

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

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

ИНФОРМАЦИОННЫЙ СБОРНИК

№ 51

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

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

УДК 551.5

Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов / под редакцией канд. геогр. наук А.А. Алексеевой. – 2024. – **Информационный сборник № 51.** – 128 с.

Изложены основы и результаты испытания научных разработок, решениями Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета рекомендованных к внедрению в оперативную практику. В первой статье представлены основы технологии среднесрочного прогноза на основе модели ПЛАВ10 с горизонтальным разрешением около 10 км и результаты оперативных испытаний. Во второй статье рассматриваются основы и результаты оперативных испытаний технологии детализированных по времени ансамблевых долгосрочных прогнозов с еженедельной дискретностью выпуска на основе модели ПЛАВ072L96. Следующие две статьи посвящены сезонному метеорологическому прогнозу и сверхдолгосрочному прогнозированию состояния климатической системы на основе климатической модели ИВМ РАН INM-CM5. В статьях по агрометеорологии излагаются результаты производственных испытаний метода долгосрочного прогноза урожайности и валового сбора ярового ячменя по федеральным округам и России в целом, технологии оценки условий вегетации и прогноза урожайности гречихи по субъектам Российской Федерации, а также прогноза урожайности картофеля по Иркутской области. Статьи по гидрологии освещают основы и результаты испытания методик краткосрочного и среднесрочного прогноза расходов и уровней воды на реках бассейнов Тобола и Дона. В двух статьях морской тематики излагаются результаты испытания систем (технологических линий) прогноза волнения в бухте Нагаева Охотского моря с заблаговременностью до 5 суток и волнения в прибрежных районах Восточной Арктики.

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

ISBN 978-5-9908623-7-1

*М.А. Толстых^{1,2}, Р.Ю. Фадеев^{1,2}, В.В. Шашкин^{1,2},
Г.С. Гойман^{1,2}, С.В. Травова¹, Р.Б. Зарипов¹, К.А. Алипова¹,
В.С. Рогутов¹, В.Г. Мизяк¹, А.Н. Багров¹, М.А. Трубина¹*

Технология среднесрочного прогноза на основе модели ПЛАВ10 с горизонтальным разрешением около 10 км

¹*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр*

Российской Федерации, г. Москва;

²*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, г. Москва*

Введение

В ФГБУ «Гидрометцентр России» совместно с ФГБУН «Институт вычислительной математики имени Г.И. Марчука РАН» разработана глобальная полулагранжева конечно-разностная модель прогноза полей в свободной атмосфере с заблаговременностью до 10 суток (ПЛАВ10). Разрешение модели составляет 0,1 градус по долготе, разрешение по широте меняется от 0,13 градусов в Южном полушарии до 0,08 градусов в умеренных широтах Северного полушария. Модель имеет 104 уровня по вертикали (верхний расчетный уровень модели расположен на 0,06 гПа).

Модель ПЛАВ10 представляет собой существенно усовершенствованную версию глобальной оперативной модели ПЛАВ20 [5, 6]. По сравнению с ПЛАВ20, в блоке параметризаций процессов подсеточного масштаба внедрены параметризация торможения гравитационных волн неорографического происхождения в стратосфере, описание подынверсионной облачности, усовершенствованное описание переноса импульса глубокой конвекцией, ряд уточнений в описании процессов на поверхности. Существенно усовершенствована параллельная программная реализация модели [3], в том числе внедрен параллельный ввод/вывод, а почти все файлы данных используют самодокументируемый международный стандарт netCDF, реализованный на основе свободно распространяемого ПО.

Впервые в России достигнуто разрешение глобальной модели численного прогноза погоды, соответствующее среднему мировому уровню (горизонтальное разрешение ПЛАВ10 повышено в 2,25 раза по сравнению с оперативной моделью ПЛАВ20).

1. Технология расчета прогнозов

В качестве начальных данных при расчете прогнозов полулагранжевой модели с переменным шагом сетки ПЛАВ используются поля оперативного объективного анализа на стандартных изобарических поверхностях с горизонтальным разрешением 0,5 градусов по долготе и широте [7], объективные анализы температуры и относительной влажности на уровне 2 м и в почве собственной разработки [1, 2], а также объективные анализы NCEP высоты снежного покрова, температуры поверхности океана на модельной сетке. Блок подготовки начальных данных для расчета в целом соответствует работе [4] с учетом сетки модели. Модель работает на высокопроизводительном вычислительном комплексе Cray XC40 ГВЦ Росгидромета и записывает выходную продукцию в базы системы АСООИ Гидрометцентра России SLMG и SLMH. Время расчета прогноза на 24 часа составляет 14 минут на 2916 процессорных ядрах. Система постобработки включает усовершенствованный генератор метеограмм, ранее реализованный для модели ПЛАВ20, а также утилиты сжатия файлов модельных прогнозов в формате NetCDF с использованием стандарта HDF5.

Оперативные испытания технологии среднесрочного прогноза на основе модели ПЛАВ10 были начаты в апреле 2022 года. Ежедневно рассчитывались прогноз заблаговременностью 5 суток со срока 00 ч ВСВ и прогноз заблаговременностью 10 суток со срока 12 ч ВСВ.

В сентябре 2022 года в климатических файлах модели были исправлены досадные ошибки полей растительности и динамической и термической длин шероховатости. Это позволило заметно уменьшить ошибки прогноза. В итоге, оценка технологии среднесрочных прогнозов на основе модели ПЛАВ10 была произведена для периода с октября 2022 года по апрель 2023 года по исходным данным за сроки 00 и 12 ч ВСВ.

2. Методика и результаты испытаний

В ходе испытаний отмечена достаточно высокая надежность технологии расчета прогнозов, получаемых с помощью модели ПЛАВ10.

Вычислялись стандартизованные оценки: средние, средние абсолютные и среднеквадратические ошибки полей геопотенциала, температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра на стандартных изобарических поверхностях 850, 500 и 250 гПа (в соответствии с требованиями [8]) и давления на уровне моря, корреляции аномалий прогнозов геопотенциала, температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра, градиентная ошибка прогнозов высоты поверхности 500 гПа (H500), среднеквадратическая векторная ошибка прогноза ветра на стандартных уровнях

оценки. Оценки проводились по полям оперативного объективного анализа Гидрометцентра России (на сетке $1,5^\circ \times 1,5^\circ$) [7]. Поля модели ПЛАВ10 интерполировались на эту сетку методом интерполяции со взвешиванием по области, в соответствии с требованиями [8]. Дополнительно делалась оценка приземных полей по станциям Европейской территории России (ЕТР). В оценке участвовало около 800 станций. Для ЕТР по наблюдениям на станциях рассчитывались: среднеквадратичные ошибки прогнозов давления на уровне моря P_0 , абсолютные ошибки прогнозов приземной температуры T_z и точки росы T_d , а также среднеквадратичные векторные ошибки прогнозов приземного ветра. Кроме того, проводилась оценка оправдываемости прогнозов количества осадков в целом и по градациям. Оценка прогнозов осадков делалась по территории так называемой первой метеозоны. Это 16 областей ЕТР, включая Московскую область, т. е. это те области, где 12-часовые суммы осадков измеряются в 06 и 18 ч ВСВ. Предварительно из испытаний были исключены около 20 станций с этой территории, которые постоянно сообщали значение «без осадков» вместо «отсутствие данных об осадках». Оправдываемость прогнозов осадков находилась по методике, описанной в [3]. Дополнительно вычислялись средние и средние абсолютные ошибки прогнозов количества осадков. В период испытаний производилось сравнение успешности прогнозов по данной модели с успешностью прогнозов по глобальной модели Гидрометцентра России ПЛАВ20, а также с прогнозами зарубежных метеоцентров: английского (UKMO), американского (NCEP), немецкого (ICON) и ЕЦСПП (ECMWF). В оценке приземных полей участвовала также модель COSMO-Ru6,6.

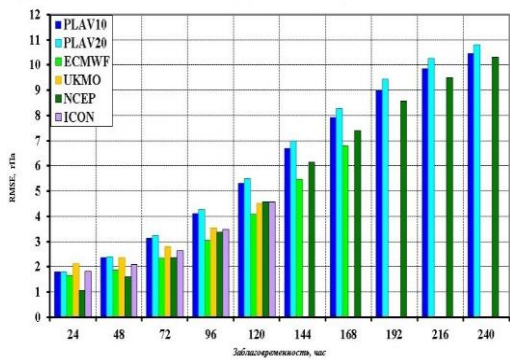
На рис. 1 представлена среднеквадратическая ошибка по территории внетропической части Северного полушария ($20-90^\circ$ с. ш.) для:

- давления на уровне моря;
- высоты на уровне 500 гПа;
- температуры на уровне 850 гПа;
- векторная ошибка ветра на уровне 250 гПа.

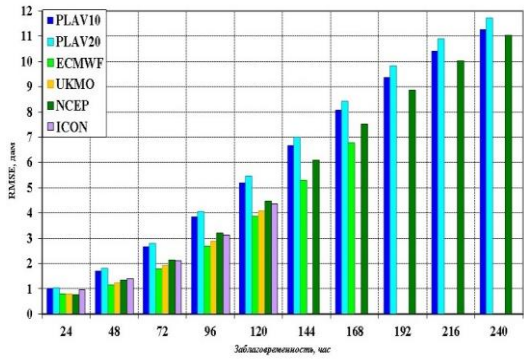
Заблаговременность прогнозов – до 10 суток. Исходный срок – 00 ч ВСВ для прогнозов на 1–5 сутки и 12 ч ВСВ для прогнозов на 6–10 сутки. Оценки по станциям делались для заблаговременностей до 120 часов.

Далее на рис. 2 представлены среднеквадратические ошибки по территории тропиков (20° ю. ш. – 20° с. ш.) для тех же полей, что и на рис. 1.

