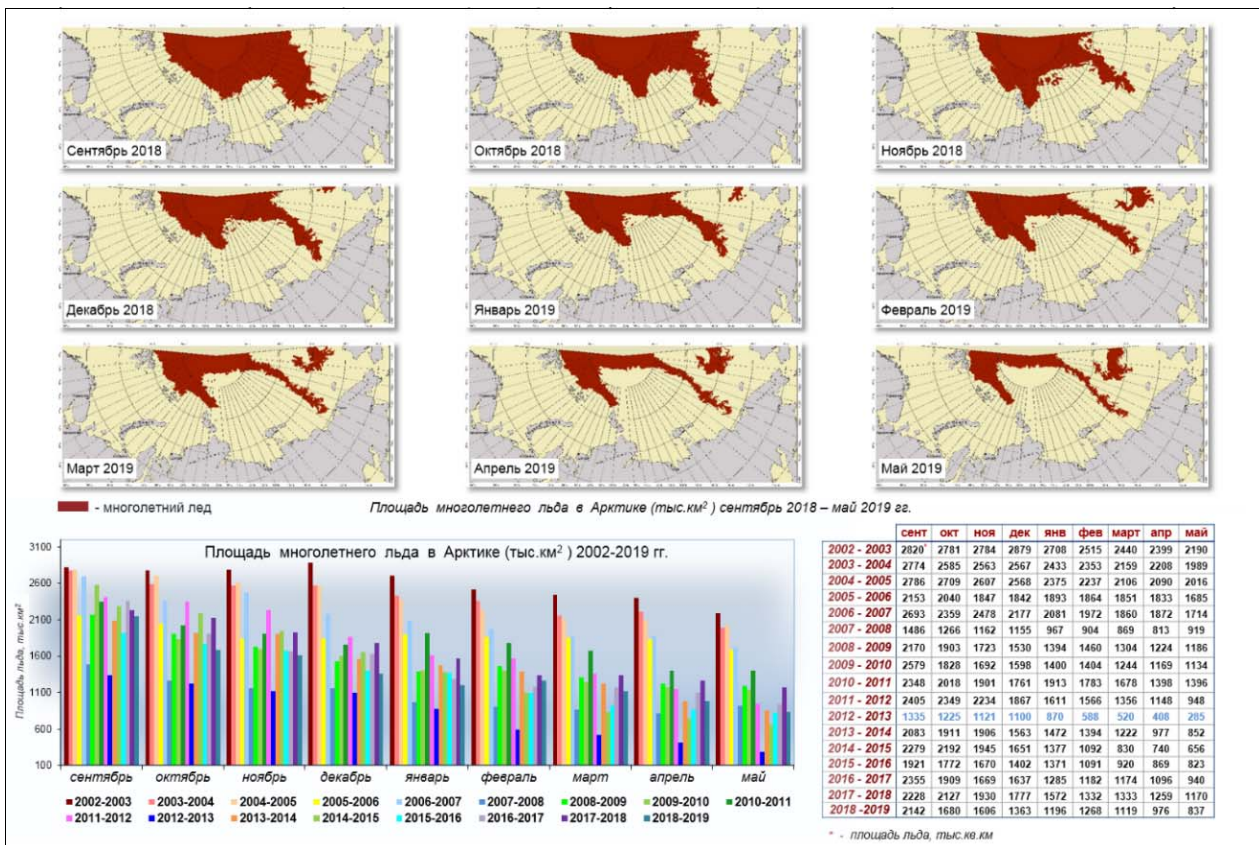


Рис. 5. Изменение площади многолетнего льда в российском секторе Арктики. (по данным КА MetOp-A,B,C/ASCAT, EOS (AQUA, TERRA)/AMSR-E, MODIS, Метеор-М №2, 2-2/МСУ-МР, NOAA/AVHRR, Sentine-1A,B/SAR-C 2002–2019 гг.)

Методическое пособие является руководством для специалистов гидрометеорологов при составлении ледовых карт по спутниковым данным оптического, инфракрасного и микроволнового диапазонов, а также для студентов и аспирантов океанографических специальностей.

Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета на заседании от 6 ноября 2020 года приняла следующее решение:

- одобрить работу ФГБУ «НИЦ «Планета» в части подготовки Методического пособия по созданию карт морского ледяного покрова на основе спутниковых данных оптического, инфракрасного и микроволнового диапазонов в многофункциональной программной среде «PlanetaMultiSat»;
- рекомендовать материалы Методического пособия для использования в практике работы учреждений и НИУ Росгидромета.

Список литературы

1. Асмус В.В., Василенко Е.В., Затыгалова В.В., Иванова Н.П., Кровотынцев В.А., Максимов А.А., Тренина И.С. Космический мониторинг ледяного покрова и состояния водной среды Каспийского моря // Метеорология и гидрология. – 2018. – № 10. – С. 81-95.
2. Асмус В.В., Волгутов Р.В., Дерюгина В.В., Кровотынцев В.А., Максимов А.А., Милехин О.Е., Тренина И.С. Использование космических средств и технологий для решения гидрометеорологических задач в Арктике // Метеорология и гидрология. – 2019. – № 4. – С. 54-69.
3. Кровотынцев В.А., Тренина И.С., Волгутов Р.В., Максимов А.А., Маслова Н.А. Информационная продукция спутникового мониторинга полярных акваторий Земли и замерзающих морей России // Метеоспектр. – 2014. – № 2. – С. 89-98.
4. Международная символика для морских ледовых карт и номенклатура морских льдов. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 56 с.
5. Номенклатура ВМО по морскому льду. Том I. Терминология. Том II. Иллюстрированный словарь. Том III. Международная система символов // WMO-№. 259. – Женева: Секретариат ВМО, 1970. – 2004.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ МЕТОДА
ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ВАЛОВОГО СБОРА ЗЕРНОВЫХ
И ЗЕРНОБОБОВЫХ КУЛЬТУР В ЦЕЛОМ
ПО ФЕДЕРАЛЬНЫМ ОКРУГАМ И РОССИИ В ЦЕЛОМ**

¹Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии, г. Обнинск;

²Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации

В ФГБУ «ВНИИСХМ» на основе синоптико-статистического подхода ранее был разработан метод долгосрочного прогноза урожайности и валового сбора зерновых и зернобобовых культур в целом. Прогноз составляется в марте с заблаговременностью около 6 месяцев (Решение Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 13.04.2016 г.).

В 2014–2016 гг. была предпринята попытка увеличить заблаговременность долгосрочного прогноза валового сбора зерновых и зернобобовых культур в целом на один месяц. Новая методика позволяет составлять прогноз в феврале, при этом в качестве предикторов используются показатели циркуляции атмосферы и температуры поверхности океанов за период с сентября по январь, предшествующие периоду вегетации, а в качестве предиктанта – валовой сбор зерновых и зернобобовых культур в целом (автор – В.М. Лебедева).

В основу синоптико-статистического метода агрометеорологических прогнозов положено предположение о том, что развитие атмосферных процессов в заданном регионе в период весенне-летней вегетации культур связано с циркуляцией атмосферы в предшествующий осенне-зимний период в пределах всего Северного полушария. Исследования особенностей циркуляции атмосферы в годы с экстремальными урожаями культур (а значит, и с различным гидротермическим режимом) в отдельных регионах Северного полушария показали, что атмосферные процессы сезонов связаны между собой и можно выделить признаки аномального развития атмосферных процессов весенне-летнего периода по результатам анализа условий циркуляции атмосферы осенне-зимнего сезона

[9–11]. Такой подход при разработке агрометеорологических прогнозов позволяет увеличить их заблаговременность до 6–7 месяцев.

Метод прогноза валового сбора зерновых и зернобобовых культур основан на сочетании двух прогнозов: прогноза трендовой составляющей валового сбора и оценки отклонений валового сбора от тренда, выполняемой с помощью синоптико-статистического метода оценки агрометеорологических условий формирования урожая. Прогноз трендовой составляющей валового сбора осуществляется с помощью метода гармонических весов [12]. Для оценки отклонений валового сбора от тренда используются уравнения множественной регрессии на главных компонентах [8]. Прогнозируемое значение ожидаемого валового сбора зерновых и зернобобовых культур в целом по Российской Федерации рассчитывается по уравнению регрессии на основании расчетов прогнозируемого валового сбора по шести федеральным округам. Общие принципы составления долгосрочного прогноза урожая и валового сбора основных сельскохозяйственных культур изложены в ряде статей [2–7, 9, 10, 14, 15].

Для расчета ожидаемого валового сбора зерновых и зернобобовых культур используются следующие потенциальные предикторы:

- средние месячные значения геопотенциала на уровне 500 гПа в узлах регулярной десятиградусной сетки в пределах Северного полушария за сентябрь – январь;
- средние месячные значения температуры поверхности воды Тихого и Атлантического океанов за осенне-зимний период в узлах регулярной сетки $10 \times 10^\circ$ за сентябрь – январь;
- средние месячные значения параметров центров действия атмосферы;
- средние месячные значения местоположения ПВФЗ.

Для реализации методики долгосрочного синоптико-статистического прогноза валового сбора зерновых и зернобобовых культур по федеральным округам и России в целом разработан автоматизированный прогностический комплекс. Основные меню интерфейса и выходной файл представлены на рис. 1.

Программное обеспечение методики прогноза реализовано в среде Windows. При разработке методики составления прогноза использовались следующие программные продукты: – Borland Builder C++ 5.0 – как среда разработки программного комплекса; – Visual Fortran – на языке Фортран реализованы все прогностические программы.

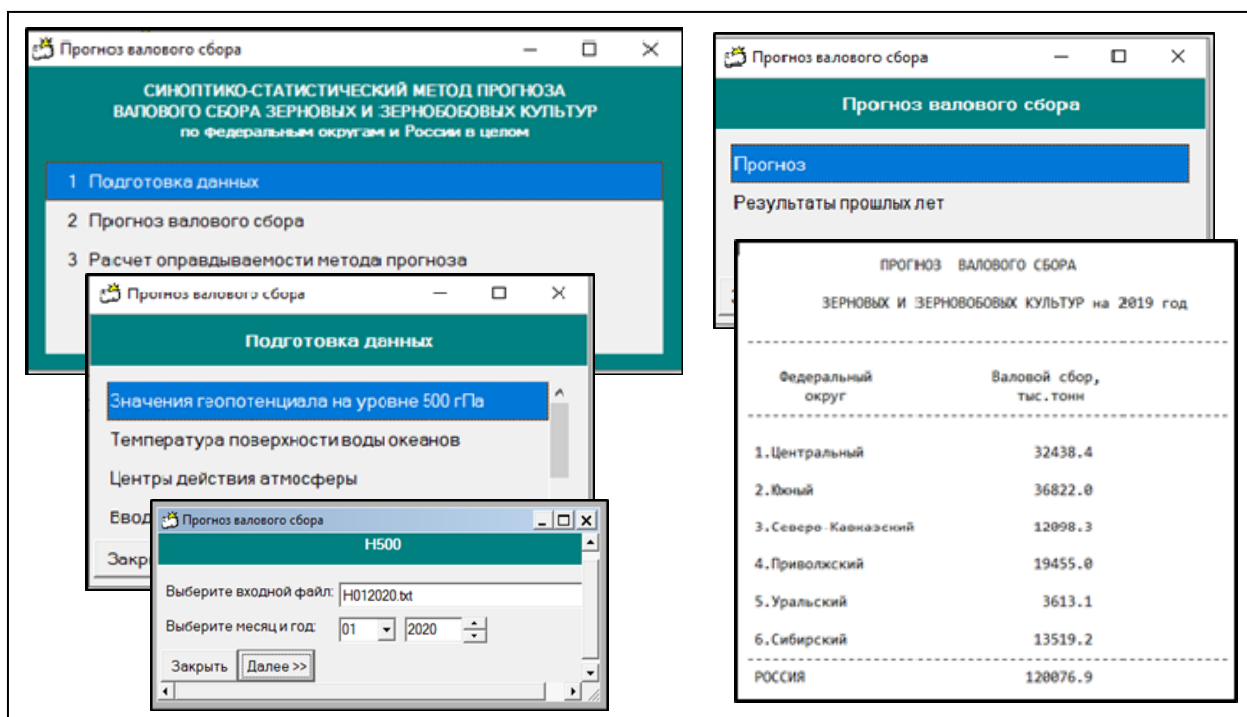


Рис. 1. Основные меню пользовательского интерфейса и выходной файл.

Входными данными для прогноза ожидаемого валового сбора зерновых и зернобобовых культур по федеральным округам и России в целом являются:

- температура поверхности воды Тихого и Атлантического океанов с шагом $1 \times 1^\circ$: ftp://ftp.emc.ncep.noaa.gov/cmb/sst/oimonth_v2/ASCII_UPDATE/;
- значения геопотенциала на уровне 500 гПа в узлах с шагом $5 \times 5^\circ$: Гидрометцентр России, отдел систем информационного обеспечения;
- центры действия атмосферы (широта, долгота, интенсивность): Гидрометцентр России, лаборатория статистического анализа метеорологических полей;
- данные РОССТАТ о валовых сборах зерновых и зернобобовых культур (предварительные данные).

Результаты испытаний метода прогноза

Авторские испытания метода прогноза валового сбора зерновых культур проводились на данных 2012–2015 гг., а производственные испытания проводились в ФГБУ «Гидрометцентр России» в течение трех лет с 2016 по 2019 год.

Оценка качества метода осуществлялась согласно Методических указаний [13]. Оценка успешности агрометеорологических прогнозов проводилась на материалах независимой выборки с помощью двух критериев: оправдываемости метода (γ) и средней относительной

ошибки оправдавшихся прогнозов (\bar{P}). Оправдываемость метода является выраженным в процентах отношением числа оправдавшихся прогнозов к числу всех прогнозов, по данному методу. Оправдываемость метода (γ) должна быть выше оправдываемости инерционного и климатологического методов прогноза при одной и той же допустимой ошибке, или ошибка метода (\bar{P}) должна быть меньше при одной и той же оправдываемости. При заблаговременности свыше четырех месяцев прогноз считается оправдавшимся, если его ошибка не превышает сигму (σ). Испытываемый метод рекомендуется к внедрению в оперативную работу, если не менее 70 % пунктов исследуемой территории имеют показатели «оправдываемость» и «ошибка» метода выше аналогичных показателей инерционного и климатологического прогнозов. Выводы о приемлемости метода для оперативной работы делаются на основании испытаний в течение 5–8 лет, из них авторские испытания в течение 3–5 лет и производственные испытания в течение 2–3 лет.

При оценке оправдываемости метода по Методическим указаниям [13] во всех федеральных округах и по России в целом оправдываемость и относительная ошибка оправдавшихся прогнозов синоптико-статистического метода прогноза валового сбора зерновых и зернобобовых культур оказались выше, чем у инерционного и климатологического методов прогноза (табл. 1). Так, по Российской Федерации в целом, в Северо-Кавказском, Уральском, Сибирском федеральных округах оправдываемость была выше (100 %), чем инерционного и климатологического методов прогноза (87,5–37,5 %). В Центральном и Южном федеральных округах оправдываемость испытываемого метода оказалась равной оправдываемости инерционного прогноза (100 и 75 % соответственно), но при этом ошибка оправдавшихся прогнозов испытываемого метода значительно меньше, чем инерционного. В Приволжском федеральном округе оправдываемость всех прогнозов оказалась равной 87,5 %, но относительная ошибка испытываемого метода также значительно меньше, чем инерционного и климатологического методов.

Оправдываемость испытываемого метода по территории составляет 100 %.

Оценка оправдываемости прогнозов в оперативной работе проводится в соответствии с «Инструкцией по оценке оправдываемости агрометеорологических прогнозов» [1]. Качество прогнозов оценивается по балльной шкале: оправдываемость 91 % и более – 5 баллов; 90–81 % – 4 балла; 80–70 % – 3 балла; менее 70 % – 0 баллов.