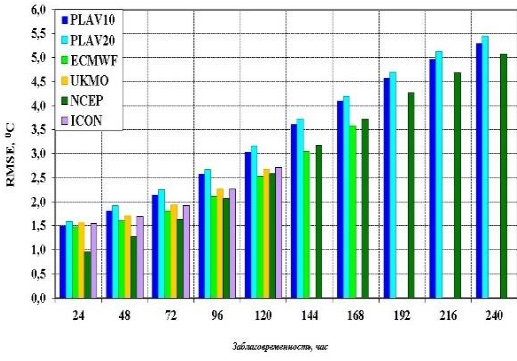
На рис. 3 представлены среднеквадратические ошибки прогноза давления на уровне моря, векторной ошибки ветра, температуры точки росы и абсолютной ошибки прогноза приземной температуры по станциям ЕТР. Заблаговременность прогнозов – до 3 суток. Исходный срок – 00 ч ВСВ.



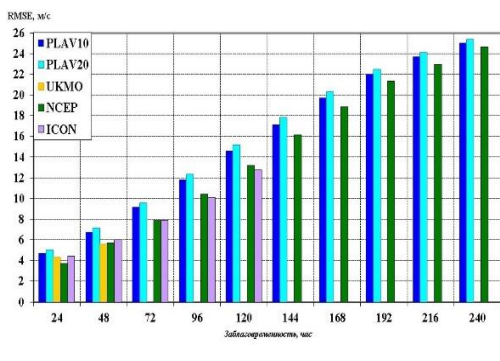
P₀



H500

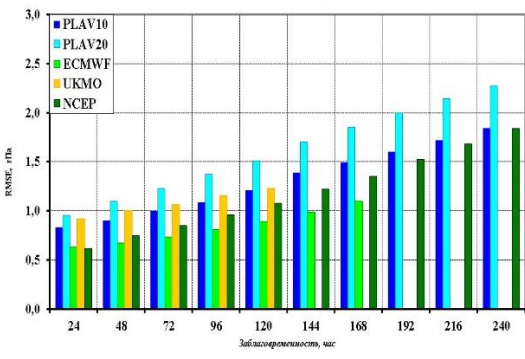


T850

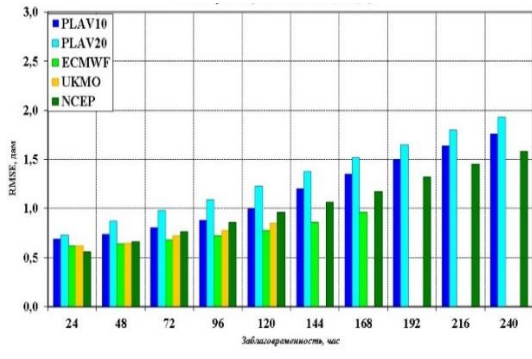


V250

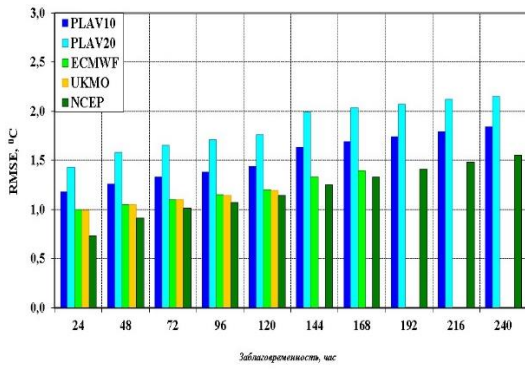
Рис. 1. Графики изменения среднеквадратической ошибки прогноза в зависимости от заблаговременности для внетропической части Северного полушария (20–90° с. ш.) по сетке 1,5°×1,5° (период 5 октября 2022 г. – 7 мая 2023 г.).



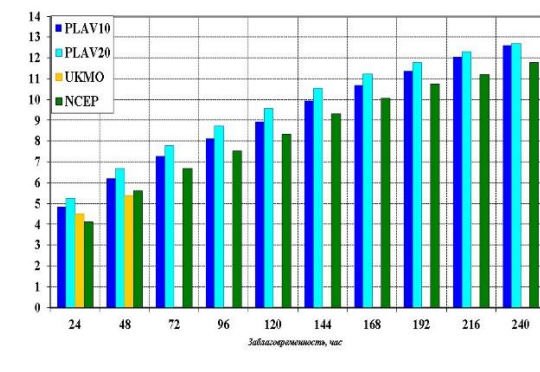
P₀



H500



T850



V250

Рис. 2. Графики изменения среднеквадратической ошибки прогноза в зависимости от заблаговременности для региона Тропики (20° ю. ш. – 20° с. ш.) по сетке 1,5°×1,5° (период 5 октября 2022 г. – 7 мая 2023 г.).

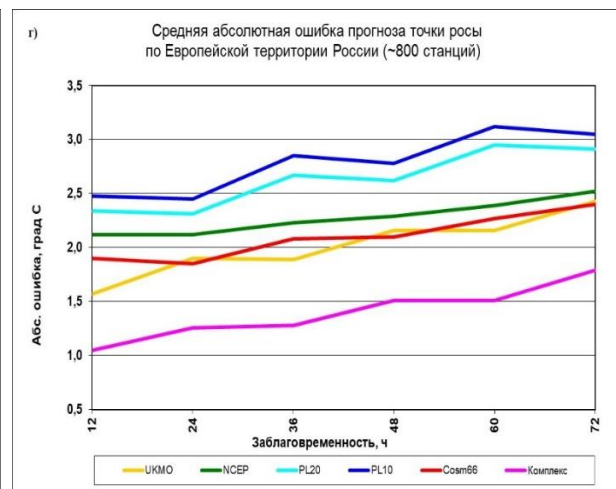
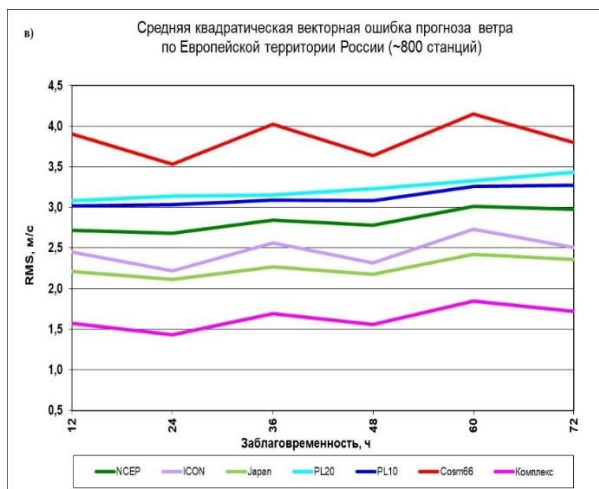
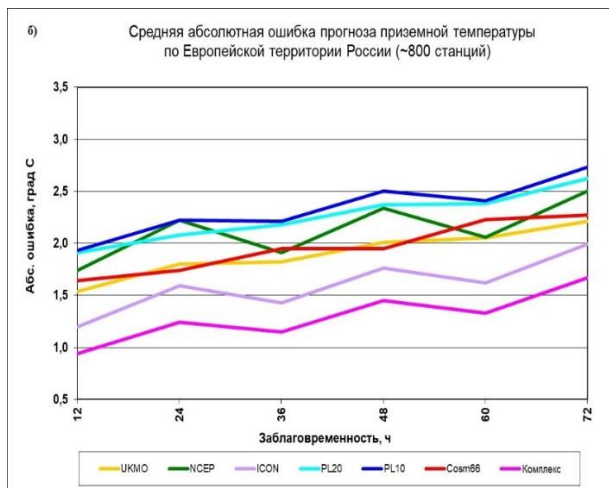
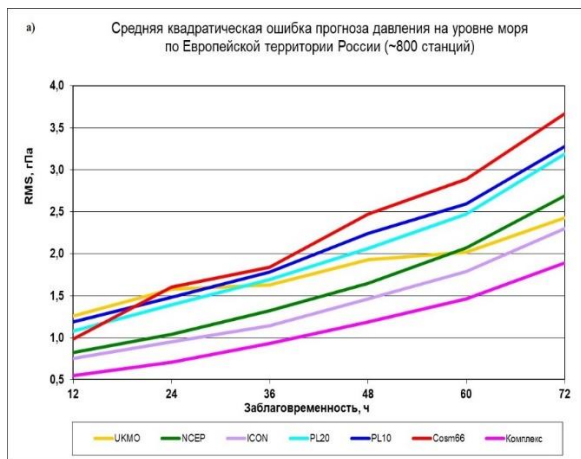


Рис. 3. Оценки по станциям ЕТР (за период ноябрь 2022 г. – апрель 2023 г.).

В табл. 1, 2 приведены разъяснения определения оправдываемости прогноза осадков.

Таблица 1

Оправдываемость прогноза количества жидких и смешанных осадков (мм/12 ч)

Прогноз количества осадков (мм/12 ч)	Р(%) при количестве фактически выпавших осадков за 12 ч, мм							
	Без осадков	0,0-0,2	0,3-2	3-14		15-29		≥30
				3-9	10-14	15-19	20-29	
Без осадков	100	75	50	0		0		0
0,0-0,2	100	100	75	0		0		0
0,3-2	50	100	100	50		0		0
3-14	0	0	50	100		50		25
15-29	0	0	0	50	100	100		75
≥30	0	0	0	25		75	100	100

Оправдываемость прогноза количества твердых осадков (мм/12 ч)

Прогноз количества осадков (мм/12 ч)	P(%) при количестве фактически выпавших осадков за 12 ч, мм							
	Без осадков	0,0-0,1	0,2-1	2-5		6-15		≥16
				2-3	4-5	6-11	12-15	
Без осадков	100	75	50	0		0		0
0,0-0,1	100	100	75	0		0		0
0,2-1	50	100	100	50		0		0
2-5	0	0	50	100		50		25
6-15	0	0	0	50	100	100		75
≥16	0	0	0	25		75	100	100

Результаты оценок прогноза осадков по модели ПЛАВ10 за указанный период представлены в табл. 3–5.