В период производственных испытаний на независимом материале был составлен 21 прогноз. При оценке оправдываемости прогнозов по «Инструкции...», в 2017 году прогноз не оправдался в одном округе (Приволжский федеральный округ), оправдываемость прогноза составила 67,4 %. При этом в остальных пяти округах и по России в целом прогноз оправдался. Средняя оправдываемость прогнозов по шести федеральным округам в 2017

году составила 83 %. В 2018–2019 гг. прогнозы оправдались в 100 % случаев, средняя оправдываемость составила 88–89 %. За три года испытаний оправдываемость прогнозов по России в целом составила 87,3–99,8 %. Средняя за три года относительная ошибка прогнозов валового сбора зерновых и зернобобовых культур в целом по Российской Федерации составила 6 % (табл. 2).

Таблица 1

**Результаты авторских (2012–2016 гг.) и производственных (2017–2019 гг.)
испытаний метода прогноза валового сбора зерновых и зернобобовых культур
по федеральным округам и России в целом**

Субъект Российской Федерации	Метод прогноза урожайности					
	испытываемый		инерционный		климатологический	
	Оправдыва- емость, %	Ошибка, %	Оправдыва- емость, %	Ошибка, %	Оправдыва- емость, %	Ошибка, %
Российская Федерация	100	6,7	62,5	9,9	50	8,3
1. Центральный ФО	100	6,2	100	12,7	50	12,2
2. Южный ФО	75	9,2	75	14,8	50	8,8
3. Северо-Кавказский ФО	100	9,3	75	8,6	37,5	5,8
4. Приволжский ФО	87,5	13,3	87,5	21,1	87,6	17,0
5. Уральский ФО	100	18,9	87,5	13,2	75	8,2
6. Сибирский ФО	100	7,7	75	7,6	87,5	8,7

100

Таблица 2

**Результаты производственных испытаний метода долгосрочного прогноза
валового сбора зерновых и зернобобовых культур
по федеральным округам и России в целом**

Субъект Российской Федерации	Относительная ошибка прогноза, %		
	2017 год	2018 год	2019 год
Российская Федерация	87,3	90,0	99,8
1. Центральный ФО	97,5	86,5	96,2
2. Южный ФО	76,1	81,3	89,2
3. Северо-Кавказский ФО	91,3	98,1	93,9
4. Приволжский ФО	67,4	97,3	86,6
5. Уральский ФО	77,5	74,3	70,8
6. Сибирский ФО	85,6	97,7	92,2
Средняя оправдываемость прогнозов по территории, %:	82,6	89,2	88,2

Рекомендации о внедрении

Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 18 сентября 2020 г. метод долгосрочного прогноза валового сбора зерновых и зернобобовых культур по федеральным округам и России в целом (составляется в феврале) рекомендован к внедрению в оперативную практику отдела агрометеорологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» при составлении основного прогноза (в июне) в качестве вспомогательного расчетного метода.

Список литературы

1. Инструкция по оценке оправдываемости агрометеорологических прогнозов. – М.: Гидрометеоздат, 1983. – 7 с.
2. *Лебедева В.М.* Прогноз урожайности яровой пшеницы до сева по территории Восточно-Сибирского экономического района // Труды «ВНИИСХМ». – 2000. – Вып. 32. – С. 150–159.
3. *Лебедева В.М.* Метод долгосрочного прогноза теплообеспеченности вегетационного периода // Метеорология и гидрология. – 2005. – № 9. – С. 93–99.
4. *Лебедева В.М.* Долгосрочный синоптико-статистический метод прогноза валового сбора зерновых культур по федеральным округам и России в целом // Труды ГУ «ВНИИСХМ». – 2010. – Вып. 37. – С. 69–81.
5. *Лебедева В.М., Страшная А.И.* Основы сельскохозяйственной метеорологии: Учебное пособие. Том II. Методы расчетов и прогнозов в агрометеорологии. Книга 2. Оперативное агрометеорологическое прогнозирование. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. – 216 с.
6. *Лебедева В.М., Чуб О.В.* Результаты испытания метода долгосрочного прогноза урожайности зерновых и зернобобовых культур по федеральным округам и России в целом в ФГБУ «Гидрометцентр России» // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2014. – Информационный сборник № 41. – С. 136–150.
7. *Лебедева В.М., Чуб О.В.* Результаты испытания метода долгосрочного прогноза урожайности яровой пшеницы по федеральным округам и России в целом // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2018. – Информационный сборник № 45. – С. 136–142.
8. *Мещерская А.В., Руховец Л.В., Юдин М.И., Яковлева Н.И.* Естественные составляющие метеорологических полей. – Л.: Гидрометеоздат, 1970. – 200 с.

9. *Пасов В.М.* Изменчивость урожаев и оценка ожидаемой продуктивности зерновых культур. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 107 с.
10. *Пасов В.М., Аксарина Е.А., Зинченко В.П.* Методические указания по составлению прогноза урожайности яровой пшеницы до сева в основных районах ее возделывания. – М.: Гидрометеоиздат, 1985. – 39 с.
11. *Пасов В.М., Аксарина Е.А., Лебедева В.М.* Особенности циркуляции атмосферы в годы с различной урожайностью кукурузы в США // Труды ВНИИСХМ. – 1991. – Вып. 28. – С. 62–81.
12. Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 320 с.
13. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. – М.: Госкомгидромет, 1991. – С. 98–107.
14. *Русакова Т.И., Лебедева В.М., Грингоф И.Г., Шкляева Н.М.* Современная технология поэтапного прогнозирования урожайности и валового сбора зерновых культур // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 7. – С. 101–108.
15. *Чирков Ю.И., Пестерева Н.М.* Использование ресурсов климата и погоды в рисоводстве. – Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 160 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ СОСТАВЛЕНИЯ ОЦЕНОК УСЛОВИЙ ВЕГЕТАЦИИ И ПРОГНОЗА УРОЖАЙНОСТИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ ПО СУБЪЕКТАМ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

¹*Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии, г. Обнинск;*

²*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации*

В ФГБУ «ВНИИСХМ» в рамках научной тематики в 2014–2016 гг. на основе прикладной динамико-статистической модели формирования урожая «погода – урожай» [4–6] был усовершенствован метод оценки условий вегетации и прогноза урожайности озимой пшеницы по субъектам Российской Федерации с учетом современных уровней урожайности (автор метода – Т.А. Гончарова).

103

Разработанный в 1999–2000 гг. метод прогноза урожайности озимой пшеницы [8, 11] нуждался в существенной переработке, связанной с переходом официальной статистики к рядам урожайности с уборочной площади (а не с посевной, как было ранее), внедрением в сельское хозяйство современных сортов и технологий возделывания озимой пшеницы, при этом расчет динамики формирования урожая начинается в апреле с момента возобновления вегетации озимой пшеницы, без учета осадков осенне-зимнего периода.

Работа по усовершенствованию ранее разработанного метода прогноза урожайности озимой пшеницы в 2014–2016 гг. заключалась в следующем:

- 1) замена исходных рядов урожайности озимой пшеницы с посевной площади на ряды урожайности с уборочной площади (официальная статистика в настоящее время);
- 2) подбор нового тренда, в должной мере учитывающего достигнутые за последние годы уровни урожайности озимой пшеницы по каждому субъекту;
- 3) корректировка температурных и влажностных кривых динамико-статистической модели, чтобы сделать их менее чувствительными к осадкам и температуре воздуха, так как новые сорта более жаростойкие и засухоустойчивы;

4) определение нового значения биомассы репродуктивных органов при средних многолетних агрометеорологических условиях;

5) проведение корректировки начального значения интенсивности фотосинтеза с учетом условий увлажнения осеннего (сентябрь – ноябрь) и зимнего (декабрь – март) периодов.

Динамико-статистический метод прогноза урожайности озимой пшеницы основан на сочетании двух прогнозов: прогноза тенденции урожайности с помощью метода гармонических весов [7] и оценки отклонений урожайности от тенденции, выполняемых с помощью усовершенствованной модели продукционного процесса озимой пшеницы [1, 2, 5, 9].

Прогноз урожайности озимой пшеницы составляется 21 мая и уточняется 21 июня, в установленные Росгидрометом сроки.

Подсистема оценки условий вегетации и прогноза урожайности озимой пшеницы в составе информационно-прогностической системы

Для внедрения метода в Гидрометцентре России в существующей информационно-прогностической системе (ИПС) создана подсистема оценки условий вегетации и прогноза урожайности озимой пшеницы по 44 субъектам Российской Федерации.

104

В программах, реализующих расчет агрометеорологических оценок и прогнозов, используются данные, хранящиеся в двух источниках:

- непосредственно в самих программах;
- в базе оперативных данных.

В программу расчета включены средние многолетние данные вегетационного периода по субъекту Российской Федерации: средняя декадная температура воздуха, сумма осадков за декады, густота стояния растений на первое определение, даты фаз развития культуры и т. д. (т. е. все то, что необходимо для настройки и работы модели озимой пшеницы в определенных почвенно-климатических условиях конкретного субъекта).

Из базы оперативных данных используются данные:

а) текущего года:

– декадные данные по субъекту, появляющиеся в базе данных в результате обработки и осреднения данных декадных телеграмм по станциям;

– оперативные статистические данные по субъекту Российской Федерации о размерах посевных площадей, занятых сельскохозяйственными культурами в текущем сельскохозяйственном году;

б) ряды урожайности с 1971 года по год прогноза.

Эти данные заносятся в оперативную базу данных с электронных источников РОССТАТ или вводятся вручную. Данные о посевных площадях необходимы для расчета ожидаемого валового сбора в прогнозируемом году по территории конкретного субъекта Российской Федерации и расчета прогноза урожайности по федеральным округам и России в целом.

На рис. 1 показаны основные меню ИПС, с помощью которых осуществляется расчет прогнозируемой урожайности озимой пшеницы.

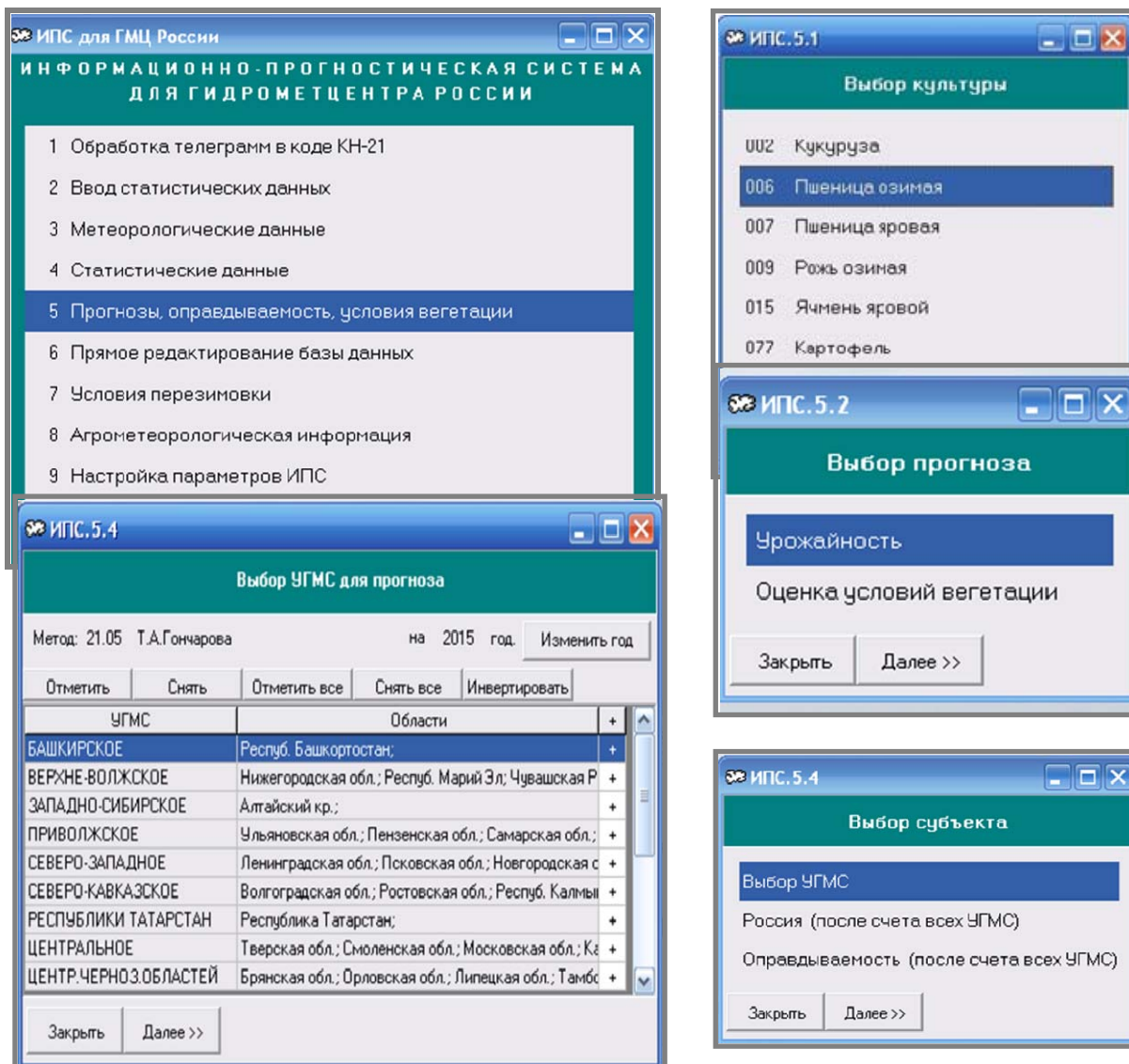


Рис. 1. Меню ИПС, используемые для расчета прогнозируемой урожайности озимой пшеницы.

Примеры выходных файлов подсистемы прогноза озимой пшеницы по субъектам Российской Федерации и с расчетом оправдываемости составленных оперативных прогнозов приведены на рис. 2 и 3.

Прогноз урожайности в расчете с уборочной площади на 21.05.2019					
Культура - Пшеница озимая					
Автор(ы) метода: Т.А.Гончарова					
Федеральный округ, субъект Российской Федерации	Тенденция урожайности, ц/га	Оценка условий вегетации, %	Прогноз урожайности ц/га	Уборочная площадь, тыс. га	Валовой сбор, тыс. тонн
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ					
Белгородская область	45,3	90,9	41,20	388,50	1 600,91
Брянская область	30,0	130,0	39,00	125,60	489,84
Владимирская область	25,0	76,0	19,00	27,50	52,28
Воронежская область	35,0	107,4	37,60	748,10	2 812,81
Ивановская область	25,0	87,1	21,80	16,40	35,71
Калужская область	24,0	92,2	22,10	29,50	65,28
Костромская область	18,0	87,5	15,80	0,70	1,10
Курская область	46,5	104,3	48,50	454,40	2 204,96
Липецкая область	35,3	106,1	37,50	362,70	1 358,52
Московская область	29,0	98,3	28,50	77,90	222,14
Орловская область	41,6	89,3	37,20	436,20	1 621,24
Рязанская область	30,0	86,9	26,10	312,50	814,45
Смоленская область	25,0	89,9	22,50	38,90	87,38
Тамбовская область	36,0	99,2	35,70	455,10	1 625,97
Тверская область	25,0	76,4	19,10	4,10	7,83
Тульская область	28,0	95,9	26,90	300,30	806,54
Ярославская область	24,0	96,1	23,10	5,90	13,61
			36,5	3 784,30	13 823,39
СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ					
Калининградская область	46,1	95,7	44,10	73,60	324,68
Ленинградская область	33,9	94,1	32,00	5,70	18,21
Новгородская область	34,7	83,3	28,90	4,90	14,18
Псковская область	24,8	145,6	36,10	18,10	65,38
			41,3	102,30	422,32

Рис. 2. Пример файла с результатами расчета ожидаемой урожайности озимой пшеницы по субъектам Российской Федерации и федеральным округам.