Таблица 3

Оценка прогноза осадков на 18 ч (мм/12ч). ЕТР, 1-я метеозона

Метод прогноза	Оправдываемость, %							Ошибки		Общее кол-во прогнозов
	P	Без осадков (дождь 0; снег 0)	Слабые (дождь: 0,1-0,2; снег: 0,1)	Небольшие (дождь: 0,3-2; снег: 0,2-1)	Умеренные (дождь: 3-9; снег: 2-5)	Сильные (дождь: 10-29; снег: 6-15)	Очень сильные (дождь: ≥30; снег: ≥16)	δ	δ	
УКМО	90	94	85	86	87	78	14	0,2	0,5	41217
NCER	89	93	83	84	86	80	27	0,2	0,5	36203
ICON	90	97	82	84	83	78	22	0,0	0,5	39815
JAPAN	88	93	84	83	86	74	0	0,1	0,5	41217
PLAV20	87	89	87	85	88	75	3	0,3	0,6	41217
PLAV10	87	90	84	84	87	77	7	0,2	0,6	38639
ECMW	87	97	81	85	62	45	0	-0,4	0,5	41217
Canada	88	96	85	89	65	52	0	-0,3	0,6	40504
Cosmo-6,6	89	94	84	84	84	79	24	0,1	0,5	35950
Cosmo-2,2	88	95	82	81	82	77	31	0,1	0,6	37803
Complex	90	97	83	83	85	78	25	0,1	0,5	41212
Кол-во случаев по градациям		20138	5760	9845	4894	550	29			

P - общая оправдываемость прогноза; δ - средняя арифметическая ошибка; |δ| - средняя абсолютная ошибка

Оценка прогноза осадков на 30 ч (мм/12ч). ЕТР, 1-я метеозона

Метод прогноза	Оправдываемость, %							Ошибки		Общее кол-во прогнозов
	Р	Без осадков (дождь 0; снег 0)	Слабые (дождь: 0,1-0,2; снег: 0,1)	Небольшие (дождь: 0,3-2; снег: 0,2-1)	Умеренные (дождь: 3-9; снег: 2-5)	Сильные (дождь: 10-29; снег: 6-15)	Очень сильные (дождь: >=30; снег: >=16)	δ	δ	
УКМО	89	93	85	85	85	77	15	0,2	0,6	41235
НСЕР	88	94	82	82	84	75	42	0,1	0,6	35543
ICON	88	96	81	81	82	77	15	0,0	0,5	39831
JAPAN	87	91	83	82	84	71	5	0,1	0,6	41000
PLAV20	87	90	84	83	85	76	19	0,2	0,6	41235
PLAV10	87	92	83	82	84	75	21	0,2	0,6	38656
ECMW	86	97	80	84	60	44	2	-0,4	0,6	41235
Canada	87	94	86	89	63	48	0	-0,3	0,6	41235
Cosmo-6,6	87	93	82	80	83	79	23	0,2	0,6	35971
Cosmo-2,2	86	93	81	78	79	73	17	0,2	0,7	37824
Complex	89	96	82	81	84	72	56	0,1	0,5	41220
Кол-во случаев по градациям		20669	5006	9919	5007	578	53			

Р - общая оправдываемость прогноза; δ - средняя арифметическая ошибка; |δ| - средняя абсолютная ошибка

Оценка прогноза осадков на 42 ч (мм/12ч). ЕТР, 1-я метеозона

Метод прогноза	Оправдываемость, %							Ошибки		Общее кол-во прогнозов
	Р	Без осадков (дождь 0; снег 0)	Слабые (дождь: 0,1-0,2; снег: 0,1)	Небольшие (дождь: 0,3-2; снег: 0,2-1)	Умеренные (дождь: 3-9; снег: 2-5)	Сильные (дождь: 10-29; снег: 6-15)	Очень сильные (дождь: >=30; снег: >=16)	δ	δ	
УКМО	87	92	83	84	82	73	10	0,2	0,6	40999
НСЕР	86	92	82	81	82	73	12	0,2	0,7	33239
ICON	87	95	81	81	79	70	10	0,1	0,6	39816
JAPAN	86	91	84	82	79	67	0	0,1	0,6	41218
PLAV20	85	86	84	83	83	67	17	0,3	0,8	41218
PLAV10	84	87	83	82	81	67	13	0,3	0,8	38647
ECMW	85	96	81	82	59	41	0	-0,4	0,6	41218
Canada	86	94	85	87	62	40	0	-0,3	0,6	40041
Cosmo-6,6	86	91	83	80	80	75	7	0,3	0,7	35717
Cosmo-2,2	85	91	80	78	79	74	3	0,3	0,7	37361
Complex	89	96	82	82	81	73	13	0,1	0,6	41214
Кол-во случаев по градациям		19954	5703	9824	4932	556	30			

Р - общая оправдываемость прогноза; δ - средняя арифметическая ошибка; |δ| - средняя абсолютная ошибка

Заключение

Испытания показали, что по всем территориям, по всем заблаговременностям и по всем характеристикам (кроме приземной температуры) оценки прогнозов модели ПЛАВ10 по полям объективного анализа на сетке 1.5 градуса оказались весьма близки или превосходили оценки по модели ПЛАВ20. Особенно ярко это превосходство проявилось в тропической зоне, а в остальных регионах преимущество ПЛАВ10 заметнее на уровне 250 гПа, чем вблизи поверхности, где преимущество незаметно для заблаговременностей прогноза 24, 48 и частично 72 часа. Также оценки приземных полей давления на уровне моря, приземной температуры и дефицита точки росы по станциям для ЕТР оказались несколько хуже, чем по модели ПЛАВ20, а приземного ветра – несколько лучше. Оценки осадков по обоим моделям оказались весьма близки между собой и примерно соответствовали всем другим моделям.

Отмечено, что модели ПЛАВ10 и ПЛАВ20 имеют определенное отставание от лучших зарубежных глобальных моделей.

Решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 25 мая 2023 года представленная технология среднесрочного прогноза на основе модели ПЛАВ10 с горизонтальным разрешением около 10 км рекомендована к внедрению в качестве основного расчетного метода среднесрочного прогноза в ФГБУ «Гидрометцентр России».

Работы по развитию модели ПЛАВ10 выполнялись в рамках Плана НИТР Росгидромета (тема 1.1.2.1 2017–2019 и 2020–2024 гг.), а также гранта РНФ 21-71-30023, финансируемого в ИВМ РАН.

Список литературы

1. Богословский Н.Н., Толстых М.А. Реализация схемы усвоения для почвенных переменных в глобальной полулагранжевой модели прогноза погоды // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11. Спец. выпуск. Ч. 3. – С. 20–25.
2. Богословский Н.Н., Шляева А.В., Толстых М.А. Усвоение почвенных и приземных переменных в глобальной полулагранжевой модели прогноза погоды // Вычислительные технологии. – 2008. – Т. 13. Спец. выпуск. – С. 111–116.
3. РД 52.27.724–2019. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. – 65 с. – <https://meteoinfo.ru/images/media/books-docs/RHM/nast-KPP-2019.pdf>
4. Толстых М.А., Богословский Н.Н., Шляева А.В., Мизяк В.Г. Оперативная технология расчета глобальных прогнозов с помощью полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С. 170–180.

5. Толстых М.А., Шашкин В.В., Фадеев Р.Ю., Шляева А.В., Мизяк В.Г., Рогутов В.С., Богословский Н.Н., Гойман Г.С., Махнорылова С.В., Юрова А.Ю. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза / Рец. д.ф.-м.н. Старченко А.В. – М.: Триада лтд, 2017. – 166 с.

6. Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Гойман Г.С., Зарипов Р.Б., Киктев Д.Б., Махнорылова С.В., Мизяк В.С., Рогутов В.С. Многомасштабная глобальная модель атмосферы ПЛАВ: результаты среднесрочных прогнозов погоды // Метеорология и гидрология. – 2018. – № 11. – С. 90–99.

7. 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.

8. Manual on the Global Data-processing and Forecasting System. // Annex IV to the WMO Technical Regulations. – 2019. – Updated in 2021. – Vol. 485. – WMO, Geneva (Switzerland).

9. Tolstykh M.A., Goyman G.S., Fadeev R.Y., Shashkin V.V. Implementation of SL-AV Global Atmosphere Model with 10 km Horizontal Resolution / Voevodin V., Sobolev S. (eds) Supercomputing. RuSCDays 2020 // Communications in Computer and Information Science. – 2020. – Vol. 1331. – Springer, Cham. – DOI: 10.1007/978-3-030-64616-5_19

10. Tolstykh M.A., Goyman G.S., Fadeev R.Y., Travova S.V., Shashkin V.V. Development of the global multiscale atmosphere model: computational aspects // J. Phys.: Conf. Ser. – 2021. – Vol. 1740. – DOI:10.1088/1742-6596/1740/1/012074

*М.А. Толстых^{1,2}, Р.Ю. Фадеев^{1,2},
В.В. Шашкин^{1,2}, С.В. Травова¹, Р.Б. Зарипов¹, В.Г. Мизяк¹,
В.С. Рогутин¹, Куликова И.А.¹, Круглова Е.Н., М.А. Трубина¹*

**Технология детализированных по времени ансамблевых
долгосрочных прогнозов с еженедельной дискретностью выпуска
на основе модели ПЛАВ072L96**

¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр

Российской Федерации, г. Москва;

² Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, г. Москва

Введение

В ФГБУ «Гидрометцентр России» совместно с ФГБУН «Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН» разработана версия глобальной полулагранжевой конечно-разностной модели ПЛАВ [4] для долгосрочного прогноза (ПЛАВ072L96). Разрешение модели составляет 0,9 градуса по долготе и 0,72 градуса по широте, 96 уровней по вертикали (верхний расчетный уровень модели расположен на 0,05 гПа). Модель ПЛАВ072L96 представляет собой существенно усовершенствованную версию глобальной оперативной модели долгосрочного прогноза ПЛАВ2008.

По сравнению с ПЛАВ2008, существенно повышено горизонтальное (в 1,5 раза) и вертикальное (более, чем в 3 раза) разрешение. В блоке параметризаций процессов подсеточного масштаба внедрены параметризация торможения гравитационных волн неорографического происхождения в стратосфере, описание подынверсионной облачности, усовершенствованное описание переноса импульса глубокой конвекцией, ряд уточнений добавлен в описании процессов на поверхности. В отличие от модели ПЛАВ2008, в модели ПЛАВ072L96 применяется модель многослойной почвы [2]. Подробное описание усовершенствований модели, в том числе ускорения программного комплекса модели, приводится в [5, 7–11].

1. Начальные данные для прогнозов и методика испытаний

В качестве начальных данных при расчете прогнозов модели ПЛАВ072L96 используются поля оперативного объективного анализа Гидрометцентра России на стандартных изобарических поверхностях с горизонтальным разрешением 0,5 градуса по долготе и широте [12], поля объективного анализа температуры и относительной влажности на уровне 2 метра и в почве собственной разработки [1], а также поля объективного анализа NCEP для высоты снежного покрова и температуры поверхности океана. Эти же начальные данные используются для модели ПЛАВ2008. Начальные данные для влагосодержания почвы на каждом из почвенных горизонтов подготавливаются упрощенным расширенным фильтром Калмана [6]. Технология подготовки начальных данных в остальном следует работе [3].

Для расчета ретроспективных прогнозов калибровочного ансамбля для модели ПЛАВ072L96 используются данные реанализа ERA5 [13], в то время как в модели ПЛАВ2008 для этого применяется более старый реанализ ERA-Interim. Модель работает на высокопроизводительном вычислительном комплексе Стру ХС40 ГВЦ Росгидромета. Время расчета прогноза на 4 месяца одного участника ансамбля составляет 75 мин на 128 процессорных ядрах. Размер ансамбля составляет 41 участник для оперативных прогнозов, 11 участников для прогнозов по ретроспективным данным калибровочного ансамбля (хайндкастов) за 1991–2015 гг. Ансамбль прогнозов рассчитывается еженедельно на 45 дней, при этом раз в месяц рассчитывались прогнозы на 4 месяца. Набор хайндкастов рассчитывается заранее в течение недели.

Модель ПЛАВ072L96 работает в оперативном режиме с конца января 2022 года. Некоторые оценки оперативных прогнозов за 2022 год, а также оценки исторических прогнозов при старте с 30 числа каждого месяца года, размещены на сайте seakc.meteinfo.ru. В рамках испытаний рассчитывались оценки оперативных долгосрочных прогнозов на основе модели ПЛАВ072L96 для периода с конца января 2023 года по август 2023 года, выпускаемых еженедельно, и соответствующих этим датам исторических прогнозов за период 1991–2014 гг. Оценивались прогнозы на 2–31 сутки и отдельно 1, 2, 3, 4 недели (2–8, 9–15, 16–22, 23–29 сутки). Дополнительно оценивался прогноз на месяц с двухнедельной заблаговременностью, т. е. 15–44 сутки. В соответствии с наставлением ВМО [14], на сетке с разрешением 1,5 градуса по долготе и широте оценивались прогнозы следующих метеорологических величин:

- давление на уровне моря (MSLP),
- высота на поверхности 500 гПа (H500),
- температура на поверхности 850 гПа (T850),

- приземная температура (T2M),
- осадки (PREC).

Для полей этих величин вычислялись следующие характеристики:

- а) средние за каждый вышеперечисленный период прогноза аномалии полей вышеуказанных величин;
- б) вероятности трех градаций средних за период аномалий (норма, выше/ниже нормы) этих же величин.

Успешность прогноза оценивалась по территориям: внетропическая часть Северного полушария (20–90° с. ш.), тропики (20° ю. ш. – 20° с. ш.), внетропическая часть Южного полушария (20–90° ю. ш.). В качестве климатического периода рассматривался период исторических прогнозов 1991–2015 гг., прогнозы сравнивались с данными реанализа ERA5.

Рассчитывались следующие стандартные критерии оценки успешности прогнозов:

- среднеквадратическая ошибка (RMSE);
- ACC – коэффициент корреляции аномалий прогностических и фактических полей;
- ROCA – площадь под кривой ROC, по градациям выше (ROCAa) и ниже (ROCAb) нормы.

Эталонные (фактические) данные для оценки прогнозов рассчитываются на основе среднесуточных полей реанализа ERA5. Оценки сеточного эталонного климата для расчета фактических аномалий рассчитывались за период 1991–2015 годов.

2. Результаты испытаний

Оценки прогнозов на первую неделю (дни со 2 по 8) показывают наиболее заметное преимущество модели ПЛАВ072L96. Далее преимущество в оценках прогнозов по неделям постепенно уменьшается и на четвертую неделю практически отсутствует.

Оценки прогнозов на месяц: для всех оцениваемых величин во всех регионах, кроме H500 и MSLP в тропиках, MSLP и T850 в Южном полушарии, среднеквадратические ошибки модели ПЛАВ072L96 меньше, чем модели ПЛАВ2008 (см. табл. 1). Значения коэффициента корреляции всех рассматриваемых величин и регионов оценки выше для модели ПЛАВ072L96, чем для ПЛАВ2008, для некоторых величин заметно (см. табл. 2). Выделяется повышение этого показателя в тропиках, особенно для давления на уровне моря. Однако лишь для давления на уровне моря в тропиках в ПЛАВ072L96 превышен порог практической полезности прогноза (0,6). Все различия статистически значимы.

Отметим, что оценки ROCAa и ROCAb для прогнозов, стартовавших в 2023 г., весьма близки к оценкам исторических прогнозов за период 1991–2015 годов.

Сравнение среднеквадратических ошибок исторических прогнозов различных метеорологических величин модели ПЛАВ2008 и модели ПЛАВ072L96

Переменная, регион	ПЛАВ2008	ПЛАВ072L96
H500 N20	4,15	3,92
H500 TR	1,26	1,97
H500 S20	4,48	4,29
MSLP N20	3,2	3,63
MSLP TR	1,91	1,65
MSLP S20	4,03	4,43
T850 N20	2,42	1,87
T850 TR	1,76	1,09
T850 S20	2,01	2,47
T2M N20	2,61	2,01
T2M TR	1,81	1,18
T2M S20	2,81	2,19

Примечание. Среднеквадратические ошибки полей высоты поверхности 500 гПа (H500), давления на уровне моря (MSLP), температуры на поверхности 850 гПа (T850), температуры на уровне 2 метра (T2M) по отношению к полям реанализа ERA5, осредненные по историческим прогнозам за 24 года. S20 – внетропическая часть Южного полушария, TR – тропики, N20 – внетропическая часть Северного полушария. Единицы измерения: H500 – дам, давление на уровне моря MSLP – гПа, T850 и T2M – градусы.

Статистическая значимость изменения показателей успешности прогнозов модели ПЛАВ072L96 по отношению к модели ПЛАВ2008 оценивалась методом бутстрэппинга. Для показателей ACC, ROCAa и ROCAb вычислялась серия разностей этого показателя: ПЛАВ072L96 минус ПЛАВ2008. Затем вышеуказанным методом бутстрэппинга вычислялся 95%-ный доверительный интервал средней разности (10000 выборок). Если нижняя граница доверительного интервала оказывается больше нуля, то считается, что новая модель значимо лучше.

Сравнение коэффициента корреляции аномалий исторических прогнозов
 модели ПЛАВ2008 и модели ПЛАВ072L96

Переменная, регион	ПЛАВ2008	ПЛАВ072L96
H500 TR	0.423	0.48
H500 S20	0.515	0.529
MSLP N20	0.453	0.47
MSLP TR	0.508	0.608
MSLP S20	0.482	0.498
T850 N20	0,475	0,504
T850 TR	0,373	0,474
T850 S20	0,47	0,486
T2M N20	0,486	0,546
T2M TR	0,531	0,568
T2M S20	0,462	0,508
PREC N20	0,251	0,287
PREC TR	0,217	0,284
PREC S20	0,303	0,325

Примечание. Коэффициент корреляции аномалий (ACC) для высоты поверхности 500 гПа (H500), давления на уровне моря (MSLP), температуры на поверхности 850 гПа (T850), температуры на уровне 2 метра (T2M), осадков (PREC) по отношению к полям реанализа ERA5, осредненные по историческим прогнозам за 24 года. S20 – внетропическая часть Южного полушария, TR – тропики, N20 – внетропическая часть Северного полушария. Единицы измерения: H500 – дам, давление на уровне моря MSLP – гПа, T850 и T2M – градусы, осадки PREC (мм/сут).

Модель ПЛАВ072L96 характеризуется более высокими значениями показателей ROCAa и ROCAb, хотя разница для большинства величин и внетропических регионов невелика (см. табл. 3 и табл. 4). Все эти разницы являются статистически значимыми.

Отметим, что оценки ROCAa и ROCAb для прогнозов, стартовавших в 2023 году, весьма близки к оценкам исторических прогнозов за период 1991–2014 годов.

Таблица 3

Сравнение исторических прогнозов модели ПЛАВ2008 и модели ПЛАВ072L96 для критерия ROC градации выше нормы

Переменная, регион	ПЛАВ2008	ПЛАВ072L96
H500 TR	0,683	0,727
H500 S20	0,73	0,736
MSLP N20	0,707	0,724
MSLP TR	0,725	0,783
MSLP S20	0,716	0,722
T850 N20	0,704	0,719
T850 TR	0,656	0,711
T850 S20	0,714	0,715
T2M N20	0,746	0,763
T2M TR	0,742	0,764
T2M S20	0,771	0,78
PREC N20	0,618	0,629
PREC TR	0,621	0,654
PREC S20	0,632	0,636

Примечание. Оценки вероятностных прогнозов градации выше нормы ROCAa для полей высоты поверхности 500 гПа (H500), давления на уровне моря (MSLP), температуры на поверхности 850 гПа (T850), температуры на уровне 2 метра (T2M), осадков (PREC) по отношению к полям реанализа ERA5, осредненные по историческим прогнозам за 24 года. S20 – внетропическая часть Южного полушария, TR – тропики, N20 – внетропическая часть Северного полушария. Единицы измерения: H500 – дам, давление на уровне моря MSLP – гПа, T850 и T2M – градусы, осадки PREC (мм/сут).