106

Оправдываемость метода прогноза урожайности на 21.06.2017				
Культура - Пшеница озимая				
Автор(ы) метода: Т.А.Гончарова				
Субъект Российской Федерации	Прогноз урожайности, ц/га	Фактическая урожайность, ц/га	Относительная ошибка, %	Оправдываемость прогноза, %
Ленинградская обл.	40,8	34,3	19,0	81,0
Псковская обл.	31,7	26,8	18,3	81,7
Новгородская обл.	24,5	24,4	0,4	99,6
Тверская обл.	21,1	19,0	11,1	88,9
Смоленская обл.	29,7	30,7	3,3	96,7
Калининградская обл.	40,0	43,5	8,0	92,0
Московская обл.	34,8	33,2	4,8	95,2
Брянская обл.	38,4	42,7	10,1	89,9
Орловская обл.	36,4	43,9	17,1	82,9
Липецкая обл.	44,0	44,9	2,0	98,0
Тамбовская обл.	37,6	44,9	16,3	83,7
Курская обл.	36,1	53,3	32,3	67,7
Белгородская обл.	52,3	52,4	0,2	99,8
Воронежская обл.	38,8	45,6	14,9	85,1
Калужская обл.	27,6	26,5	4,2	95,8
Тульская обл.	33,6	37,2	9,7	90,3
Ярославская обл.	27,0	23,0	17,4	82,6
Рязанская обл.	34,8	41,7	16,5	83,5
Владимирская обл.	28,1	33,4	15,9	84,1
Костромская обл.	14,9	20,8	28,4	71,6
Ивановская обл.	27,3	24,5	11,4	88,6
Нижегородская обл.	23,7	29,8	20,5	79,5
Респуб. Марий Эл	20,3	23,3	12,9	87,1
Чувашская Респуб.	24,8	28,6	13,3	86,7
Республика Мордовия	24,4	35,3	30,9	69,1
Республика Татарстан	28,1	36,7	23,4	76,6
Ульяновская обл.	24,3	32,2	24,5	75,5
Пензенская обл.	29,5	41,5	28,9	71,1

Рис. 3. Пример файла с результатами расчета оправдываемости метода прогноза урожайности озимой пшеницы.

Для внедрения разработанного метода в УГМС и ЦГМС Росгидромета создан программный комплекс, простой пользовательский интерфейс которого позволяет отредактировать входные данные, составить прогноз урожайности (рис. 4) и оценить оправдываемость метода прогноза в автоматизированном режиме.

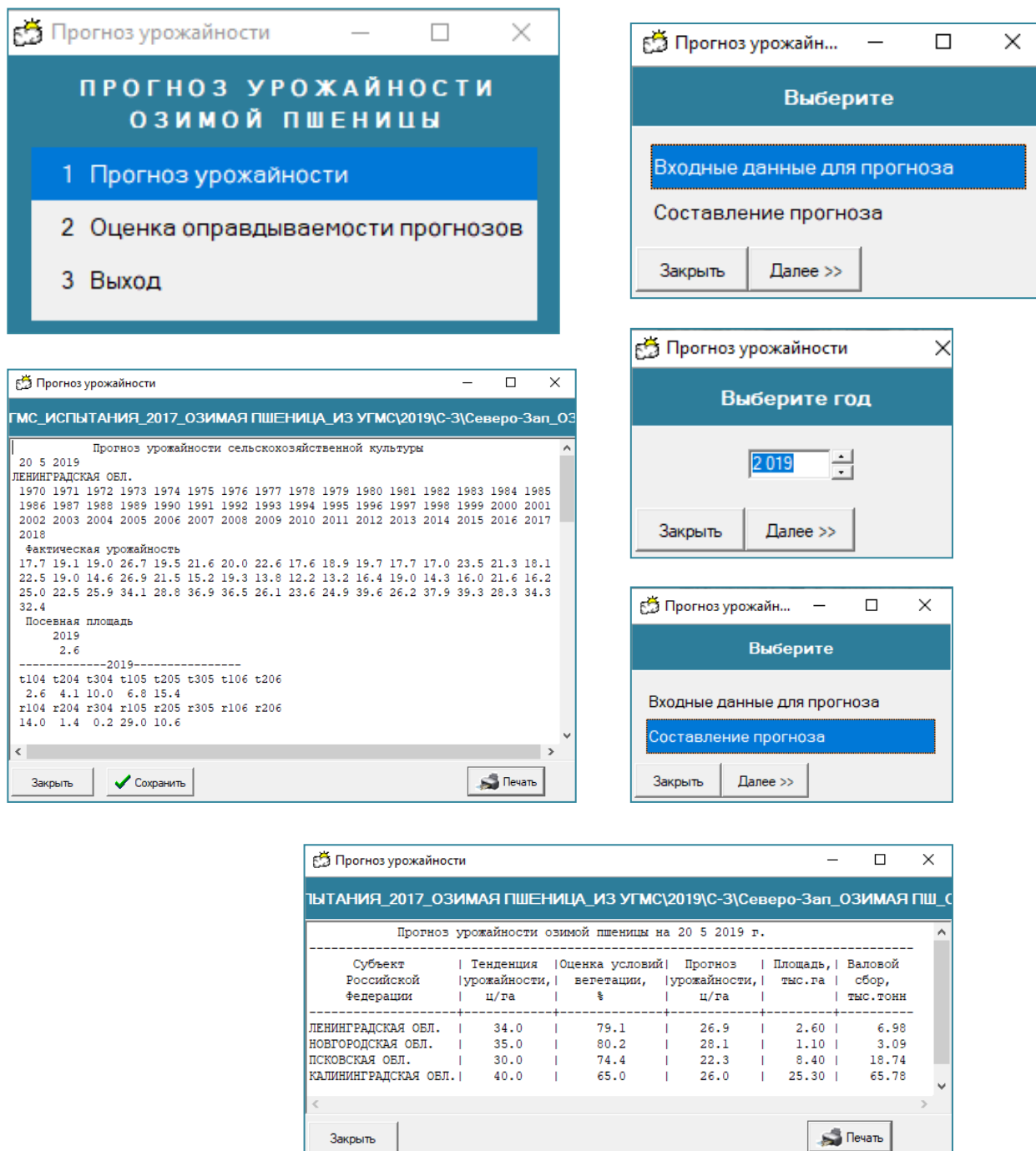


Рис. 4. Основные меню программного комплекса для расчета прогноза урожайности в УГМС и ЦГМС.

**Испытания автоматизированной технологии составления оценки
условий вегетации и прогноза урожайности озимой пшеницы
в ФГБУ «Гидрометцентр России»**

В ФГБУ «Гидрометцентр России» в ИПС в 2016 г. была установлена подсистема оценки условий вегетации и прогноза урожайности озимой пшеницы по субъектам Российской Федерации. Производственные испытания метода прогноза проводились в течение трех лет с 2017 по 2019 год.

В ИПС ежедекадно осуществляется обработка декадных агрометеорологических телеграмм, поступающих с сети гидрометеорологических станций, и в период испытаний метода в установленные «Планом выпуска основных агрометеорологических прогнозов и докладов на 2016–2020 годы» Росгидромета проводились расчеты ожидаемой урожайности озимой пшеницы по 44 субъектам Российской Федерации.

Согласно Методическим указаниям [10] оценка успешности агрометеорологических прогнозов проводилась на материалах независимой выборки с помощью двух критериев: оправдываемости метода и относительной ошибки оправдавшихся прогнозов за период авторских и производственных наблюдений.

В табл. 1 и 2 приведены результаты оправдываемости динамико-статистического метода прогноза урожайности озимой пшеницы по данным авторских (2012–2016 гг.) и производственных (2017–2019 гг.) испытаний для двух сроков прогноза (21 мая, 21 июня). Для сравнения здесь же приведены результаты оправдываемости прогнозов урожайности озимой пшеницы, рассчитанные с помощью инерционного и климатологического методов прогноза.

Таблица 1

**Результаты авторских (2012–2016 гг.) и производственных (2017–2019 гг.) испытаний
динамико-статистического метода прогноза урожайности зимой пшеницы
для первого срока прогноза, 21 мая**

Субъект Российской Федерации	Метод прогноза					
	испытываемый		инерционный		климатологический	
	Оправдыва- емость, %	Ошибка, %	Оправдыва- емость, %	Ошибка, %	Оправдыва- емость, %	Ошибка, %
1. Ленинградская обл.	87,5	9,8	37,5	9,4	62,5	9,3
2. Новгородская обл.	100	7,1	37,	7,4	37,5	7,9
3. Псковская обл.	62,5	5,2	25	8,2	0	–
4. Калининградская обл.	75	8,8	37,5	9,8	62,5	7,0
5. Тверская обл.	87,5	8,6	50	7,4	62,5	9,4
6. Смоленская обл.	75	8,0	50	4,2	37,5	7,7
7. Московская обл.	100	5,2	75	6,9	50	6,2
8. Калужская обл.	75	6,8	25	2,9	37,5	5,5

Субъект Российской Федерации	Метод прогноза					
	испытываемый		инерционный		климатологический	
	Оправдыва- емость, %	Ошибка, %	Оправдыва- емость, %	Ошибка, %	Оправдыва- емость, %	Ошибка, %
9. Тульская обл.	75	6,9	50	10,8	37,5	7,4
10. Ярославская обл.	87,5	4,2	87,5	6,4	75	5,6
11. Рязанская обл.	62,5	6,4	50	4,1	25	3,6
12. Владимирская обл.	75	4,8	50	6,6	50	9,0
13. Костромская обл.	75	9,4	50	8,7	50	6,9
14. Ивановская обл.	50	3,3	50	2,3	50	2,8
15. Нижегородская обл.	87,5	9,1	75	18,2	75	12,2
16. Республ. Марий Эл	75	8,3	62,5	10,6	50	11,3
17. Чувашская Республика	87,5	8,8	75	12,7	62,5	10,2
18. Республика Мордовия	75	2,5	37,5	16,1	50	7,9
19. Брянская обл.	62,5	2,5	50	5,3	37,5	3,3
20. Орловская обл.	62,5	1,7	25	4,4	62,5	7,0
21. Липецкая обл.	50	4,9	62,5	7,6	37,5	12,3
22. Тамбовская обл.	87,5	5,5	37,5	7,9	50	11,4
23. Курская обл.	75	3,3	25	8,6	50	7,1
24. Белгородская обл.	62,5	5,8	50	12,4	62,5	6,1
25. Воронежская обл.	87,5	4,8	37,5	5,5	62,5	4,1
26. Ульяновская обл.	87,5	8,2	37,5	20,7	37,5	8,1
27. Пензенская обл.	75	3,4	37,5	16,2	25	7,8
28. Самарская обл.	75	6,9	25	20,4	25	2,0
29. Саратовская обл.	87,5	4,2	37,5	18,2	37,5	12,3
30. Оренбургская обл.	100	11,2	25	5,2	37,5	12,6
31. Республика Башкортостан	100	11,7	75	15,2,2	62,5	14,6
32. Республика Татарстан	87,5	10,5	62,5	15,3	75	10,4
33. Республика Калмыкия	87,5	6,0	75	9,8	50	9,8
34. Астраханская обл.	62,5	11,6	37,5	11,1	37,5	5,3
35. Волгоградская обл.	87,5	9,5	75	11,0	62,5	7,1
36. Краснодарский край	75	5,6	75	6,4	37,5	3,8
37. Ставропольский край	75	5,8	62,5	6,8	25	4,8
38. Ростовская обл.	75	7,2	62,5	9,8	50	13,6
39. Республика Адыгея	75	5,2	75	8,8	50	6,9
40. Республика Дагестан	87,5	4,3	62,5	4,7	62,5	10,8
41. Кабардино-Балкарская Республика	75	6,5	50	3,4	75	9,5
42. Карачаево-Черкесская Республика	87,5	5,5	62,5	2,3	25	10,1
43. Республика Северная Осетия	87,5	5,6	62,5	10,3	50	7,2
44. Алтайский край	75	4,6	62,5	10,0	62,5	12,3
Оправдываемость по территории, %	97,7					

**Результаты авторских (2012–2016 гг.) и производственных (2017–2019 гг.) испытаний
динамико-статистического метода прогноза урожайности зимой пшеницы
для второго срока прогноза, 21 июня**

Субъект Российской Федерации	Метод прогноза					
	испытываемый		инерционный		климатологический	
	Оправдыва- емость, %	Ошибка, %	Оправдыва- емость, %	Ошибка, %	Оправдыва- емость, %	Ошибка, %
1. Ленинградская обл.	75	8,6	25	4,8	62,5	9,3
2. Новгородская обл.	100	7,6	37,5	7,4	37,5	7,9
3. Псковская обл.	62,5	5,2	12,5	6,9	0	–
4. Калининградская обл.	75	7,9	37,5	9,8	62,5	7,0
5. Тверская обл.	87,5	8,2	50	7,4	62,5	9,4
6. Смоленская обл.	62,5	7,1	50	4,2	25	6,2
7. Московская обл.	87,5	5,1	62,5	6,3	50	6,2
8. Калужская обл.	75	6,9	25	2,9	37,5	5,5
9. Тульская обл.	75	6,8	25	6,9	37,5	7,4
10. Ярославская обл.	87,5	4,2	87,5	6,4	75	5,6
11. Рязанская обл.	62,5	6,6	50	4,1	25	3,6
12. Владимирская обл.	75	4,7	37,5	4,2	37,5	6,0
13. Костромская обл.	75	9,4	50	8,7	50	6,9
14. Ивановская обл.	50	3,0	50	2,3	37,5	1,8
15. Нижегородская обл.	75	7,7	50	16,2	75	12,2
16. Республ. Марий Эл	75	8,5	62,5	10,6	37,5	7,9
17. Чувашская Республика	75	6,8	62,5	9,9	62,5	10,2
18. Республика Мордовия	75	2,5	25	14,3	50	7,9
19. Брянская обл.	62,5	2,5	37,5	4,2	37,5	3,3
20. Орловская обл.	62,5	1,6	25	4,4	62,5	7,0
21. Липецкая обл.	50	5,0	62,5	7,6	37,5	12,3
22. Тамбовская обл.	87,5	5,0	37,5	7,9	37,5	9,2
23. Курская обл.	62,5	3,7	25	8,6	37,5	4,9
24. Белгородская обл.	62,5	6,0	25	7,9	62,5	6,1
25. Воронежская обл.	87,5	4,7	37,5	5,5	62,5	4,1
26. Ульяновская обл.	75	5,3	25	18,3	37,5	8,1
27. Пензенская обл.	75	3,5	25	14,3	25	7,8
28. Самарская обл.	75	6,9	0	-	25	2,0
29. Саратовская обл.	87,5	4,4	25	13,9	37,5	12,3
30. Оренбургская обл.	87,5	8,2	25	5,2	25	7,1
31. Республика Башкортостан	87,5	10,3	62,5	12,7	62,5	14,6
32. Республика Татарстан	87,5	10,7	50	12,1	62,	5,6
33. Республика Калмыкия	75	4,5	62,5	7,5	37,5	5,9
34. Астраханская обл.	62,5	12,2	25	5,4	37,5	5,3
35. Волгоградская обл.	87,5	9,7	62,5	8,6	62,5	7,1
36. Краснодарский край	75	6,0	75	6,4	25	1,5
37. Ставропольский край	75	5,5	37,5	4,0	25	4,8
38. Ростовская обл.	75	7,0	25	1,8	50	13,6

Субъект Российской Федерации	Метод прогноза					
	испытываемый		инерционный		климатологический	
	Оправдываемость, %	Ошибка, %	Оправдываемость, %	Ошибка, %	Оправдываемость, %	Ошибка, %
39. Республика Адыгея	62,5	3,8	62,5	7,1	37,5	3,8
40. Республика Дагестан	77	3,5	50	3,0	25	9,3
41. Кабардино-Балкарская Республика	75	6,9	50	3,4	50	8,5
42. Карачаево-Черкесская Республика	75	5,0	62,5	2,3	12,5	8,6
43. Республика Северная Осетия	87,7	6,2	37,5	7,6	37,5	3,5
44. Алтайский край	75	5,0	50	7,9	50	10,1
Оправдываемость по территории, %	97,7					

При оценке метода по Методическим указаниям [10], во второй срок составления прогноза оправдываемость для 42 областей была выше оправдываемости инерционного и климатологического метода (62,5–100 %). По двум областям (Ивановской и Липецкой) оправдываемость испытываемого, инерционного и климатологического методов оказалась низкой для двух сроков прогноза и составила от 37,5 до 50 %.