Анализ аналогичных оценок для прогноза на месяц с заблаговременностью в 2 недели показывает, что все закономерности сохраняются, однако все показатели ухудшаются, а различия между двумя версиями модели становятся менее значимыми. Тем не менее для некоторых показателей модели ПЛАВ072L96 сохраняются значения оценок ROCAa и ROCAb более 0,7 (MSLP и T2M в тропиках).

Таблица 4

Сравнение оценок исторических прогнозов модели ПЛАВ2008 и модели ПЛАВ072L96 критерия ROC градации ниже нормы

Переменная, регион	ПЛАВ2008	ПЛАВ072L96
H500 TR	0,679	0,723
H500 S20	0,723	0,733
MSLP N20	0,705	0,726
MSLP TR	0,725	0,781
MSLP S20	0,709	0,722
T850 N20	0,708	0,724
T850 TR	0,663	0,723
T850 S20	0,713	0,717
T2M N20	0,743	0,766
T2M TR	0,754	0,777
T2M S20	0,768	0,78
PREC N20	0,622	0,632
PREC TR	0,622	0,66
PREC S20	0,641	0,646

Примечание. Оценки вероятностных прогнозов градации ниже нормы ROCAb для полей высоты поверхности 500 гПа (H500), давления на уровне моря (MSLP), температуры на поверхности 850 гПа (T850), температуры на уровне 2 метра (T2M), осадков (PREC) по отношению к полям реанализа ERA5, осредненные по историческим прогнозам за 24 года. S20 – внетропическая часть Южного полушария, TR – тропики, N20 – внетропическая часть Северного полушария. Единицы измерения: H500 – дам, давление на уровне моря MSLP – гПа, T850 и T2M – градусы, осадки PREC (мм/сут).

Заключение

В ходе испытаний модель ПЛАВ072L96 показала преимущество перед моделью ПЛАВ2008. По результатам испытаний модель ПЛАВ072L96 решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 22.11.2023 рекомендована к внедрению в оперативную практику Гидрометцентра России и Северо-Евразийского климатического центра в качестве основного метода субсезонного прогнозирования с недельной дискретностью, а также при построении мультимодельных ансамблей сезонных прогнозов Росгидромета. Авторам рекомендовано продолжить работы по развитию совместной модели атмосферы, океана и морского льда на основе модели ПЛАВ072L96.

Работы по развитию модели ПЛАВ10 выполнялись в рамках Плана НИТР Росгидромета (тема 1.1.2.1 2017–2019 и 2020–2024 гг.). Часть работ по развитию модели была выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (№ 21-17-00254, <https://rscf.ru/project/21-17-00254/>).

Список литературы

1. Богословский Н.Н., Шляева А.В., Толстых М.А. Усвоение почвенных и приземных переменных в глобальной полулагранжевой модели прогноза погоды // Вычислительные технологии. – 2008. – Т. 13. Спец. выпуск. – С. 111–116.
2. Володин Е.М., Лыкосов В.Н. Параметризация процессов тепло- и влагообмена в системе растительность - почва для моделирования общей циркуляции атмосферы. 1. Описание и расчеты с использованием локальных данных // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 1998. – Т. 34. – № 4. – С. 453–465.
3. Толстых М.А., Богословский Н.Н., Шляева А.В., Мизяк В.Г. Оперативная технология расчета глобальных прогнозов с помощью полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С. 170–180.
4. Толстых М.А., Шашкин В.В., Фадеев Р.Ю., Шляева А.В., Мизяк В.Г., Рогутов В.С., Богословский Н.Н., Гойман Г.С., Махнорьлова С.В., Юрова А.Ю. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза / Рец. д.ф.-м.н. Старченко А.В. – М.: ТРИАДА ЛТД, 2017. – 166 с.
5. Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Зарипов Р.Б., Травова С.В., Гойман Г.С., Алипова К.А., Мизяк В.Г., Тищенко В.А., Круглова Е.Н. Модель долгосрочного метеорологического прогноза ПЛАВ072L96 // Метеорология и гидрология. – 2024. Принято в печать.
6. Травова С.В., Толстых М.А. Усвоение данных приземных наблюдений для анализа влажности почвы многослойной модели деятельного слоя суши ИВМ РАН-МГУ в составе глобальной системы моделирования атмосферы ПЛАВ // Метеорология и гидрология. – 2022. – № 8. – С. 80–100.

7. *Фадеев Р.Ю., Толстых М.А., Володин Е.М.* Климатическая версия модели атмосферы ПЛАН: разработка и первые результаты // *Метеорология и гидрология*. – 2019. – № 1. – С. 22–35.
8. *Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Толстых М.А., Травова С.В., Мизяк В.Г., Розутов В.С., Алипова К.А.* Развитие системы долгосрочного прогноза Гидрометцентра России в 2020 году // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. – 2021. – № 1 (379). – С. 58–72.
9. *Фадеев Р.Ю.* Роль изменчивости скорости ветра подсеточного масштаба в задаче долгосрочного прогноза аномалий погоды // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. – 2023. – № 2 (388). – С. 35–54.
10. *Шашкин В.В., Толстых М.А., Володин Е.М.* Моделирование циркуляции стратосферы полулангранжевой моделью атмосферы ПЛАН // *Метеорология и гидрология*. – 2019. – № 1. – С. 5–21.
11. *Шашкин В.В., Фадеев Р.Ю., Толстых М.А., Кривоуцкий А.А., Банин М.В.* Воспроизведение процессов в стратосфере моделью общей циркуляции атмосферы ПЛАН072L96 // *Метеорология и гидрология*. – 2023. – № 6. – С. 5–20.
12. *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.
13. *Hersbach H. et al.* The ERA5 global reanalysis // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* – 2020. – Vol. 146. – P. 1999–2049.
14. *Manual on the Global Data-processing and Forecasting System.* // Annex IV to the WMO Technical Regulations. – 2019. – Updated in 2021. – Vol. 485. – WMO, Geneva (Switzerland).

*В.М. Хан^{1,2}, В.А. Тищенко^{1,2}, Е.Н. Круглова¹, А.В. Субботин¹, Ю.Д. Реснянский¹,
Е.М. Володин^{2,1}, А.С. Грицун², В.В. Воробьева^{2,1}, М.А. Тарасевич^{2,1}*

Система сезонного метеорологического прогноза на базе модели INM-CM5

*¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва;*

² Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, г. Москва

Введение

В рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (ВИП ГЗ) в части «разработки глобальной модели Земной системы мирового уровня для исследовательских целей и сценарного прогнозирования климатических изменений, повышения точности климатических моделей и надежности климатических прогнозов» в соответствии с Планом мероприятий по реализации распоряжения Правительства Российской Федерации от 02.09.2022 № 2515-р, в ФГБУ «Гидрометцентр России» совместно с ФГБУН «Институт вычислительной математики имени Г.И. Марчука РАН» разработана система глобального ансамблевого сезонного прогноза на основе глобальной климатической модели INM-CM5.

21

Описание технологии

Технология ансамблевого прогноза построена на базе глобальной климатической модели INM-CM5 [6,7] и системы генерации ансамбля начальных состояний [8].

Модель состоит из блоков динамики атмосферы, аэрозольного блока, блока динамики океана и блока динамики и термодинамики морского льда. Разрешение модели в атмосферном блоке составляет $2^\circ \times 1.5^\circ$ по долготе и широте с 73 σ -уровнями до высоты около 60 км, а в океанском блоке – $0.5^\circ \times 0.25^\circ$ по долготе и широте с 40 σ -уровнями по вертикали. Модель участвует в программе CMIP6 по сравнению климатических моделей и показывает результаты, соответствующие лучшим современным моделям.

Для возможности проведения оперативных расчетов сезонных прогнозов на вычислительном комплексе Cray XC40-LC ФГБУ «ГВЦ Росгидромета», внедрена автоматизированная система построения начального состояния. Интегрирование ансамблевого прогноза происходит автоматически в несколько этапов, включающих создание начальных состояний для климатической модели ИВМ РАН на требуемую дату начала прогноза, запуск ансамбля прогнозов на вычислительном комплексе Cray XC40-LC и подготовку результатов прогноза для дальнейшей обработки и использования в Гидрометцентре России.

Начальные состояния атмосферы, океана и суши для сезонных прогнозов задаются в виде аномалий на момент старта прогноза, накладываемых на модельный климат. Такой подход обусловлен стремлением избежать резких изменений, вызванных большими отклонениями начального поля от состояния модели с приспособленной собственной динамикой.

Для создания начальных состояний на дату начала прогноза используются ежедневные данные реанализа ERA5 [4] для атмосферы и деятельного слоя суши, а также анализа SODA3.4.2 [3] (1991-2020 гг.) и GODAS HMC [2] (с 2021 г.) для океана и морского льда. Ансамбль начальных состояний (20 членов ансамбля) формируется путем внесения в начальное состояние температуры воздуха на всех σ -уровнях модели в каждой точке модельной сетки длинноволнового возмущения с амплитудой 0.1 К.

Расчеты с моделью INM-CM5 проводились на высокопроизводительном вычислительном комплексе (ВБК) Cray XC40-LC. На 1600 ядрах расчет 20 членов ансамбля сезонного прогноза на 6 месяцев выполняется за 7 часов. Результаты записываются в базу данных системы АССОИ Гидрометцентра России.