При оценке оправдываемости прогнозов за трехлетний период производственных испытаний (2017–2019 гг.) в соответствии с Инструкцией [3], в первый год производственных испытаний в целом по территории Российской Федерации по двум срокам прогноза в 2017 г. прогноз не оправдался по 5 и 4 субъектам соответственно. Оправдываемость по территории составила 89–91 %. В 2018 г. в первый срок составления прогноза не оправдался по 9 субъектам, оправдываемость по территории составила 80 %. Во второй срок прогноз не оправдался по 10 субъектам, оправдываемость по территории составила 75 %. В 2019 г. в целом по территории Российской Федерации по двум срокам прогноза не оправдался по десяти субъектам, оправдываемость по территории составила 77 % (табл. 3).

Таблица 3

**Оправдываемость прогнозов урожайности озимой пшеницы
по субъектам Российской Федерации в период производственных испытаний
в Гидрометцентре России в 2017–2019 гг.**

Субъект Российской Федерации	Оправдываемость прогноза					
	2017 год		2018 год		2019 год	
	21 мая	21 июня	21 мая	21 июня	21 мая	21 июня
1. Ленинградская обл.	81,0	81,0	88,0	87,7	70,2	70,2
2. Новгородская обл.	99,6	99,6	78,6	76,4	95,4	95,0
3. Псковская обл.	81,7	81,7	0,0	0,0	79,5	79,1

4. Калининградская обл.	92,0	92,0	66,8	66,8	64,2	67,5
5. Тверская обл.	88,9	88,9	87,7	87,7	66,6	66,2
6. Смоленская обл.	96,7	96,7	60,2	60,2	67,0	66,7
7. Московская обл.	95,2	95,2	91,4	89,7	90,8	91,2
8. Калужская обл.	95,8	95,8	59,6	59,6	70,8	70,8
9. Тульская обл.	90,3	90,3	71,5	71,5	79,4	79,1
10. Ярославская обл.	82,6	82,6	94,3	94,8	97,9	97,5
11. Рязанская обл.	83,5	83,5	86,8	86,8	80,6	80,2
12. Владимирская обл.	84,1	84,1	77,8	77,4	86,8	86,3
13. Костромская обл.	71,6	71,6	86,6	86,6	45,1	46,1
14. Ивановская обл.	88,6	88,6	87,6	87,2	90,1	89,7
15. Нижегородская обл.	79,5	79,5	78,2	76,5	82,1	82,1
16. Республ. Марий Эл	87,1	87,1	54,2	54,2	53,0	52,7
17. Чувашская Республика	86,7	86,7	78,5	78,1	78,9	78,1
18. Республика Мордовия	69,1	69,1	70,3	69,6	89,5	89,0
19. Брянская обл.	89,9	89,9	81,2	80,9	99,7	99,7
20. Орловская обл.	82,9	82,9	81,3	81,3	57,2	58,6
21. Липецкая обл.	80,2	80,2	66,4	67,6	70,3	70,3
22. Тамбовская обл.	83,7	83,7	97,5	99,7	86,3	86,6
23. Курская обл.	68,9	68	88,5	88,5	60,4	60,0
24. Белгородская обл.	71,8	70,6	76,0	75,8	80,9	80,7
25. Воронежская обл.	85,1	85,1	89,3	88,7	97,3	97,3
26. Ульяновская обл.	75,5	75,5	78,1	77,6	94,4	94,9
27. Пензенская обл.	71,3	71,1	40,8	40,8	97,4	97,0
28. Самарская обл.	69,7	69,5	95,7	94,9	17,1	17,1
29. Саратовская обл.	58,1	57,8	95,1	95,1	87,1	86,5
30. Оренбургская обл.	93,6	93,6	86,3	86,3	60,2	60,2
31. Республика Башкортостан	83,1	83,1	83,9	83,5	79,8	79,8
32. Республика Татарстан	76,8	76,6	85,8	85,8	86,7	86,4
33. Республика Калмыкия	86,5	86,5	65,4	65,0	98,3	98,7
34. Астраханская обл.	84,0	84,0	9,7	9,7	56,6	57,4
35. Волгоградская обл.	89,4	89,4	88,0	88,0	78,4	77,6
36. Краснодарский край	96,9	97,1	84,7	83,0	83,2	83,2
37. Ставропольский край	87,0	87,2	90,4	90,2	81,0	80,7
38. Ростовская обл.	81,3	81,3	74,7	73,1	98,3	98,3
39. Республика Адыгея	69,3	70,7	97,8	96,5	86,2	86,4
40. Республика Дагестан	90,5	91,3	95,3	95,3	100,0	98,5
41. Кабардино-Балкарская Республика	91,2	90,6	60,7	61,7	93,7	93,7
42. Карачаево-Черкесская Республика	97,1	97,1	89,8	87,7	80,8	80,8
43. Республика Северная Осетия	74,1	73,8	93,4	93,4	97,7	97,7
44. Алтайский край	72,3	72,8	81,0	80,7	99,6	99,6
Оправдываемость по территории, %	83,3	91	77,2	75,0	79,9	77,3

Рекомендации о внедрении

Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 18 сентября 2020 года автоматизированная технология составления прогнозов урожайности озимой пшеницы по 44 субъектам Российской Федерации рекомендована к внедрению в оперативную практику отдела агрометеорологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» в качестве основного расчетного метода. Авторам рекомендовано доработать метод прогноза урожайности озимой пшеницы по Калининградской, Ивановской, Липецкой, Смоленской и Самарской областям.

В 2017–2018 гг. методы прогноза урожайности озимой пшеницы успешно прошли испытания в Башкирском, Верхне-Волжском, Приволжском, Северо-Западном, Республики Татарстан, Центральном, Центрально-Черноземном УГМС. Решениями Технических советов семи УГМС метод был внедрен в оперативную практику в качестве основного метода прогноза для 30 субъектов Российской Федерации.

Список литературы

1. Гончарова Т.А., Найдина Т.А., Лебедева В.М., Богомолова Н.А. Результаты авторских и производственных испытаний в ФГБУ «Гидрометцентр России» автоматизированной технологии составления оценки условий вегетации и прогноза урожайности яровой пшеницы и картофеля по субъектам Российской Федерации // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2014. – Информационный сборник № 41. – С. 111–126.

2. Гончарова Т.А., Найдина Т.А., Лебедева В.М., Береза О.В. Результаты испытания метода оценки условий вегетации и прогноза урожайности кукурузы с использованием спутниковой и наземной информации по субъектам Российской Федерации // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2018 – Информационный сборник № 45 – С. 127–136.

3. Инструкция по оценке оправдываемости агрометеорологических прогнозов. – М.: Гидрометеоиздат, 1983. – 7 с.

4. Клеценко А.Д., Лебедева В.М., Найдина Т.А., Гончарова Т.А., Шкляева Н.М. Оперативное информационно-прогностическое обеспечение потребителей агрометеорологической продукции // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – 2015. – Вып. 179. – С. 33–43.

5. Лебедева В.М., Страшная А.И. Основы сельскохозяйственной метеорологии: Учебное пособие. Том II. Методы расчетов и прогнозов в агрометеорологии. Книга 2. Оперативное агрометеорологическое прогнозирование. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. – 216 с.

6. *Полевой А.Н.* Теория и расчет продуктивности сельскохозяйственных культур. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 175 с.

7. *Полевой А.Н.* Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 320 с.

8. *Полевой А.Н., Русакова Т.И. и др.* Прикладная динамическая модель формирования урожая сельскохозяйственных культур // Гидрометеорологическое обеспечение агропромышленного комплекса страны: Сб. докладов Всесоюзного совещания, Целиноград, сентябрь 1988 г. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – С. 15–31.

9. РД 52.33.810–2014. Порядок составления прогноза урожайности яровой пшеницы по субъектам Российской Федерации. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2014. – 20 с.

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

11. *Русакова Т.И.* Автоматизированная система оценки агрометеорологических условий вегетации и прогноза урожайности озимой ржи и пшеницы по территории субъектов Российской Федерации // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2006. – Информационный сборник № 32. – С. 58–64.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ СОСТАВЛЕНИЯ ОЦЕНКИ УСЛОВИЙ ВЕГЕТАЦИИ И ПРОГНОЗА УРОЖАЙНОСТИ ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ ПО СУБЪЕКТАМ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В ГИДРОМЕТЦЕНТРЕ РОССИИ

*¹Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной
метеорологии, г. Обнинск;*

²Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации

Автоматизированная технология составления оценки условий вегетации и прогноза урожайности сельскохозяйственных культур

Впервые метод прогноза урожайности ярового ячменя по субъектам Российской Федерации был разработан во ВНИИСХМ в 2000 году, реализован в среде MS-DOS и внедрен в Гидрометцентре России. С течением времени разработанные методы устаревают и нуждаются в доработке и адаптации к современным уровням урожайности.

В 2011–2013 гг. в ФГБУ «ВНИИСХМ» была проведена адаптация этого метода к современным уровням урожайности с использованием данных об урожайности с уборочной площади (предыдущие методики были разработаны с использованием данных об урожайности с посевной площади). Модернизированные методики прогноза урожайности были автоматизированы и создана подсистема оценки условий вегетации и прогноза урожайности ярового ячменя по 43 субъектам Европейской территории России в рамках ранее созданной информационно-прогностической системы (ИПС) [4, 12] (авторы – Т.А. Гончарова, Т.А. Найдина, В.М. Лебедева). В дальнейшем в 2014–2016 гг. аналогичная работа была проведена для Азиатской территории России по 17 субъектам (авторы – В.М. Лебедева, Т.А. Гончарова).

Метод оценки условий вегетации и прогноза урожайности ярового ячменя разработан на основе прикладной динамико-статистической модели формирования урожая «погода – урожай» [5–8]. В ФГБУ «ВНИИСХМ» такой подход использован для разработки метода прогноза урожайности целого ряда сельскохозяйственных культур: яровой пшеницы, озимой пшеницы, кукурузы, зерновых и зернобобовых культур в целом, картофеля. Указанные методы автоматизированы, прошли производственные испытания и в рамках ИПС

используются в оперативной работе отдела агрометеорологических прогнозов Гидрометцентра России [1, 2, 9].

Структура модели модифицирована под задачу оценки средних областных условий формирования урожая сельскохозяйственных культур. В модели описываются основные процессы жизнедеятельности растений (фотосинтез, дыхание, рост и распределение ассимилятов), учитывается влияние метеорологических факторов на формирование продуктивности посевов. Модель адаптирована к сокращенным объемам исходной информации [11].

Корректировка ранее разработанных методик заключалась:

1) в замене исходных рядов урожайности ярового ячменя с посевной площади на ряды урожайности с уборочной площади;

2) подборе нового тренда, в должной мере учитывающего достигнутые за последние годы уровни урожайности ярового ячменя, для каждого субъекта был выбран оптимальный вариант тренда;

3) корректировке температурных и влажностных кривых динамико-статистической модели, чтобы сделать их менее чувствительными к осадкам и температуре воздуха, так как новые сорта более жаростойкие и засухоустойчивые.

Адаптация метода прогноза урожайности ярового ячменя и автоматизация проводилась следующим образом: все программы были переведены в Visual Fortran, модифицированы, подключены к ИПС и затем была проведена проверка автоматизированных расчетов в ИПС.

Блок-схема автоматизированной технологии составления оценки условий вегетации и прогноза урожайности сельскохозяйственных культур в ИПС представлена на рис. 1.

База данных ИПС содержит оперативные агрометеорологические данные, полученные в результате обработки декадных телеграмм, а также данные РОССТАТ об урожайности, валовом сборе и посевных площадях сельскохозяйственных культур.

ИПС позволяет на базе одного ПК осуществлять обработку декадных телеграмм, ежедекадно получать оценку условий вегетационного периода и проводить расчеты ожидаемой урожайности сельскохозяйственных культур по единой методике одновременно по всем субъектам Российской Федерации в сроки, установленные «Планом выпуска основных агрометеорологических прогнозов и докладов» [2, 4, 5].

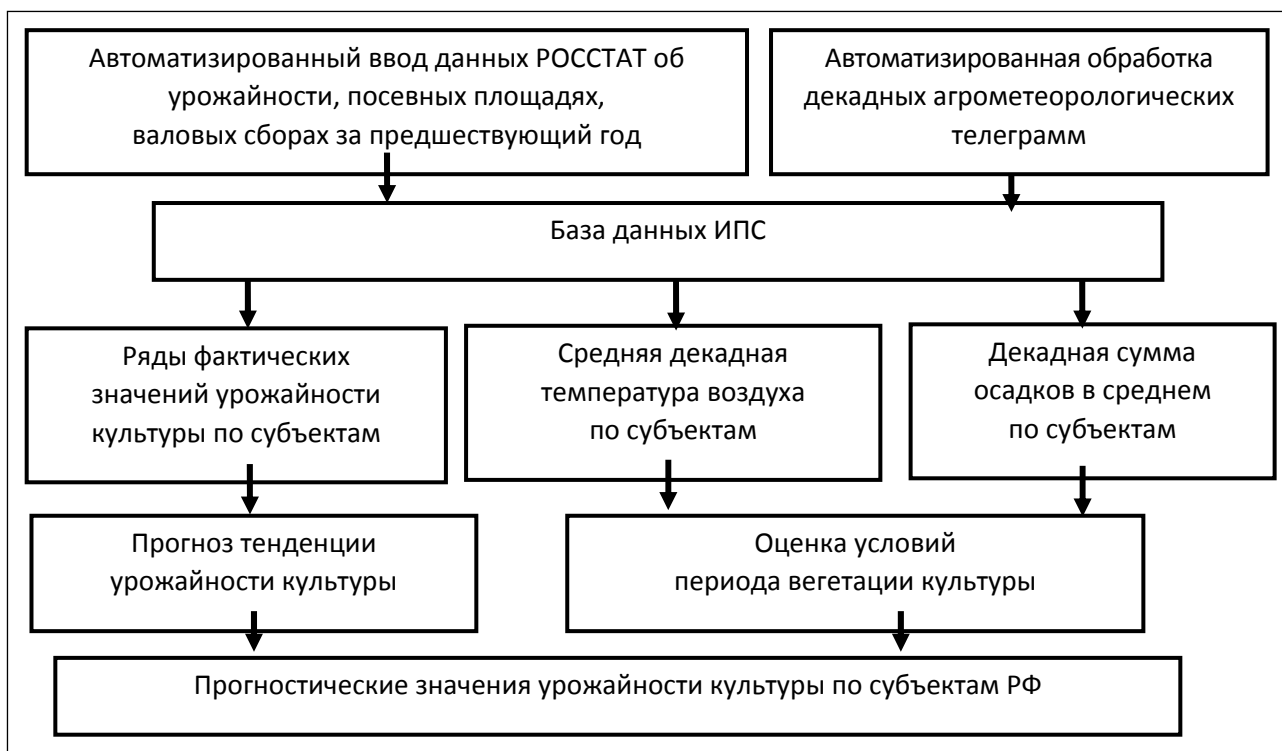


Рис. 1. Блок-схема автоматизированной технологии составления оценок условий вегетации и прогноза урожайности сельскохозяйственных культур.

В ИПС, после получения фактических данных об урожайности культуры за прогнозируемый год и внесения их в базу данных, можно оценить оправдываемость составленных прогнозов в соответствии с действующей Инструкцией по оценке оправдываемости оперативных агрометеорологических прогнозов [3]. Критерием оценки оправдываемости оперативных прогнозов урожайности является относительная ошибка (Р, %) – частное от деления абсолютной разности между фактической и прогнозируемой урожайностью на фактическую урожайность, выраженное в процентах. Оправдываемость прогнозов (%) рассчитывается по формуле $(100 \% - P)$.