Протокол испытаний

Согласно Плану испытания новых и усовершенствованных технологий (методов) гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов Росгидромета на 2023 г., утвержденному руководителем Росгидромета, проводились оперативные испытания технологии на основе модели INM-CM5 для периода со II квартала 2021 г. по III квартал 2023 г., а также оценивались прогнозы на ретроспективной выборке за период с 1991 по 2020 г. В качестве объекта прогнозирования рассматривались среднемесячные и среднесезонные аномалии (с нулевой и одномесечной заблаговременностью) для нескольких метеорологических параметров, включая давление на уровне моря (MSLP), высоту геопотенциала 500 гПа (H500), температуру на уровне 850 гПа (T850) и у земной поверхности (T2м), а также осадки (PREC).

При проверке использовались следующие показатели для детерминистских прогнозов: ACC – коэффициент корреляции аномалий; ρ – показатель совпадения по знаку; $RMSE$ – среднеквадратическая ошибка прогноза; $MSSS$ – общий показатель качества (мера мастерства) для некатегориальных детерминистических прогнозов.

Оценка вероятностных прогнозов осуществлялась с помощью показателя ROC [1, 5]. Отдельно вычислялись показатели для категорий выше (ROC_A), около (ROC_N), ниже (ROC_B) нормы и по всем трем категориям (ROC_AG).

Обобщенная проверка прогнозов проводилась по всем узлам регулярной географической сетки с шагом по широте и долготе $2,5^\circ$ и осреднением по крупным регионам: территории земного шара, внетропической части Северного полушария ($20-90^\circ$ с. ш.), внетропической части Южного полушария ($20-90^\circ$ ю. ш.), тропической зоне (20° ю. ш. – 20° с. ш.), Северной Евразии ($35-75^\circ$ с. ш., $20^\circ - 180^\circ$ в. д.).

В период испытаний производилось сравнение успешности ансамблевых прогнозов по модели INM-CM5 с успешностью ансамблевых прогнозов зарубежных метеоцентров.

Результаты оценки ретроспективных прогнозов

В табл. 1, 3, 4, 5 и 6 приведены средние оценки ретроспективных прогнозов для H500, T2м, T850, MSLP, PREC по модели ИВМ РАН для всех стартовых дат за период 1991–2020 гг. В табл. 2 отдельно приведены оценки прогноза H500 для территории Северной Евразии.

Представлены оценки для каждого из четырех прогностических месяцев (в таблицах обозначены как мес1, мес2, мес3, мес4), а также для средних сезонных за 1–3, 2–4 прогностические месяцы (мес1–3, мес2–4).

В среднем качество прогнозов по модели ИВМ РАН рассматриваемых пяти параметров (табл. 1–6) по земному шару и по отдельно взятым регионам соответствует мировому уровню. Самая высокая успешность прогнозов по всем параметрам отмечается для тропической зоны. Значения критериев качества в тропиках заметно выше по сравнению с теми же критериями для других регионов. Наиболее низкие оценки качества, как и следовало ожидать, прослеживаются для территории Северной Евразии. Оценки для сезонных прогнозов с нулевой и месячной заблаговременностью заметным образом выше, чем для месячных прогнозов с заблаговременностью от 0 до 4 месяцев.

Из табл. 1 видно, что значения ACC для ретроспективных сезонных прогнозов с нулевой заблаговременностью превышают пороговое значение 0.36 с 95%-ным уровнем значимости для всех рассматриваемых регионов, кроме Северной Евразии. Но в то же время, если сравнивать успешность сезонных прогнозов H500 по территории Северной Евразии с некоторыми ведущими метеоцентрами, то оценки зарубежных моделей ECMWF, Met Office, NCEP имеют более низкие значения ACC в Северной Евразии (см. табл. 2).

Средние оценки качества ретроспективных прогнозов **H500** по модели
Земной системы ИВМ РАН за период 1991–2020 гг.

Месяц	Глобус	Внетроп. часть Южного полушария	Тропики	Внетроп. часть Северного полушария	Северная Евразия
<i>ACC</i>					
мес1	0.45	0.31	0.70	0.32	0.27
мес2	0.39	0.24	0.68	0.26	0.20
мес3	0.38	0.22	0.65	0.25	0.18
мес4	0.35	0.20	0.63	0.22	0.14
мес1-3	0.53	0.40	0.79	0.40	0.34
мес2-4	0.49	0.35	0.77	0.37	0.30
<i>ρ</i>					
мес1	0.31	0.20	0.50	0.22	0.17
мес2	0.27	0.15	0.49	0.17	0.13
мес3	0.25	0.14	0.46	0.16	0.11
мес4	0.24	0.13	0.44	0.14	0.09
мес1-3	0.37	0.26	0.59	0.27	0.22
мес2-4	0.35	0.22	0.58	0.23	0.19
<i>RMSE (мм)</i>					
мес1	2.64	4.12	0.56	3.18	3.79
мес2	2.64	3.99	0.57	3.28	3.89
мес3	2.70	3.85	0.63	3.54	4.17
мес4	2.81	3.70	0.70	3.95	4.55
мес1-3	1.66	2.47	0.41	2.05	2.35
мес2-4	1.72	2.42	0.46	2.24	2.54
<i>MSSS</i>					
мес1	0.05	0.05	0.42	0.04	0.04
мес2	0.08	0.08	0.45	0.08	0.08
мес3	0.09	0.08	0.42	0.09	0.08
мес4	0.09	0.07	0.39	0.08	0.07
мес1-3	0.16	0.15	0.62	0.13	0.13
мес2-4	0.15	0.13	0.59	0.14	0.13
<i>ROC_A</i>					
мес1	0.72	0.64	0.85	0.65	0.62
мес2	0.70	0.61	0.85	0.63	0.59
мес3	0.68	0.60	0.84	0.62	0.58
мес4	0.68	0.60	0.83	0.60	0.56
мес1-3	0.76	0.69	0.91	0.69	0.66
мес2-4	0.75	0.66	0.90	0.68	0.64
<i>ROC_N</i>					
мес1	0.58	0.53	0.66	0.54	0.52
мес2	0.56	0.52	0.65	0.52	0.52
мес3	0.56	0.52	0.63	0.52	0.52
мес4	0.56	0.52	0.62	0.52	0.52
мес1-3	0.61	0.55	0.73	0.55	0.54
мес2-4	0.60	0.54	0.70	0.54	0.53
<i>ROC_B</i>					
мес1	0.69	0.64	0.79	0.64	0.62
мес2	0.68	0.61	0.81	0.61	0.59
мес3	0.67	0.60	0.79	0.61	0.58
мес4	0.66	0.59	0.79	0.59	0.56
мес1-3	0.73	0.68	0.84	0.68	0.65
мес2-4	0.72	0.65	0.84	0.66	0.63

Значения *MSSS* для всех месячных и сезонных прогнозов положительные, что указывает на превосходство методического прогноза над прогнозом на основе климата. Значения *ROC* превышают 0.6 для крайних градаций и приближаются к 0.5 для градации «около нормы».

При анализе оценок для всех рассматриваемых параметров стоит отметить, что качество прогнозов снижается медленнее с увеличением заблаговременности в сравнении с другими мировыми и региональными центрами, специализирующимися в области долгосрочного метеорологического прогнозирования (ссылка: <https://wmo1c.org/>). Показатели *MSSS* во всех крупных районах, независимо от заблаговременности, имеют положительные значения, за исключением некоторых прогнозов с месячным осреднением. Это свидетельствует о высоком качестве прогнозов. Оценки вероятностных прогнозов по критерию *ROC* превышают 0.5, что указывает на преимущество методических прогнозов перед случайными.

Наиболее сложно прогнозируемым гидрометеорологическим параметром являются осадки. Как и ожидалось, оценки успешности осадков в сравнении с другими параметрами являются наиболее скромными. В табл. 6 представлены оценки с использованием разных критериев качества для осадков по отдельным регионам. Качество прогноза осадков в регионах схоже с качеством прогнозов для остальных параметров: наилучшие показатели отмечены в тропиках и наихудшие в Северной Евразии. Детерминистские прогнозы указывают на слабый прогностический сигнал для осадков. Оценки *ROC* для вероятностных прогнозов показывают, что качество прогнозов немного превышает качество случайных прогнозов. Этот уровень предсказуемости осадков в Северной Евразии характерен практически для всех мировых прогностических моделей.

Таблица 2

Оценки успешности прогнозов **H500** для территории Северной Евразии
по модели Земной системы ИВМ РАН и некоторым моделям мировых центров
по долгосрочным прогнозам

	Оценки детерминистских прогнозов по критерию <i>ACC</i>			
	мес1	мес2	мес3	мес1–3
Модель Земной системы ИВМ РАН	0.27	0.20	0.18	0.34
Модель Met Office	0.15	0.17	0.07	0.15
Модель ECMWF	0.23	0.16	0.18	0.30
Модель NCEP	0.12	0.12	0.0	0.15

Средние оценки качества ретроспективных прогнозов **MSLP** по модели
Земной системы ИВМ РАН за период 1991–2020 гг.