Результаты испытаний автоматизированной технологии составления оценки условий вегетации и прогноза урожайности ярового ячменя по субъектам Российской Федерации в ФГБУ «Гидрометцентр России»

Производственные испытания метода проводились в ФГБУ «Гидрометцентр России» в рамках ИПС в течение шести лет: в 2014–2016 гг. были проведены испытания метода прогноза ярового ячменя по 43 субъектам Европейской территории России, а в период с 2017 по 2019 год – для 17 субъектов Азиатской территории России. Прогнозы урожайности

ярового ячменя составляются в вегетационный период с различной заблаговременностью до созревания: за два месяца – 21 июня, за один месяц – 21 июля.

Согласно Методическим указаниям [10], оценка успешности агрометеорологических прогнозов проводилась на материалах независимой выборки с помощью двух критериев: оправдываемости метода и ошибки оправдавшихся прогнозов.

Оправдываемость метода – отношение числа оправдавшихся прогнозов к общему числу составленных прогнозов по методу, выраженное в процентах. Критерий оправдываемости прогноза – абсолютная ошибка прогноза, не превышающая $0,8\sigma$ (для первого срока прогноза) и $0,67\sigma$ (для второго срока прогноза) ряда урожайности за последние 15 лет, включая год прогноза. Ошибка метода – среднее арифметическое значение относительных ошибок (%) оправдавшихся прогнозов. Относительная ошибка оправдавшихся прогнозов рассчитывается как частное от деления абсолютной разности фактического урожая и прогнозируемого на среднее арифметическое значение фактического урожая за последние пять лет, выраженное в процентах. Испытываемый метод рекомендуется к внедрению в оперативную работу, если не менее 70 % пунктов исследуемой территории имеют показатели «оправдываемость» и «ошибка» метода выше аналогичных показателей инерционного и климатологического прогнозов. Выводы о приемлемости метода для оперативной работы делаются на основании испытаний в течение 5–8 лет, из них авторские испытания в течение 3–5 лет и производственные испытания в течение 2–3 лет.

В табл. 1 приведены результаты авторских и производственных испытаний динамико-статистического метода прогноза урожайности ярового ячменя с заблаговременностью два месяца (первый срок прогноза). Для сравнения здесь же приведены прогностические значения урожайности ярового ячменя, рассчитанные с помощью инерционного и климатологического методов прогнозов [10].

В первый срок прогноза по Методическим указаниям [10] оправдываемость по территории для 43 субъектов Европейской территории России составила 77 %. При этом, в Смоленской, Ивановской, Нижегородской, Курской, Пензенской, Самарской областях и Кабардино-Балкарской Республике оправдываемость испытываемого метода оказалась несколько ниже, чем в инерционном и (или) климатологическом методах прогноза. В Волгоградской, Новгородской, Калининградской областях при одинаковой оправдываемости метода относительная ошибка испытываемого метода была немного ниже, чем климатологического метода.

**Результаты авторских и производственных испытаний
динамико-статистического метода прогноза урожайности ярового ячменя с
заблаговременностью два месяца (первый срок прогноза)**

Субъект Российской Федерации	Метод прогноза					
	испытываемый		инерционный		климатологический	
	Оправдыва- емость, %	Ошибка, %	Оправдыва- емость, %	Ошибка, %	Оправдыва- емость, %	Ошибка, %
Европейская территория России (2009–2016 гг.)						
1. Вологодская обл.	62,5	6,9	62,5	5,3	62,5	6,0
2. Ленинградская обл.	50,0	4,4	50,0	5,1	50,0	6,0
3. Новгородская обл.	62,5	6,3	50,0	7,0	62,5	5,6
4. Псковская обл.	62,5	5,8	37,5	5,1	12,5	8,0
5. Калининградская обл.	75,0	5,9	62,5	3,8	75,0	4,3
6. Тверская обл.	75	4,6	50	4,7	37,5	5,6
7. Смоленская обл.	37,5	6,0	62,5	8,8	50	7,6
8. Московская обл.	62,5	7,7	37,5	6,8	62,5	9,2
9. Калужская обл.	62,5	3,2	50	9,4	50	3,6
10. Тульская обл.	62	5,9	62,5	9,1	62,5	9,4
11. Ярославская обл.	75	7,0	50	6,4	50	7,1
12. Рязанская обл.	75	7,8	50	10,4	50	9,7
13. Владимирская обл.	87,5	11,0	37,5	11,5	87,5	13,3
14. Костромская обл.	62,5	5,2	62,5	8,1	50	4,0
15. Ивановская обл.	75	4,7	62,5	7,6	87,5	10,5
16. Нижегородская обл.	62,5	7,1	62,5	11,1	75	9,4
17. Кировская обл.	87,5	8,8	12,5	11,8	50	7,0
18. Республ. Марий Эл	75	10,8	25	3,0	62,5	9,6
19. Чувашская Республика	75	10,6	62,5	9,0	75	13,7
20. Республика Мордовия	87,5	12,8	75	5,1	75	7,9
21. Удмуртская Республ.	62,5	11,3	37,5	9,1	37,5	6,2
22. Брянская обл.	50	6,6	37,5	9,4	50	8,1
23. Орловская обл.	75	5,3	50	7,5	75	9,7
24. Липецкая обл.	75	9,4	37,5	4,0	75	9,5
25. Тамбовская обл.	75	10,1	62,5	10,3	50	5,1
26. Курская обл.	62,5	6,9	37,5	6,8	75	7,0
27. Белгородская обл.	75	6,7	25	21,5	62,5	10,0
28. Воронежская обл.	87,5	9,5	50	8,2	75	8,5
29. Ульяновская обл.	87,5	13,5	62,5	13,7	75	8,0
30. Пензенская обл.	62,5	7,5	75	11,3	62,5	11,6
31. Самарская обл.	87,5	9,5	62,5	15,1	87,5	9,0
32. Саратовская обл.	87,5	9,0	50	33,7	62,5	21,6
33. Оренбургская обл.	100	10,1	62,5	11,4	87,5	19,0
34. Республика Башкортостан	100	10,3	50	7,3	75	15,4
35. Республика Татарстан	100	6,5	75	19,8	75	7,7
36. Республика Калмыкия	87,5	11,8	87,5	20,2	87,5	13,3

Субъект Российской Федерации	Метод прогноза					
	испытываемый		инерционный		климатологический	
	Оправдываемость, %	Ошибка, %	Оправдываемость, %	Ошибка, %	Оправдываемость, %	Ошибка, %
37. Астраханская обл.	75	7,0	37,5	9,3	50	10,1
38. Волгоградская обл.	75	2,9	50	16,2	75	14,6
39. Краснодарский край	75	7,6	62,5	7,6	75	8,5
40. Ставропольский край	100	8,1	62,5	11,1	75	14,2
41. Ростовская обл.	87,5	13,4	75	12,9	87,5	14,5
42. Кабардино-Балкарская Республика	87,5	9,1	100	9,3	100	9,2
43. Карачаево-Черкесская Республика	75	3,9	62,5	7,5	62,5	10,5
Оправдываемость по территории, %	76,7					
Азиатская территория России (2012–2019 гг.)						
1. Пермский край	62,5	4,9	62,5	6,3	75	3,9
2. Свердловская обл.	62,5	3,7	25	6,7	75	5,4
3. Челябинская обл.	87,5	16,7	50	9,6	62,5	8,7
4. Курганская обл.	100	8,9	87,5	10,3	100	9,2
5. Тюменская обл.	75	5,3	50	8,5	75	8,5
6. Омская обл.	87,5	7,8	75,0	5,7	87,5	10,2
7. Новосибирская обл.	75	10,1	50	6,0	50	10,4
8. Томская обл.	62,5	5,2	37,5	5,7	50	7,2
9. Кемеровская обл.	100	5,4	62,5	7,0	62,5	8,0
10. Краснодарский край.	62,5	4,4	75	4,9	75	4,2
11. Иркутская обл.	62,5	3,1	75	6,3	75	5,2
12. Забайкальский край	75	8,5	87,5	14,8	75,0	8,6
13. Республика Бурятия	87,5	10,8	75	13,6	87,5	9,2
14. Приморский край	87,5	7,5	50	10,9	37,5	11,2
15. Амурская обл.	100	6,8	62,5	13,9	87,5	9,7
16. Республика Саха	75	10,9	50	15,1	62,5	13,8
17. Алтайский край	62,5	8,7	50	3,4	37,5	14,2
Оправдываемость по территории, %	70,5					

В первый срок прогноза, при оценке метода прогноза урожайности ярового ячменя по 17 субъектам Азиатской территории России по Методическим указаниям [10], оправдываемость для 11 субъектов по первому сроку прогноза была выше оправдываемости инерционного и климатологического метода (75–100 %). По пяти субъектам (Пермская, Свердловская, Иркутская области, Красноярский и Забайкальский края) оправдываемость метода оказалась ниже оправдываемости инерционного и (или) климатологического методов и составила 62,5–75 %. В одном субъекте (Омская область) относительная ошибка

оправдавшихся прогнозов оказалась в климатологическом методе немного выше, чем в испытываемом (10,2 и 7,8 соответственно) при одинаковой оправдываемости метода (87,5 %).

Согласно табл. 2, для второго срока прогноза) оправдываемость 43 прогнозов по Европейской территории России была выше, чем в первый срок, и составила 88 %. Оправдываемость испытываемого метода была ниже инерционного или климатологического методов в Липецкой, Ростовской областях и в Чувашской Республике, в Республике Мордовия и Самарской области ошибка испытываемого метода была несколько ниже, чем инерционного или климатологического.

Таблица 2

**Результаты авторских и производственных испытаний
динамико-статистического метода прогноза урожайности ярового ячменя с
заблаговременностью один месяца (второй срок прогноза)**

Субъект Российской Федерации	Метод прогноза					
	испытываемый		инерционный		климатологический	
	Оправдыва- емость, %	Ошибка, %	Оправдыва- емость, %	Ошибка, %	Оправдыва- емость, %	Ошибка, %
Европейская территория России (2009–2016 гг.)						
1. Вологодская обл.	62,5	3,9	50	4,4	50	5,1
2. Ленинградская обл.	62,5	3,7	25	2,1	37,5	4,7
3. Новгородская обл.	75	4,3	50	7,0	62,5	5,6
4. Псковская обл.	62,5	3,3	37,5	5,1	12,5	8,0
5. Калининградская обл.	87,5	3,8	62,5	3,8	75	4,3
6. Тверская обл.	62,5	2,3	37,5	1,0	25	0,9
7. Смоленская обл.	62,5	5,1	62,5	8,8	37,5	6,5
8. Московская обл.	62,5	4,7	37,5	6,8	37,5	5,1
9. Калужская обл.	62,5	2,5	37,5	7,4	50	3,6
10. Тульская обл.	62,5	2,6	62,5	9,1	50	7,5
11. Ярославская обл.	87,5	3,5	50	6,4	37,5	4,2
12. Рязанская обл.	75	5,4	50	10,4	50	9,7
13. Владимирская обл.	75	9,0	25	9,2	62,5	11,6
14. Костромская обл.	75	4,6	50	6,8	50	4,0
15. Ивановская обл.	75	2,8	50	5,7	37,5	4,5
16. Нижегородская обл.	75	5,9	62,5	11,1	62,5	7,7
17. Кировская обл.	75	3,3	12,5	11,8	50	7,0
18. Республ. Марий Эл	75	8,7	25	3,0	62,5	9,6
19. Чувашская Республика	62,5	6,5	50	5,1	87,5	13,7
20. Республика Мордовия	75	7,2	75	5,1	75	7,9
21. Удмуртская Республ.	75	5,9	25	4,2	37,5	6,2
22. Брянская обл.	50	2,7	25	8,3	37,5	5,1
23. Орловская обл.	75	2,6	50	7,5	62,5	8,2
24. Липецкая обл.	62,5	2,1	37,5	4,0	75	9,4
25. Тамбовская обл.	75	4,6	62,5	10,3	50	5,1

Субъект Российской Федерации	Метод прогноза					
	испытываемый		инерционный		климатологический	
	Оправдываемость, %	Ошибка, %	Оправдываемость, %	Ошибка, %	Оправдываемость, %	Ошибка, %
26. Курская обл.	62,5	2,8	37,5	6,8	62,5	5,9
27. Белгородская обл.	87,5	4,4	0	–	50	7,4
28. Воронежская обл.	87,5	4,9	37,5	4,3	75	8,5
29. Ульяновская обл.	87,5	6,8	50	10,3	75	8,0
30. Пензенская обл.	75	6,6	75	11,3	62,5	11,6
31. Самарская обл.	87,5	10,1	50	13,4	87,5	9,0
32. Саратовская обл.	87,5	9,3	12,5	29,9	37,5	12,9
33. Оренбургская обл.	100	9,9	62,5	11,4	75	15,4
34. Республика Башкортостан	100	9,5	50	7,3	75	15,4
35. Республика Татарстан	100	6,4	62,5	17,7	75	7,7
36. Республика Калмыкия	75	7,9	62,5	15,8	87,5	13,3
37. Астраханская обл.	75	5,1	37,5	9,3	50	10,1
38. Волгоградская обл.	75	4,2	37,5	11,1	50	7,5
39. Краснодарский край	87,5	7,1	62,5	7,6	62,5	5,9
40. Ставропольский край	87,5	5,0	62,5	11,1	62,5	13,1
41. Ростовская обл.	62,5	3,6	75	12,9	87,5	14,5
42. Кабардино-Балкарская Республика	100	3,7	87,5	7,6	100	9,2
43. Карачаево-Черкесская Республика	75	2,4	50	5,0	50	7,5
Оправдываемость по территории, %	88,4					
Азиатская территория России (2012–2019 гг.)						
1. Пермский край	62,5	5,4	62,5	6,3	75	3,9
2. Свердловская обл.	62,5	3,5	25,0	6,7	75	5,4
3. Челябинская обл.	75	15,0	37,5	3,4	50	4,3
4. Курганская обл.	100	8,5	87,5	10,3	75	4,8
5. Тюменская обл.	75	4,8	37,5	7,1	75	7,7
6. Омская обл.	87,5	7,7	75	5,7	75	7,1
7. Новосибирская обл.	62,5	8,3	50	6,0	50	10,4
8. Томская обл.	62,5	5,2	37,5	5,7	50	7,2
9. Кемеровская обл.	100	5,5	62,5	7,0	62,5	8,0
10. Краснодарский край.	75	4,2	62,5	4,1	75	3,3
11. Иркутская обл.	62,5	2,5	37,5	3,5	62,5	4,3
12. Забайкальский край	75	8,5	62,5	13,2	62,5	5,3
13. Республика Бурятия	75	7,2	62,5	12,5	75	9,2
14. Приморский край	87,5	7,4	37,5	7,8	25	6,8
15. Амурская обл.	100	7,4	62,5	13,9	87,5	9,7
16. Республика Саха	62,5	4,1	37,5	13,7	37,5	9,6
17. Алтайский край	62,5	7,7	50	3,4	25	12,0
Оправдываемость по территории, %	88,2					

По Азиатской территории России во второй срок прогноза оправдываемость испытываемого метода для 15 субъектов оказалась выше инерционного и климатологического (62,5–100 %), по двум субъектам (Пермский край и Свердловская область) оправдываемость испытываемого метода оказалась ниже инерционного и климатологического методов прогноза (25–87,5 %). Оправдываемость метода в целом по Азиатской территории составила 88 %.

На независимом материале в ФГБУ «Гидрометцентр России» всего было составлено 360 прогнозов урожайности ярового ячменя по субъектам Российской Федерации (табл. 3, 4).

В первый год производственных испытаний – в целом по территории Европейской территории России прогноз не оправдался (оправдываемость 40 % – в июне и 44 % – в июле). В 2015 и 2016 гг. прогноз имел высокую оправдываемость для двух сроков прогноза. В целом по территории ЕТР оправдываемость прогнозов, составленных на 21 июня, составила 91 % – в 2015 г. и 93 % – в 2016 г. Прогнозы, составленные на 21 июля, имели, соответственно, оправдываемость 81 и 84 % (табл. 3).

Таблица 3

**Оправдываемость прогнозов урожайности ярового ячменя
по субъектам Российской Федерации в период производственных испытаний
в Гидрометцентре России в 2014–2016 гг.**

Субъект Российской Федерации	Оправдываемость прогноза, %					
	2014 год		2015 год		2016 год	
	21 июня	21 июля	21 июня	21 июля	21 июня	21 июля
1. Вологодская обл.	78	75	90	83	86	82
2. Ленинградская обл.	75	76	85	74	94	90
3. Новгородская обл.	68	67	91	91	75	75
4. Псковская обл.	66	70	66	62	92	76
5. Калининградская обл.	78	87	89	98	99	95
6. Тверская обл.	58	54	54	48	87	80
7. Смоленская обл.	63	59	65	61	80	76
8. Московская обл.	78	70	81	74	61	67
9. Калужская обл.	70	64	81	77	70	35
10. Тульская обл.	86	77	76	81	79	26
11. Ярославская обл.	59	54	92	97	90	93
12. Рязанская обл.	87	65	97	94	24	36
13. Владимирская обл.	69	60	92	83	83	88
14. Костромская обл.	47	44	83	75	92	86
15. Ивановская обл.	64	53	85	75	96	98
16. Нижегородская обл.	80	75	93	98	73	69
17. Кировская обл.	55	43	85	78	90	87
18. Республ. Марий Эл	65	63	78	74	86	85

19. Чувашская Республика	59	54	77	69	81	83
20. Республика Мордовия	66	80	83	68	85	77
21. Удмуртская Республ.	69	65	81	72	88	92
22. Брянская обл.	49	52	73	73	83	85
23. Орловская обл.	52	58	77	75	97	91
24. Липецкая обл.	66	68	75	75	84	70
25. Тамбовская обл.	48	50	65	65	80	87
26. Курская обл.	76	81	86	84	75	75
27. Белгородская обл.	58	61	86	84	99	97
28. Воронежская обл.	61	64	93	87	94	95
29. Ульяновская обл.	74	71	87	83	100	92
30. Пензенская обл.	65	61	74	67	86	87
31. Самарская обл.	63	57	98	83	89	94
32. Саратовская обл.	65	65	95	84	89	83
33. Оренбургская обл.	89	77	90	76	88	88
34. Республика Башкортостан	81	79	91	80	87	88
35. Республика Татарстан	87	81	91	79	98	97
36. Республика Калмыкия	66	66	78	79	55	62
37. Астраханская обл.	53	70	79	64	89	93
38. Волгоградская обл.	49	53	88	83	65	70
39. Краснодарский край	77	89	86	87	80	90
40. Ставропольский край	98	81	98	93	89	65
41. Ростовская обл.	63	66	78	76	79	80
42. Кабардино-Балкарская Республика	74	99	96	98	84	86
43. Карачаево-Черкесская Республика	81	81	83	89	99	100
Оправдываемость по территории, %	40	44	91	81	93	84

При оценке оправдываемости прогнозов в первый год производственных испытаний – в целом по Азиатской территории России по двум срокам прогноза – прогноз не оправдался по 4 субъектам (оправдываемость прогнозов ниже 70 %), оправдываемость по территории в 2017 г. составила 76 %. В 2018 и 2019 гг. прогноз имел высокую оправдываемость для двух сроков прогноза. В целом по территории оправдываемость прогнозов в среднем по субъектам Азиатской территории России в оба срока в 2018 и 2019 гг. составила 94 % (табл. 4).

**Оправдываемость прогнозов урожайности ярового ячменя
по субъектам Российской Федерации в период производственных испытаний
в Гидрометцентре России в 2017–2019 гг.**

Субъект Российской Федерации	Оправдываемость прогноза					
	2017 год		2018 год		2019 год	
	21 июня	21 июля	21 июня	21 июля	21 июня	21 июля
1. Пермский край	59,5	59,5	39,9	39,9	67,1	65,8
2. Свердловская обл.	78,0	78,0	76,1	76,1	84,5	84,5
3. Челябинская обл.	74,3	73,2	81,9	81,9	97,7	97,7
4. Курганская обл.	89,7	89,7	83,6	84,9	94,6	94,6
5. Тюменская обл.	79,0	79,0	90,8	90,8	93,4	93,4
6. Омская обл.	50,3	50,3	97,4	97,4	78,6	78,6
7. Новосибирская обл.	80,9	80,9	85,6	85,6	99,0	99,0
8. Томская обл.	68,1	68,1	83,8	83,8	84,6	84,6
9. Кемеровская обл.	88,4	88,4	95,8	95,3	97,6	97,1
10. Краснодарский край.	83,3	98,8	97,6	95,5	91,9	88,2
11. Иркутская обл.	82,3	82,3	85,1	85,1	99,5	99,5
12. Забайкальский край	69,6	69,6	86,6	86,6	75,2	74,5
13. Республика Бурятия	90,3	90,3	83,5	83,5	90,5	90,5
14. Приморский край	94,2	94,2	88,2	87,7	79,5	78,2
15. Амурская обл.	84,5	84,5	97,7	97,7	99,0	97,5
16. Республика Саха	98,5	97,1	72,3	70,5	76,5	78,6
17. Алтайский край	75,9	75,9	79,6	77,8	89,3	89,3

Рекомендации о внедрении

Решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 4 июля 2017 г. автоматизированная технология составления оценок условий вегетации и прогнозов урожайности ярового ячменя по субъектам Европейской территории России рекомендована в качестве основного расчетного метода в ФГБУ «ВНИИСХМ». Методики прогноза урожайности ярового ячменя по Московской, Рязанской, Тверской, Смоленской областям рекомендовано доработать в целях повышения оправдываемости прогноза.

Решением ЦМКП от 18 сентября 2020 г. метод прогноза урожайности ярового ячменя по субъектам Азиатской территории России рекомендован к внедрению в качестве основного расчетного метода. Авторам рекомендовано доработать метод прогноза урожайности ярового ячменя по Пермскому краю и Свердловской области.

Список литературы

1. Гончарова Т.А., Найдина Т.А., Лебедева В.М., Богомолова Н.А. Результаты авторских и производственных испытаний в ФГБУ «Гидрометцентр России» автоматизированной технологии составления оценки условий вегетации и прогноза урожайности яровой пшеницы и картофеля по субъектам Российской Федерации // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2014. – Информационный сборник № 41. – С. 111–126.
2. Гончарова Т.А., Найдина Т.А., Лебедева В.М., Береза О.В. Результаты испытания метода оценки условий вегетации и прогноза урожайности кукурузы с использованием спутниковой и наземной информации по субъектам Российской Федерации // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2018. – Информационный сборник № 45. – С. 127–136.
3. Инструкция по оценке оправдываемости агрометеорологических прогнозов. – М.: Гидрометеоиздат, 1983. – 7 с.
4. Клеценко А.Д., Лебедева В.М., Найдина Т.А., Гончарова Т.А., Шкляева Н.М. Оперативное информационно-прогностическое обеспечение потребителей агрометеорологической продукции // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – 2015. – Вып. 179. – С. 33–43.
5. Лебедева В.М., Страшная А.И. Основы сельскохозяйственной метеорологии: Учебное пособие. Том II. Методы расчетов и прогнозов в агрометеорологии. Книга 2. Оперативное агрометеорологическое прогнозирование. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. – 216 с.
6. Полевой А.Н. Теория и расчет продуктивности сельскохозяйственных культур. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 175 с.
7. Полевой А.Н. Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 320 с.
8. Полевой А.Н., Русакова Т.И. и др. Прикладная динамическая модель формирования урожая сельскохозяйственных культур // Гидрометеорологическое обеспечение агропромышленного комплекса страны: Сб. докладов Всесоюзного совещания, Целиноград, сентябрь 1988 г. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – С. 15–31.
9. РД 52.33.810–2014. Порядок составления прогноза урожайности яровой пшеницы по субъектам Российской Федерации. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2014. – 20 с.
10. РД 52.27.284-91 Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. – С. 98–107.

11. *Русакова Т.И.* О создании новой технологии оперативного агрометеорологического обеспечения агропромышленного комплекса России // *Метеорология и гидрология.* – 2004. – № 12. – С. 82–89.

12. *Русакова Т.И.* Автоматизированная система оценки агрометеорологических условий вегетации и прогноза урожайности озимой ржи и пшеницы по территории субъектов Российской Федерации // *Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов.* – 2006. – Информационный сборник № 32. – С. 58–64.

МЕТОД ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ДРЕЙФА ЛЬДА В АРКТИЧЕСКОМ БАССЕЙНЕ С ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ ОТ ТРЕХ МЕСЯЦЕВ

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

Введение

Прогнозы дрейфа льда являются важной составной частью ледовых прогнозов.

Актуальность долгосрочных прогнозов перемещения льда обусловлена тем, что они используются при определении со значительной заблаговременностью ожидаемых ледовых условий в окраинных арктических морях и на трассе Северного Морского пути в начале предстоящего навигационного периода и на последующих его стадиях. В частности, с их учетом оцениваются такие показатели, как граница зоны с преобладанием многолетних льдов, ожидаемый ледообмен между Арктическим бассейном и арктическими морями, положение ледяных массивов в период плавания. Долгосрочные прогнозы дрейфа льда необходимы и в случае, когда по какой-то причине требуется выполнить прогностический расчет перемещения отдельного ледяного поля или некоторой совокупности полей.

128

Долгосрочные прогнозы дрейфа льда были особенно востребованы при организации в Арктическом бассейне дрейфующих станций «Северный полюс» с СП–32 по СП–40. С учетом прогнозов выбиралось расположение ледяных полей для установки станции, а затем разрабатывались стратегии снятия станций. В настоящее время долгосрочные прогнозы дрейфа льда используются при организации дрейфующих станций на платформе.

До последнего времени долгосрочные прогнозы дрейфа льда в Арктическом бассейне составлялись на основе климатических месячных полей скорости дрейфа [1, 2]. Получаемые оценки ожидаемого результирующего перемещения льда иногда оказывались неудачными из-за существенного расхождения климатических полей скорости дрейфа льда с фактическими.

Стало очевидно, что для повышения качества долгосрочных прогнозов дрейфа необходимо располагать не только климатическими его оценками, но и результатами расчета ожидаемого перемещения льда, полученными по более надежному, обоснованному методу. Такой метод должен обеспечивать возможность составления долгосрочных прогнозов в любое время года и задавать исходную точку на большей части Арктического бассейна.

Основы метода

В результате анализа месячных полей скорости дрейфа льда было установлено, что вихревые образования, свойственные, как было уже известно ранее, полям скорости дрейфа за полугодовые и годовые периоды, являются характерной особенностью и месячных полей. При этом антициклонические круговороты присутствуют в месячных полях скорости дрейфа льда почти в 3 раза чаще циклонических [3]. Поскольку круговороты в полях скорости являются макромасштабными образованиями, то изменение их показателей позволяет судить об изменении дрейфа льда во всем бассейне в целом. Установлено, что в качестве численного показателя полей скорости дрейфа льда может быть использована повторяемость полей с антициклоническими круговоротами, рассчитанная за годовой ледовый цикл. Выраженная в процентах эта величина равна

$$p = \frac{n}{12} \cdot 100,$$

где n – число месячных полей скорости в течение годового ледового цикла с наличием в каждом из них антициклонического круговорота.

Значения повторяемости месячных полей скорости дрейфа с наличием в них антициклонических круговоротов в годовых ледовых циклах с 1979 по 2019 год варьируют, как видно из рис. 1, от 33 % до 100 %. Средняя их величина \bar{p} , изображенная на этом рисунке синей пунктирной линией, составляет 66 %, стандартное отклонение $\sigma_p = 18$ %.

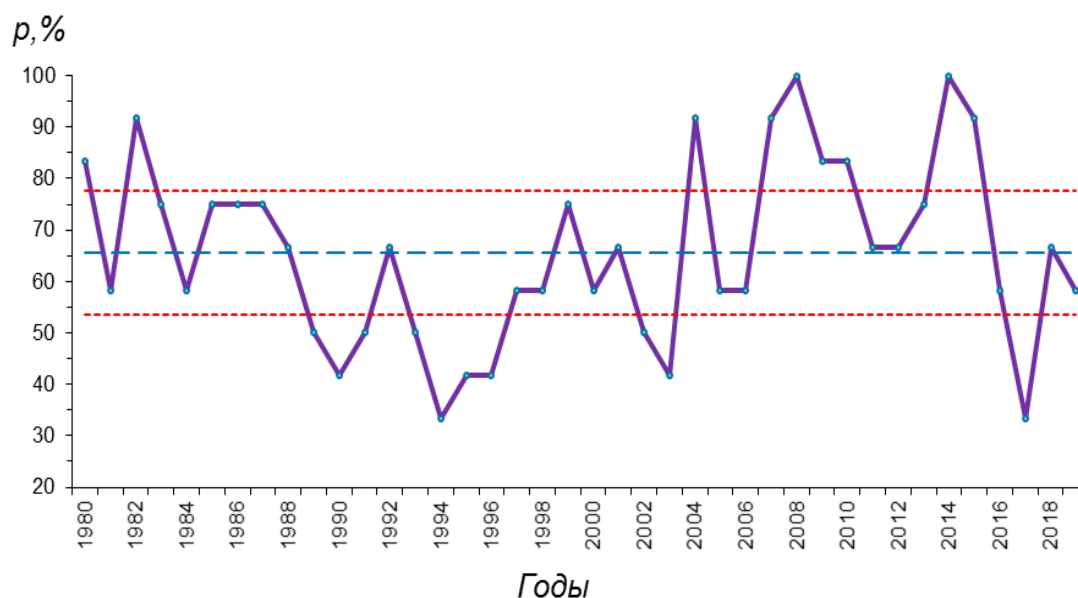


Рис. 1. Многолетнее изменение среднегодовой повторяемости антициклонических вихревых образований в месячных полях скорости дрейфа льда в Арктическом бассейне.

Установлено, что при близких значениях показателя p за разные годовые ледовые циклы поля скорости дрейфа во многом идентичны друг другу. Если же в выделенной совокупности лет значения p за разные годы существенно различаются, то сходство между полями скорости за эти годы проявляется довольно слабо или совсем не выражено. Обнаружено также, что в годовых ледовых циклах с повышенной повторяемостью антициклонических вихревых образований дрейф льда намного интенсивнее, чем в циклах с относительно низкими значениями p [3].

Таким образом, повторяемость антициклонических круговоротов является параметром, который позволяет выделить из ретроспективных данных группы лет со сравнительно близкими полями скорости дрейфа льда. Для использования этого свойства величины p в прогностических целях совокупность лет, за которые рассчитаны как повторяемость антициклонических круговоротов, так и месячные поля векторов скорости дрейфа в узлах сетки, разделена на три группы.

1. Годы со значениями повторяемости, соответствующими условию

$$p \geq \bar{p} + 0,674\sigma_p,$$

отнесены к группе лет с повышенной повторяемостью.

2. Годы, в которых значения p определяются неравенством

$$\bar{p} - 0,674\sigma_p < p < \bar{p} + 0,674\sigma_p,$$

включены в группу лет с повторяемостью около средней.

3. К группе лет с пониженной повторяемостью отнесены годы с повторяемостью

$$p \leq \bar{p} - 0,674\sigma_p.$$

Границы выделенных групп обозначены красными пунктирными линиями на рис. 1, а результаты группировки лет представлены в табл. 1. Приведенные во втором ее столбце диапазоны числа месячных полей скорости с антициклоническими круговоротами соответствуют границам групп лет, выделенных по повторяемости. В третьем столбце таблицы вместо годовых ледовых циклов указаны годы, к которым относится вторая наиболее значительная часть каждого цикла. Так, цикл с октября 2001 по сентябрь 2002 года обозначен 2002-м годом.