Месяц	Глобус	Внетроп. часть Южн. полушар.	Тропики	Внетроп. часть Сев. полушар.	Северная Евразия
<i>ACC</i>					
мес1	0.35	0.26	0.51	0.28	0.24
мес2	0.27	0.19	0.44	0.18	0.12
мес3	0.25	0.17	0.41	0.17	0.09
мес4	0.22	0.14	0.39	0.14	0.07
мес1-3	0.41	0.34	0.61	0.29	0.20
мес2-4	0.35	0.27	0.54	0.23	0.15
<i>ρ</i>					
мес1	0.23	0.18	0.34	0.18	0.16
мес2	0.17	0.12	0.27	0.12	0.08
мес3	0.15	0.11	0.25	0.11	0.06
мес4	0.14	0.10	0.24	0.09	0.03
мес1-3	0.27	0.22	0.39	0.19	0.13
мес2-4	0.21	0.17	0.34	0.14	0.08
<i>RMSE (rПа)</i>					
мес1	2.16	3.54	0.62	2.28	2.53
мес2	2.18	3.38	0.66	2.45	2.77
мес3	2.23	3.23	0.70	2.72	3.12
мес4	2.31	3.08	0.75	3.05	3.47
мес1-3	1.36	2.09	0.45	1.50	1.62
мес2-4	1.42	2.04	0.50	1.69	1.84
<i>MSSS</i>					
мес1	0.02	0.02	0.25	0.02	0.01
мес2	0.07	0.07	0.24	0.05	0.04
мес3	0.07	0.07	0.23	0.06	0.05
мес4	0.07	0.07	0.21	0.07	0.07
мес5	0.06	0.07	0.19	0.04	0.04
мес6	0.06	0.07	0.17	0.04	0.04
мес1-3	0.12	0.13	0.43	0.08	0.05
мес2-4	0.11	0.11	0.36	0.09	0.07
мес1-6	0.15	0.17	0.44	0.09	0.06
<i>ROC_A</i>					
мес1	0.66	0.62	0.74	0.63	0.62
мес2	0.63	0.59	0.70	0.59	0.56
мес3	0.61	0.57	0.69	0.58	0.54
мес4	0.60	0.57	0.67	0.56	0.53
мес1-3	0.69	0.66	0.78	0.63	0.59
мес2-4	0.66	0.63	0.75	0.60	0.56
<i>ROC_N</i>					
мес1	0.55	0.53	0.60	0.53	0.52
мес2	0.53	0.52	0.57	0.52	0.51
мес3	0.53	0.51	0.55	0.52	0.51
мес4	0.53	0.52	0.54	0.52	0.51
мес1-3	0.56	0.53	0.62	0.53	0.52
мес2-4	0.55	0.52	0.60	0.53	0.52
<i>ROC_B</i>					
мес1	0.65	0.62	0.72	0.63	0.60
мес2	0.61	0.58	0.69	0.57	0.54
мес3	0.61	0.57	0.67	0.58	0.54
мес4	0.60	0.56	0.67	0.56	0.52
мес1-3	0.68	0.65	0.77	0.63	0.59
мес2-4	0.65	0.61	0.74	0.60	0.55

Средние оценки качества ретроспективных прогнозов Т2м по модели
Земной системы ИВМ РАН за период 1991–2020 гг.

Месяц	Глобус	Внетроп. часть Южн. полушар.	Тропики	Внетроп. часть Северн.полушар.	Северная Евразия
<i>ACC</i>					
мес1	0.52	0.45	0.66	0.45	0.37
мес2	0.43	0.33	0.61	0.36	0.27
мес3	0.39	0.28	0.56	0.33	0.26
мес4	0.36	0.25	0.52	0.31	0.26
мес1-3	0.55	0.45	0.70	0.49	0.41
мес2-4	0.49	0.36	0.65	0.44	0.38
<i>ρ</i>					
мес1	0.37	0.31	0.47	0.32	0.25
мес2	0.30	0.23	0.41	0.24	0.18
мес3	0.26	0.19	0.37	0.21	0.17
мес4	0.24	0.17	0.34	0.21	0.18
мес1-3	0.38	0.32	0.50	0.33	0.28
мес2-4	0.33	0.25	0.44	0.29	0.25
<i>RMSE (°C)</i>					
мес1	0.82	0.96	0.38	1.11	1.49
мес2	0.84	0.93	0.40	1.19	1.63
мес3	0.88	0.90	0.42	1.31	1.81
мес4	0.92	0.86	0.45	1.45	2.00
мес1-3	0.60	0.66	0.31	0.83	1.08
мес2-4	0.64	0.65	0.34	0.92	1.21
<i>MSSS</i>					
мес1	0.04	-0.04	0.32	0.10	0.10
мес2	0.08	0.02	0.32	0.12	0.12
мес3	0.08	0.01	0.29	0.11	0.11
мес4	0.09	0.03	0.26	0.12	0.14
мес1-3	0.15	0.02	0.47	0.21	0.20
мес2-4	0.15	0.02	0.41	0.20	0.21
<i>ROC_A</i>					
мес1	0.73	0.71	0.79	0.70	0.66
мес2	0.70	0.66	0.78	0.66	0.61
мес3	0.68	0.63	0.75	0.64	0.61
мес4	0.66	0.62	0.73	0.64	0.60
мес1-3	0.75	0.71	0.82	0.72	0.68
мес2-4	0.72	0.67	0.79	0.69	0.66
<i>ROC_N</i>					
мес1	0.59	0.57	0.64	0.57	0.55
мес2	0.57	0.54	0.62	0.54	0.52
мес3	0.55	0.53	0.60	0.53	0.52
мес4	0.55	0.53	0.58	0.53	0.52
мес1-3	0.60	0.57	0.66	0.57	0.55
мес2-4	0.58	0.55	0.63	0.55	0.53
<i>ROC_B</i>					
мес1	0.73	0.70	0.79	0.71	0.68
мес2	0.70	0.66	0.77	0.67	0.63
мес3	0.68	0.64	0.75	0.65	0.62
мес4	0.66	0.62	0.73	0.64	0.62
мес1-3	0.75	0.71	0.82	0.73	0.70
мес2-4	0.72	0.67	0.79	0.71	0.68

Средние оценки качества ретроспективных прогнозов **T850** по модели
Земной системы ИВМ РАН за период 1991–2020 гг.

Месяц	Глобус	Внетроп. часть Южн. полушар.	Тропики	Внетроп. часть Северн. полушар.	Северная Евразия
<i>ACC</i>					
мес1	0.46	0.39	0.57	0.39	0.28
мес2	0.33	0.26	0.53	0.3	0.2
мес3	0.32	0.21	0.49	0.26	0.17
мес4	0.26	0.18	0.43	0.24	0.17
мес1-3	0.49	0.39	0.64	0.41	0.35
мес2-4	0.42	0.28	0.56	0.36	0.3
<i>ρ</i>					
мес1	0.31	0.27	0.42	0.25	0.18
мес2	0.23	0.18	0.34	0.19	0.12
мес3	0.18	0.12	0.33	0.15	0.12
мес4	0.19	0.12	0.29	0.14	0.14
мес1-3	0.33	0.25	0.45	0.27	0.23
мес2-4	0.27	0.18	0.36	0.24	0.17
<i>RMSE (°C)</i>					
мес1	0.92	1.02	0.47	1.19	1.58
мес2	0.89	1.01	0.5	1.26	1.72
мес3	0.98	0.99	0.46	1.35	1.85
мес4	1.01	0.89	0.54	1.51	2.03
мес1-3	0.66	0.71	0.36	0.92	1.1
мес2-4	0.68	0.74	0.41	0.95	1.27
<i>MSSS</i>					
мес1	0.01	-0.06	0.29	0.07	0.09
мес2	0.06	0	0.3	0.09	0.1
мес3	0.06	-0.02	0.25	0.07	0.08
мес4	0.07	0.01	0.23	0.11	0.09
мес1-3	0.1	0	0.43	0.19	0.17
мес2-4	0.1	0	0.37	0.16	0.18
<i>ROC_A</i>					
мес1	0.7	0.68	0.76	0.68	0.63
мес2	0.67	0.63	0.75	0.63	0.58
мес3	0.66	0.6	0.73	0.61	0.58
мес4	0.63	0.6	0.71	0.61	0.57
мес1-3	0.72	0.68	0.79	0.7	0.65
мес2-4	0.69	0.64	0.76	0.66	0.63
<i>ROC_N</i>					
мес1	0.58	0.56	0.62	0.56	0.54
мес2	0.55	0.53	0.6	0.53	0.51
мес3	0.54	0.51	0.59	0.51	0.51
мес4	0.53	0.52	0.56	0.51	0.5
мес1-3	0.59	0.56	0.65	0.56	0.54
мес2-4	0.56	0.54	0.61	0.53	0.52
<i>ROC_B</i>					
мес1	0.71	0.67	0.77	0.68	0.65
мес2	0.68	0.64	0.75	0.65	0.61
мес3	0.65	0.61	0.73	0.62	0.6
мес4	0.64	0.6	0.7	0.61	0.6
мес1-3	0.73	0.69	0.79	0.7	0.68
мес2-4	0.7	0.64	0.76	0.68	0.65

Средние оценки качества ретроспективных прогнозов **PREC** по модели
Земной системы ИВМ РАН за период 1991–2020 гг.

Месяц	Глобус	Внетроп. часть Южн. полушар.	Тропики	Внетроп. часть Северн.полушар.	Северная Евразия
<i>ACC</i>					
мес1	0.18	0.16	0.24	0.13	0.13
мес2	0.12	0.09	0.20	0.08	0.05
мес3	0.11	0.07	0.17	0.07	0.05
мес4	0.09	0.07	0.14	0.07	0.06
мес1-3	0.21	0.19	0.29	0.14	0.11
мес2-4	0.17	0.14	0.25	0.12	0.09
<i>ρ</i>					
мес1	0.14	0.12	0.19	0.12	0.10
мес2	0.09	0.07	0.15	0.06	0.04
мес3	0.08	0.06	0.13	0.06	0.04
мес4	0.07	0.05	0.10	0.06	0.04
мес1-3	0.15	0.13	0.21	0.11	0.08
мес2-4	0.12	0.10	0.17	0.09	0.06
<i>RMSE (мм)</i>					
мес1	1.23	0.85	1.76	1.06	0.91
мес2	1.16	0.79	1.65	1.00	0.84
мес3	1.18	0.81	1.71	0.98	0.79
мес4	1.21	0.86	1.78	0.95	0.71
мес1-3	0.76	0.49	1.15	0.61	0.51
мес2-4	0.77	0.50	1.19	0.59	0.47
<i>MSSS</i>					
мес1	-0.14	-0.05	-0.18	-0.11	-0.13
мес2	0.01	0.05	-0.00	0.03	0.00
мес3	0.03	0.05	0.02	0.04	0.01
мес4	0.04	0.05	0.03	0.04	0.00
мес1-3	0.06	0.07	0.07	0.01	-0.04
мес2-4	0.08	0.08	0.08	0.05	0.00
<i>ROC_A</i>					
мес1	0.59	0.58	0.62	0.57	0.56
мес2	0.56	0.54	0.60	0.54	0.53
мес3	0.55	0.54	0.58	0.54	0.53
мес4	0.55	0.53	0.57	0.54	0.53
мес1-3	0.60	0.59	0.64	0.57	0.56
мес2-4	0.58	0.56	0.62	0.56	0.55
<i>ROC_N</i>					
мес1	0.53	0.52	0.54	0.52	0.52
мес2	0.52	0.51	0.53	0.51	0.51
мес3	0.52	0.51	0.52	0.51	0.51
мес4	0.51	0.51	0.52	0.51	0.51
мес1-3	0.53	0.52	0.55	0.52	0.51
мес2-4	0.52	0.51	0.54	0.51	0.51
<i>ROC_B</i>					
мес1	0.58	0.58	0.60	0.56	0.56
мес2	0.55	0.54	0.57	0.53	0.53
мес3	0.54	0.53	0.55	0.53	0.52
мес4	0.53	0.53	0.54	0.52	0.52
мес1-3	0.59	0.59	0.63	0.57	0.55
мес2-4	0.57	0.57	0.60	0.56	0.54