При прогностическом расчете перемещения льда из трех групп, выделенных по величине повторяемости антициклонических круговоротов в месячных полях скорости дрейфа льда в ледовом цикле, выбирается та, которая, как ожидается, по значениям p будет в большей мере, чем остальные, соответствовать текущему годовому ледовому циклу.

Таким образом, в целом предложенный метод долгосрочного прогноза дрейфа льда в Арктическом бассейне по своей сути является аналоговым.

**Группы лет с разной повторяемостью антициклонических круговоротов
за годовой ледовый цикл в месячных полях скорости дрейфа**

Характеристика повторяемости антициклонических круговоротов в группе лет	Диапазон числа месячных полей дрейфа льда с антициклоническими круговоротами в годовом ледовом цикле	Годы группы	Общее число лет в группе
Повышенная	10–12	2004, 2007, 2008, 2009, 2010, 2014, 2015	7
Около средней	7–9	1999, 2000, 2001, 2005, 2006, 2011, 2012, 2013, 2016, 2018, 2019	11
Пониженная	4–6	1994, 1995, 2002, 2003, 2017	5

Технология разработки прогноза дрейфа льда в Арктическом бассейне

Основой для определения аналоговой группы служит количество антициклонических круговоротов в полях скорости дрейфа льда за предшествующие прогнозу 3–4 месяца, а в случае сомнений, к какой группе отнести текущий ледовый цикл, учитывается многолетний ход изменения повторяемости месячных полей скорости дрейфа с антициклоническими круговоротами (см. рис. 1).

За предпрогностический промежуток времени (3–4 месяца до месяца начала прогностического периода) определяется ход изменения накопленного числа N месячных полей скорости дрейфа льда с наличием в них антициклонических круговоротов. Таким же путем за тот же промежуток времени рассчитывается ход изменения накопленных среднемесячных значений в каждой из трех выделенных групп N^* . Та группа, ход изменения показателя N^* которой наиболее идентичен ходу изменения показателя N , принимается за аналоговою, и при дальнейшем прогностическом расчете используются данные скорости дрейфа льда только ледовых циклов, относящихся к этой группе.

Для выбора в интерактивном режиме аналоговой группы лет используется разработанный авторами метода программный модуль *PredPrognoz*.

В качестве примера на рис. 2 приведены изменения накопленной повторяемости антициклонических круговоротов в месячных полях дрейфа льда в предпрогностический период в апреле 2018 г. и в выделенных группах лет, воспроизведенные модулем *PredPrognoz*.

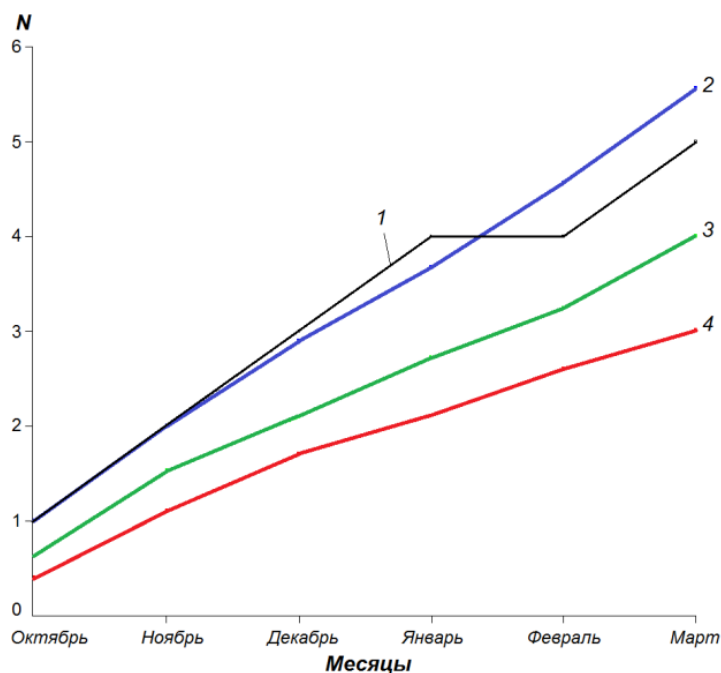


Рис. 2. Изменение количества месячных полей дрейфа льда с антициклоническими круговоротами в предпрогностический период в апреле 2018 г. (1) и по данным аналоговых групп лет (2–4): 2 – группа повышенной повторяемости; 3 – группа с повторяемостью около среднего значения; 4 – группа с пониженной повторяемостью.

Непосредственно расчет прогностического результирующего перемещения льда в Арктическом бассейне осуществляет разработанный авторами метода программный модуль *PrognozSP_Ellips*. Последовательно по данным каждого года-аналога, отобранного на предыдущем этапе, из задаваемой исходной точки вычисляется вектор результирующего перемещения льда за три месяца начиная с даты начала прогностического периода. Расчет векторов перемещения льда осуществляется по данным установленных аналоговых месячных полей скорости дрейфа льда в Арктическом бассейне на основе метода объективной интерполяции. Положение конца итогового вектора, полученного путем осреднения результирующих векторов, рассчитанных за трехмесячный период по каждому году-аналогу, принимается за начальное положение точки при расчете перемещения льда за следующий трехмесячный период. Аналогичные вычисления повторяются до тех пор, пока не будет построен вектор результирующего перемещения льда на заданную дату окончания прогноза.

Для оценки долгосрочных прогнозов перемещения льда, составленных по изложенному методу, используется эллипс допустимой погрешности определения результирующего дрейфа льда. Данный эллипс строится при задаваемом значении вероятности и ограничивает

зону, в которую с этой вероятностью попадет конец вектора прогностического дрейфа льда. Для оценки долгосрочных прогнозов перемещения льда до 6 месяцев использовался эллипс допустимой погрешности при вероятности, равной 0,6, что соответствует вероятности попадания в интервал $-0,8\sigma - 0,8\sigma$ от средней многолетней величины, а для более продолжительных периодов – 0,68, что соответствует вероятности попадания в интервал $\pm\sigma$. Если конец фактического вектора \vec{W}_ϕ оказывается в пределах эллипса допустимой погрешности, прогноз считается оправдавшимся. Наоборот, при положении конца вектора \vec{W}_ϕ за пределами эллипса принимается, что прогноз не оправдался.

Данный эллипс использовался и при сравнении результатов долгосрочных прогнозов, составленных как по климатическим данным, так и по предложенному методу.

Проверка метода

Основательная проверка оправдываемости расчетов векторов результирующего перемещения льда за промежутки времени от 3 до 12 месяцев на этапе завершения работы могла быть выполнена только на основе ретроспективных данных по дрейфу автоматических буев. Общее число всех случаев оценки оправдываемости векторов результирующего перемещения буев, рассчитанных по методу, равно 303.

133

В табл. 2 приведены сведения о количестве проверенных диагностических расчетов и продолжительности охваченных ими периодов. Проверка была реализована по данным за 11 годовых ледовых циклов в период с 1994 по 2014 год. Она учитывает все аналоговые группы лет.

Во всех группах аналоговых лет средняя оправдываемость расчетов дрейфа, выполненных по методу \bar{f}_m выше климатической оправдываемости \bar{f}_k , вследствие чего эффективность метода $e = \bar{f}_m - \bar{f}_k$, осредненная по совокупностям случаев проверки, имеет положительные значения. Осредненные по каждой группе лет значения e можно считать достаточно близкими. Средняя величина показателя эффективности диагностических расчетов по методу равна 12 %.

Нельзя не отметить, что при сопоставлении значений оправдываемости f_m и f_k , рассчитанных по отдельным буям, в некоторых случаях $f_m < f_k$. Возникновение этих ситуаций, по-видимому, обусловлено причинами, в том числе и случайными, которые в аналоговом методе не учитываются.

Для оценки преимущества прогнозов дрейфа льда по методу по сравнению с климатическими прогнозами использованы также ошибки параметров дрейфа, возникающие при каждом из указанных вариантов прогностического расчета.

Таблица 2

Оправдываемость и эффективность расчетов результирующих векторов дрейфа льда

Продолжительность расчетного периода, месяцы	Число проверенных случаев	Средняя оправдываемость расчета, %		Эффективность метода, %
		по климату	по методу	
Группа лет с повышенными значениями p				
12	28	32	53	21
9	17	59	65	6
6	33	51	64	13
3	50	42	55	13
3–12	128	44	58	14
Группа лет со значениями p около средней				
12	29	55	66	11
9	24	66	74	8
6	46	61	70	9
3	42	57	67	10
3–12	141	59	69	10
Группа лет с пониженными значениями p				
6	11	45	55	10
3	23	43	56	13
3–6	34	44	56	12
Обобщение по трем группам				
12	57	44	60	16
9	41	63	70	7
6	90	55	66	11
3	115	48	60	12
3–12	303	51	63	12

В табл. 3 приведены ошибки по дальности и по направлению, относящиеся к рассчитанным векторам результирующего дрейфа буев. В каждом проверяемом случае значения ошибок установлены на основании параметров фактического дрейфа буя из исходной точки и параметров дрейфа, рассчитанного из той же точки по методу и по климатическим данным.

**Модули ошибок результирующих векторов дрейфа льда, рассчитанных
по климату и по методу**

Продолжительность расчетного периода, месяцы	Число проверенных случаев	Перемещение льда, осредненное по всем случаям, км	Ошибка по перемещению, км		Ошибка по направлению, градусы	
			по климату	по методу	по климату	по методу
Группа лет с повышенными значениями p						
12	28	889	350	274	28	25
9	17	677	207	85	18	15
6	33	484	188	155	22	24
3	50	584	233	175	23	23
3–12	128	637	244	180	23	23
Группа лет со значениями p около средней						
12	29	589	304	240	57	31
9	24	359	126	118	35	28
6	46	303	99	116	32	30
3	42	176	73	76	33	28
3–12	141	334	138	130	38	29
Группа лет с пониженными значениями p						
6	11	451	187	160	40	32
3	23	240	88	87	34	29
3–6	34	308	120	111	36	30
Обобщение по трем группам						
12	57	736	327	257	43	28
9	41	491	160	104	28	23
6	90	387	142	136	29	28
3	115	366	146	121	29	26
3–12	303	459	181	149	31	27

Осредненные по трем группам лет за все периоды ошибки по дальности векторов результирующего дрейфа, рассчитанных по методу, в среднем на 32 км меньше, чем при их расчете по климатическим данным, и равны, соответственно, 149 и 181 км.

Ошибки векторов результирующего дрейфа льда по направлению более стабильны, чем ошибки по дальности. При осреднении по всем группам лет ошибка направления результирующего вектора, рассчитанного по методу, в среднем на 4° меньше, чем при его расчете на основе климатических данных.

В целом, учитывая оправдываемость расчетов результирующих векторов дрейфа льда за периоды от 3 до 12 месяцев и возникающие при этом ошибки векторов по их величине и

направлению, можно считать, что расчеты перемещения льда по методу более достоверны по сравнению с его климатическими оценками.

Результаты испытаний метода

Испытание метода проводилось в отделе ледового режима и прогнозов ААНИИ в течение двух ледовых циклов с октября 2017 по октябрь 2019 года.

Прогнозы составлялись и оценивались для акватории Арктического бассейна. Предметом прогноза являлось местоположение автоматического буя через временные периоды продолжительностью 3, 6, 9 и 12 месяцев.

Оправдываемость и эффективность прогнозов различной продолжительности за период испытаний приведены в табл. 4.

Таблица 4

Оправдываемость и эффективность прогнозов дрейфа льда в Арктическом бассейне различной продолжительности, составленных по разработанному методу в течение ледовых циклов 2017/2018 и 2018/2019 гг.

Продолжительность расчетного периода, месяцы	Количество прогнозов		Оправдываемость, %		Эффективность, %	
	2017/2018	2018/2019	2017/2018	2018/2019	2017/2018	2018/2019
3	28	52	68	62	4	18
6	19	31	68	61	31	35
9	8	17	50	65	12	36
12	0	6	-	50	-	17

Средняя эффективность прогнозов составила: для прогнозов с продолжительностью расчетного периода 3 месяца – 13 %, для прогнозов продолжительностью 6 месяцев – 34 %, для прогнозов продолжительностью 9 месяцев – 28 %, для прогнозов продолжительностью 12 месяцев – 17 %.

Результаты испытаний показывают, что прогноз по предлагаемому методу имеет хорошую оправдываемость, которая при продолжительности периода прогноза от 3 до 6 месяцев составляет 64 %. Эффективность метода прогноза на этот период составляет в среднем 21 % по сравнению с климатическим прогнозом. Прогнозы дрейфа льда при продолжительности периода прогноза 9 и 12 месяцев носят оценочный характер, так как на протяжении этого периода всегда выполняется уточнение прогнозов. Тем не менее

эффективность в этот период по сравнению с климатическим прогнозом составляет в среднем 26 %.

В ходе испытаний также определялись ошибки прогноза векторов результирующего дрейфа льда. В табл. 5 приведены ошибки по дальности и по направлению, рассчитанные для периодов прогноза различной продолжительности. В каждом проверяемом случае значения ошибок установлены на основании параметров фактического дрейфа автоматического буя из исходной точки и параметров дрейфа, рассчитанного из той же точки по методу и по климатическому прогнозу.

Таблица 5

Модули ошибок результирующих векторов дрейфа льда, рассчитанных по климатическому прогнозу и по методу

Продолжительность расчетного периода, месяцы	Число прогнозов	Ошибка по направлению, градусы		Ошибка по перемещению, км		Различие ошибок по климату и методу	
		по климату	по методу	по климату	по методу	направление, градусы	перемещение, км
3	80	55	48	175	163	7	12
6	50	50	38	294	238	11	56
9	25	46	33	362	319	14	43
12	6	39	23	431	357	16	74

137

Ошибка направления результирующего вектора, рассчитанного по методу, в среднем на 11° меньше, чем при его расчете на основе климатических данных. Осредненная по всем расчетным периодам ошибка по перемещению, полученная при составлении прогнозов по методу, также меньше соответствующей ошибки прогноза по климату и составляет 46 км.

Заключение

Проведенные исследования позволили разработать метод долгосрочного прогноза дрейфа льда в Арктическом бассейне с заблаговременностью от трех до двенадцати месяцев.

Метод позволяет предсказывать положение в Арктическом бассейне заданного ледяного поля с заблаговременностью от 3 месяцев, рассчитывая географические координаты конца прогностического вектора результирующего перемещения.

Результаты прогнозов показали сравнительно высокую оправдываемость. Метод характеризуется положительной эффективностью по сравнению с климатическими оценками.

Для дальнейшего совершенствования метода долгосрочных прогнозов дрейфа льда необходимо пополнять электронный архив среднемесячных полей скорости дрейфа льда и фиксировать наличие в них антициклонических круговоротов, увеличивая тем самым объем выборки для каждой аналоговой группы.

На основе вышеприведенных результатов испытаний Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета на заседании от 18 сентября 2020 г. приняла решение рекомендовать внедрить метод долгосрочного прогноза дрейфа льда в Арктическом бассейне с заблаговременностью от трех месяцев в оперативную практику ФГБУ «ААНИИ» в качестве основного.

Список литературы

1. *Лосев С.М., Горбунов Ю.А., Кулаков И.Ю.* Статистический анализ дрейфа льда в Арктическом бассейне по данным автоматических буев // Проблемы Арктики и Антарктики. 1994. – № 67–68. – С. 51–63.

2. *Лосев С.М., Горбунов Ю.А., Сергеева И.А.* Технология воспроизведения полей скорости дрейфа льда в Арктическом бассейне по данным автоматических буев // Труды ААНИИ. – 2002. – Т.445. – С. 101–112.

3. *Лосев С.М., Дымент Л.Н.* Повторяемость крупномасштабных вихревых образований в полях скорости дрейфа льда Арктического бассейна как показатель его интенсивности // Метеорология и гидрология. – 2016. – № 10. – С. 72–83.

УДК 551.509.323

Новая технология глобального вариационного анализа с горизонтальным разрешением 0.25 град. и вертикальными уровнями до 1 гПа / Цырульников М.Д., Свиренко П.И., Гайфулин Д.Р., Багров А.Н. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2021. – Информационный сборник № 48. – С. 3-12.

Кратко излагается новая технология глобального вариационного анализа основных метеорологических полей в конфигурации с первым приближением NCEP разрешением 0,25 град. и вертикальными уровнями до 1 гПа. Технология разработана в ФГБУ «Гидрометцентр России» и основана на трехмерном усвоении метеорологических данных по методу 3D-VAR. Приведены результаты оперативных испытаний новой технологии в период с апреля по сентябрь 2020 г. Качество полей анализа оценивалось по точности стартовавшего с них прогноза. Верификация прогнозов проводилась по данным оперативного анализа Гидрометцентра России и показала значительное преимущество новой технологии по сравнению с работающей в настоящее время.

ЦМКП решением от 16.12.2020 г. рекомендовала внедрить новую технологию глобального вариационного усвоения данных в конфигурации с полями первого приближения NCEP разрешением 0,25 град. в оперативную эксплуатацию в ФГБУ «ГВЦ Росгидромета» и ФГБУ «Гидрометцентр России».

Ключевые слова: технология глобального вариационного анализа, трехмерное усвоение данных, метод 3D-VAR, метеорологические поля, результаты испытаний

Ил. 9. Библ. 9.

139

УДК 551.509.1/5

Усовершенствованная технология радиолокационного наукастинга осадков и результаты верификации в теплый период года (май – сентябрь 2020 г.) / Муравьев А.В., Киктев Д.Б., Смирнов А.В. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2021. – Информационный сборник № 48. – С. 13-41.

В статье представлены результаты оперативных испытаний усовершенствованной технологии вероятностного наукастинга осадков с километровым разрешением и совместной технологии детерминистского наукастинга и сверхкраткосрочного прогноза метеорологических параметров (осадков, температуры, влажности, направления и скорости ветра) на основе экстраполяции данных наблюдений и численного моделирования.

ЦМКП решением от 16 декабря 2020 г. рекомендовала внедрить эти технологии в оперативную практику в качестве основных в теплый период года.

Ключевые слова: наукастинг, сверхкраткосрочный прогноз, оптический поток, метеорологический радиолокатор, численное моделирование, качество прогноза, вероятностный прогноз, верификация, комплексирование, интенсивность осадков

Табл. 9. Ил. 7. Библ. 8.

УДК 551.509.327:551.515

Методика оценки смерчеопасности вблизи Черноморского побережья России и результаты ее испытаний / Калмыкова О.В. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2021. – Информационный сборник № 48. – С. 42-61.

Методика оценки смерчеопасности, разработанная в ФГБУ «НПО «Тайфун», позволяет строить прогнозы смерчеопасных областей в пределах восточной части акватории Черного моря, выявлять облака с потенциальным риском образования из них смерчей, давать прогноз возможного формирования смерчей вблизи различных участков Черноморского побережья России. Методика реализована в автоматизированной технологии, функционирующей в непрерывном режиме. Результаты расчетов по методике представляются в виде интерактивных карт, графических и табличных форм посредством специально разработанного веб-приложения.

Решением ЦМКП Росгидромета от 18.09.2020 г. разработанная технология расчета по методике в части выдачи прогнозов смерчеопасности внедрена в ФГБУ «СЦГМС ЧАМ» и ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС» в качестве консультативного метода прогноза смерчей.

Ключевые слова: смерч, смерчеопасная ситуация, методика оценки смерчеопасности, прогноз смерчей, зоны риска, распознавание смерчеобразующих облаков, смерчеопасные участки побережья, результаты испытаний.

Табл. 6. Ил. 10. Библ. 19.

140

УДК 551.5:001.891.57

Результаты оперативного испытания технологии прогноза гроз в Урало-Сибирском регионе с заблаговременностью до 60 часов / Адаренко Е.А., Шепоренко Г.А., Здерова М.Я., Токарев В.М., Хлучина Н.А., Воробьева Л.П. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2021. – Информационный сборник № 48. – С. 62-71.

Разработанная в ФГБУ «СибНИГМИ» технология прогноза гроз до трех суток построена на физико-статистической интерпретации модельной продукции COSMO-Ru_Sib13 и NCEP (GFS). Решающие правила для распознавания гроз с различной пространственно-временной детальностью и заблаговременностью получены на обучающей выборке в виде логических бинарных деревьев. Программное обеспечение расчета прогнозов на базе полученных решений внедрено в оперативную технологическую линию статистического пост-процессинга в Западно-Сибирском региональном вычислительном центре. В статье представлены результаты оперативных испытаний на территории ответственности ФГБУ «Уральское УГМС» и ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС».

Ключевые слова: прогноз гроз, распознавание образов, бинарное дерево решений, оценки прогнозов

Табл. 1. Ил. 5. Библ. 4.

Валидация автоматизированной технологии диагноза параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды по данным радиометра SEVIRI с геостационарных метеоспутников серии Meteosat MSG / Волкова Е.В., Кухарский А.В., Санникова Г.В., Павлов И.Н.
// Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2021. – Информационный сборник № 48. – С. 72-88.

В основе технологии, разработанной и внедренной в оперативную практику в ФГБУ «НИЦ «Планета», лежат оригинальные авторские методы автоматизированного порогового попиксельного дешифрирования и классификации спутниковой информации по косвенным признакам. Отличительной чертой являются высокие оперативность (поступление результатов дешифрирования в базу данных менее чем через 0,5 мин) и периодичность (15 мин), а также возможность комплексного анализа синоптической ситуации на большой площади. Производственные испытания проводились в Центрально-Черноземном УГМС и Вологодском ЦГМС с июня 2019 г. по май 2020 г.

По итогам испытаний ЦМКП Росгидромета рекомендовала внедрить автоматизированную технологию диагноза параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды для Европейской территории России по данным радиометра SEVIRI/Meteosat в оперативную работу ФГБУ «НИЦ «Планета», а выходную продукцию – в оперативную работу ОМП ФГБУ «Центрально-Черноземное УГМС» в качестве вспомогательного материала в теплый период года и консультативного – в холодный период года. В оперативную работу ОМП ФГБУ «Северное УГМС» «Вологодский ЦГМС» в качестве вспомогательного метода карты дешифрирования зон и типа осадков – для всех сезонов года, интенсивности осадков, зон гроз и града – для весенне-летнего периода; в качестве консультативных – карты интенсивности осадков для осенне-зимнего периода и типа облачности для всех сезонов года.

Ключевые слова: диагноз, параметры облачного покрова, осадки, опасные явления погоды, европейская территория России, радиометр SEVIRI/Meteosat

Табл. 5. Ил. 13. Библ. 4.

Методическое пособие по созданию карт морского ледяного покрова на основе спутниковых данных оптического, инфракрасного и микроволнового диапазонов в многофункциональной программной среде «PlanetaMultiSat» / Волгутов Р.В., Кровотынцев В.А., Максимов А.А., Тренина И.С. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2021. – Информационный сборник № 48. – С. 89-95.

Методическое пособие по созданию карт морского ледяного покрова на основе спутниковых данных оптического, инфракрасного и микроволнового диапазонов в многофункциональной программной среде «PlanetaMultiSat» основано на сочетании методических положений, выпущенных в 70–80-е годы прошлого столетия, и современных сведений, полученных на опыте использования информации с новых космических аппаратов, новой бортовой аппаратуры, в т. ч. высокого пространственного разрешения (включая радиолокационной), а также более, чем тридцатилетнем опыте проведения в НИЦ «Планета» космического мониторинга морского ледяного покрова Арктики, Антарктики и замерзающих морей России, включающего построение ледовых карт.

В пособии приведены уточненные характеристики отечественной и зарубежной аппаратуры ДЗЗ, используемой для мониторинга ледовой обстановки. Рассмотрены современные принципы визуального (интерактивного) дешифрирования ледовых объектов с использованием комплексирования спутниковых данных в различных спектральных диапазонах и разного пространственного разрешения. Приведен расширенный перечень характеристик морского льда, включая опасные ледовые явления (торосы, гряды торосов, стамухи, мелкие айсберги и др.), определяемых на спутниковых изображениях. Изложены этапы практической технологии построения ледовых карт, реализованной в многофункциональной программной среде «PlanetaMultiSat».

Методическое пособие является руководством для специалистов гидрометеорологов при составлении ледовых карт по спутниковым данным оптического, инфракрасного и микроволнового диапазонов, а также для студентов и аспирантов океанографических специальностей.

ЦМКП Росгидромета на заседании от 6 ноября 2020 г. рекомендовала материалы Методического пособия для использования в практике работы учреждений и НИУ Росгидромета.

Ключевые слова: методическое пособие, спутниковый мониторинг, ледяной покров, карты ледовой обстановки

Ил. 5. Библ. 5.

УДК 631.559:633.11

Результаты испытания метода долгосрочного прогноза валового сбора зерновых и зернобобовых культур в целом по федеральным округам и России в целом / Лебедева В.М., Береза О.В. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2021. – Информационный сборник № 48. – С. 96-102.

Кратко излагаются результаты авторских и производственных испытаний синоптико-статистического метода долгосрочного прогноза урожайности зерновых и зернобобовых культур по федеральным округам и России в целом в ФГБУ «Гидрометцентр России». В основе синоптико-статистического метода лежит использование длиннопериодных связей параметров циркуляции атмосферы Северного полушария в вегетационный период с параметрами циркуляции предшествующего осенне-зимнего периода. Заблаговременность прогноза увеличена на один месяц по сравнению с ранее разработанным методом, прогноз составляется в феврале.

Ключевые слова: метод, долгосрочный прогноз валового сбора, зерновые и зернобобовые культуры, циркуляция атмосферы, температура поверхности океанов, синоптико-статистический метод, оправдываемость метода, результаты испытаний

Табл. 2. Ил. 1. Библ. 15.

УДК 631.559:551.509.32

Результаты испытания автоматизированной технологии составления оценок условий вегетации и прогноза урожайности озимой пшеницы по субъектам Российской Федерации / Лебедева В.М., Береза О.В. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2021. – Информационный сборник № 48. – С. 103-114.

В статье рассмотрены результаты авторских и производственных испытаний автоматизированной технологии составления оценок условий вегетации и прогноза урожайности озимой пшеницы по субъектам Российской Федерации в составе ранее внедренной информационно-прогностической системы в Гидрометцентре России.

В качестве базовой модели для разработки метода прогноза урожайности озимой пшеницы используется динамико-статистическая модель «погода – урожай», разработанная в ФГБУ «ВНИИСХМ». Технология предназначена для составления прогнозов урожайности озимой пшеницы по 44 субъектам Российской Федерации в установленные Росгидрометом сроки в оперативном режиме в Гидрометцентре России. Вместе с тем методы прогноза урожайности озимой пшеницы успешно прошли испытания и внедрены для 30 субъектов в семи региональных оперативных подразделениях Росгидромета.

Ключевые слова: автоматизированная система, динамико-статистическая модель «погода – урожай», прогноз урожайности, субъект, озимая пшеница, испытания, оправдываемость метода, результаты испытаний

Табл. 3. Ил. 4. Библ. 11.

УДК 631.559:551.509.32

Результаты испытания автоматизированной технологии составления оценки условий вегетации и прогноза урожайности ярового ячменя по субъектам Российской Федерации в Гидрометцентре России / Лебедева В.М., Найдина Т.А., Береза О.В. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2021. – Информационный сборник № 48. – С. 115-127.

Представлены результаты авторских и производственных испытаний в Гидрометцентре России автоматизированной технологии составления оценки условий вегетации и прогноза урожайности ярового ячменя по субъектам Российской Федерации с заблаговременностью 1–2 месяца в рамках информационно-прогностической системы (ИПС). ИПС позволяет на базе персонального компьютера осуществлять обработку декадных телеграмм, ежедекадно получать оценку условий вегетационного периода и проводить расчеты ожидаемой урожайности сельскохозяйственных культур по субъектам Российской Федерации в сроки, установленные Планом выпуска основных агрометеорологических прогнозов и докладов.

Ключевые слова: автоматизированная система, динамико-статистическая модель «погода – урожай», прогноз урожайности, субъект, яровой ячмень, испытания, оправдываемость метода, результаты испытаний

Табл. 4. Ил. 1. Библ. 12.

УДК 551.326.032(268)

144

Метод долгосрочного прогноза дрейфа льда в Арктическом бассейне с заблаговременностью от трех месяцев / Дымент Л.Н., Лосев С.М. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2021. – Информационный сборник № 48. – С. 128-138.

В результате анализа месячных полей скорости дрейфа льда установлено, что повторяемость антициклонических вихревых образований в них в течение годового ледового цикла может служить численным показателем, позволяющим выделять схожие поля скорости дрейфа. На этом основании совокупность лет с исходными данными разделена на три группы по величине повторяемости антициклонических круговоротов в месячных полях скорости дрейфа льда. Прогностический расчет перемещения льда выполняется по месячным полям той из них, значения повторяемости которой будут, как ожидается, в большей мере соответствовать повторяемости текущего годового ледового цикла. Изложены технологии выбора аналоговой группы лет и прогностического расчета перемещения льда по месячным полям скорости дрейфа за выбранные аналоговые годы. Представлены результаты диагностики и испытания метода, полученные с учетом эллипса допустимой погрешности.

Ключевые слова: Арктический бассейн, скорость дрейфа льда, долгосрочный прогноз, технология выбора аналоговой группы лет, месячные поля скорости дрейфа, результаты испытаний

Табл. 5. Ил. 2. Библ. 3.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Цырульников М.Д., Свиренко П.И., Гайфулин Д.Р., Багров А.Н.</i> Новая технология глобального вариационного анализа с горизонтальным разрешением 0,25 град. и вертикальными уровнями до 1 гПа	3
<i>Муравьев А.В., Киктев Д.Б., Смирнов А.В.</i> Усовершенствованная технология радиолокационного наукастинга осадков и результаты верификации в теплый период года (май – сентябрь 2020 г.)	13
<i>Калмыкова О.В.</i> Методика оценки смерчопасности вблизи Черноморского побережья России и результаты ее испытаний	42
<i>Адаренко Е.А., Шепоренко Г.А., Здерова М.Я., Токарев В.М., Хлучина Н.А., Воробьева Л.П.</i> Результаты оперативного испытания технологии прогноза гроз в Урало-Сибирском регионе с заблаговременностью до 60 часов	62
<i>Волкова Е.В., Кухарский А.В., Санникова Г.В., Павлов И.Н.</i> Валидация автоматизированной технологии диагноза параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды по данным радиометра SEVIRI с геостационарных метеоспутников серии Meteosat MSG	72
<i>Волгутов Р.В., Кровотынцев В.А., Максимов А.А., Тренина И.С.</i> Методическое пособие по созданию карт морского ледяного покрова на основе спутниковых данных оптического, инфракрасного и микроволнового диапазонов в многофункциональной программной среде «PlanetaMultiSat»	89
<i>Лебедева В.М., Береза О.В.</i> Результаты испытания метода долгосрочного прогноза валового сбора зерновых и зернобобовых культур в целом по федеральным округам и России в целом	96
<i>Лебедева В.М., Береза О.В.</i> Результаты испытания автоматизированной технологии составления оценок условий вегетации и прогноза урожайности озимой пшеницы по субъектам Российской Федерации	103
<i>Лебедева В.М., Найдина Т.А., Береза О.В.</i> Результаты испытания автоматизированной технологии составления оценки условий вегетации и прогноза урожайности ярового ячменя по субъектам Российской Федерации в Гидрометцентре России	115
<i>Дымент Л.Н., Лосев С.М.</i> Метод долгосрочного прогноза дрейфа льда в Арктическом бассейне с заблаговременностью от трех месяцев	128