Результаты оценки квазиоперативных прогнозов

Отмечается, что для оперативных прогнозов наблюдается та же особенность, что и для ретроспективных прогнозов – при увеличении прогностического периода качество прогнозов незначительно снижается. Исходя из табл. 7–10, разница в оценках качества между детерминистскими и вероятностными прогнозами для территории Северной Евразии и земного шара с прогнозным периодом 0 и 1 месяц варьирует в пределах случайной ошибки. Лучшие оценки получены для детерминистских прогнозов на 2022 год.

Таблица 7

Оценки качества квазиоперативных сезонных прогнозов **T2м**
с нулевой заблаговременностью по модели Земной системы ИВМ РАН
для территории **Северной Евразии** за период с июня 2021 по октябрь 2023 г.

Мес[/yr]	ACC	RMSE(°C)	MSSS	ROC_B	ROC_N	ROC_A	ROC_AG
JJA/2021	-0.14	0.98	0.23	0.73	0.54	0.76	0.68
JAS	0.10	0.77	0.32	0.44	0.41	0.39	0.41
ASO	-0.15	1.02	-0.13	0.43	0.48	0.49	0.47
SON	0.28	0.96	0.24	0.57	0.6	0.65	0.61
OND	0.14	1.54	-1.09	0.86	0.63	0.74	0.75
NDJ	0.39	1.22	-0.04	0.67	0.55	0.59	0.6
DJF	0.05	1.46	0.00	0.31	0.57	0.53	0.47
JFM/2022	0.23	1.45	0.14	0.43	0.62	0.54	0.53
FMA	0.47	1.26	0.18	0.62	0.61	0.64	0.62
MAM	0.43	1.10	0.31	0.77	0.63	0.77	0.72
AMJ	0.36	0.87	0.49	0.6	0.54	0.68	0.61
MJJ	0.40	0.80	0.46	0.61	0.57	0.69	0.62
JJA	-0.01	1.02	0.24	0.38	0.59	0.47	0.48
JAS	0.19	0.90	0.33	0.52	0.61	0.68	0.6
ASO	0.37	0.78	0.55	0.56	0.59	0.6	0.58
SON	0.04	1.01	0.17	0.46	0.52	0.55	0.51
OND	0.37	1.16	0.25	0.71	0.62	0.66	0.66
NDJ	0.15	1.68	-0.52	0.55	0.47	0.45	0.49
DJF	0.37	1.39	0.04	0.47	0.47	0.43	0.46
JFM/2023	-0.19	1.74	-0.25	0.32	0.24	0.17	0.24
FMA	-0.02	1.52	-0.18	0.18	0.59	0.51	0.43
MAM	-0.30	1.51	-0.51	0.38	0.45	0.49	0.44
AMJ	-0.06	1.18	-0.49	0.39	0.26	0.25	0.30
MJJ	0.16	0.88	0.16	0.70	0.45	0.48	0.54
JJA	-0.07	1.01	0.24	0.49	0.49	0.46	0.48
JAS	-0.08	1.01	0.48	0.46	0.58	0.57	0.53
ASO	-0.16	1.29	0.36	0.56	0.59	0.60	0.58

Коэффициент корреляции *ACC* для T2м по Северной Евразии для прогнозов с нулевой и месячной заблаговременностью варьируется в пределах от -0.3 до 0.47, *RMSE* в диапазоне от 0.77 до 1.74, *MSSS* в пределах от -1.1 до 0.55, *ROC_B* от 0.29 до 0.89, *ROC_N* от 0.19 до 0.7, *ROC_A* от 0.21 до 0.67.

Таблица 8

Оценки качества квазиоперативных сезонных прогнозов T2м с нулевой заблаговременностью по модели Земной системы ИВМ РАН для территории **земного шара** за период с июня 2021 по октябрь 2023 г.

Мес[/yr]	<i>ACC</i>	<i>RMSE</i> (°C)	<i>MSSS</i>	<i>ROC_B</i>	<i>ROC_N</i>	<i>ROC_A</i>	<i>ROC_AG</i>
JJA/2021	0.10	0.81	-0.08	0.58	0.49	0.6	0.56
JAS	0.29	0.66	0.12	0.54	0.56	0.65	0.59
ASO	0.19	0.83	0.09	0.54	0.57	0.64	0.58
SON	0.31	0.85	0.16	0.59	0.6	0.68	0.62
OND	0.34	0.94	0.01	0.68	0.58	0.71	0.66
NDJ	0.43	0.80	0.08	0.62	0.56	0.67	0.62
DJF	0.26	0.95	-0.09	0.67	0.52	0.65	0.62
JFM/2022	0.13	1.01	-0.23	0.5	0.53	0.53	0.51
FMA	0.42	0.91	-0.18	0.73	0.58	0.71	0.67
MAM	0.35	0.83	0.04	0.67	0.58	0.7	0.65
AMJ	0.45	0.71	0.24	0.67	0.57	0.65	0.63
MJJ	0.44	0.75	0.23	0.66	0.56	0.66	0.63
JJA	0.37	0.79	0.17	0.69	0.61	0.71	0.67
JAS	0.42	0.78	0.23	0.71	0.57	0.72	0.67
ASO	0.56	0.71	0.40	0.73	0.6	0.73	0.69
SON	0.53	0.74	0.35	0.71	0.57	0.72	0.67
OND	0.41	0.86	0.08	0.75	0.56	0.69	0.67
NDJ	0.31	0.99	-0.21	0.68	0.54	0.66	0.63
DJF	0.42	0.83	0.04	0.68	0.55	0.67	0.63
JFM/2023	0.07	1.02	-0.28	0.59	0.51	0.6	0.57
FMA	0.05	1.05	-0.23	0.59	0.52	0.59	0.57
MAM	0.12	1.00	-0.03	0.50	0.53	0.53	0.52
AMJ	0.33	0.94	0.20	0.62	0.56	0.67	0.62
MJJ	0.37	0.90	0.32	0.63	0.59	0.67	0.63
JJA	0.49	0.84	0.46	0.66	0.56	0.67	0.63
JAS	0.37	0.90	0.44	0.67	0.58	0.70	0.65
ASO	0.31	0.90	0.44	0.61	0.62	0.64	0.63

Коэффициент корреляции *ACC* для T2м с осреднением по земному шару для прогнозов с нулевой и месячной заблаговременностью варьируется в пределах от 0.05 до 0.56, *RMSE* в диапазоне от 0.66 до 1.05, *MSSS* в пределах от -0.28 до 0.5, *ROC_B* от 0.5 до 0.76, *ROC_N* от 0.51 до 0.62, *ROC_A* от 0.52 до 0.73.

Оценки качества квазиоперативных сезонных прогнозов **H500**
с нулевой заблаговременностью по модели Земной системы ИВМ РАН
для территории **Северной Евразии** за период с июня 2021 по октябрь 2023 г.

Мес[/yr]	<i>ACC</i>	<i>RMSE</i> (°C)	<i>MSSS</i>	<i>ROC_B</i>	<i>ROC_N</i>	<i>ROC_A</i>	<i>ROC_AG</i>
JJA/2021	-0.04	2.02	0.37	0.72	0.53	0.72	0.66
JAS	0.31	1.59	0.56	0.55	0.29	0.29	0.38
ASO	0.01	1.81	0.38	0.83	0.34	0.41	0.52
SON	-0.04	2.00	0.00	0.44	0.68	0.63	0.58
OND	0.32	2.32	-0.00	0.65	0.55	0.58	0.59
NDJ	0.60	2.36	0.29	0.67	0.53	0.75	0.65
DJF	0.39	3.06	0.11	0.47	0.58	0.69	0.58
JFM/2022	0.06	3.43	-0.06	0.56	0.4	0.4	0.47
FMA	-0.03	2.74	-0.33	0.46	0.43	0.43	0.45
MAM	0.37	1.93	0.38	0.78	0.57	0.57	0.71
AMJ	0.51	1.60	0.44	0.76	0.67	0.67	0.75
MJJ	0.18	1.94	0.17	0.75	0.5	0.5	0.61
JJA	-0.41	2.33	0.14	0.34	0.33	0.33	0.32
JAS	0.28	2.06	0.33	0.52	0.43	0.43	0.51
ASO	0.34	2.32	0.32	0.81	0.58	0.58	0.7
SON	0.19	2.48	0.17	0.47	0.55	0.55	0.56
OND	0.39	2.18	0.39	0.52	0.52	0.52	0.56
NDJ	0.06	3.23	-0.02	0.4	0.49	0.49	0.48
DJF	0.11	2.83	0.17	0.54	0.38	0.38	0.49
JFM/2023	-0.44	3.67	-0.38	0.40	0.49	0.42	0.44
FMA	-0.11	2.79	0.06	0.72	0.52	0.43	0.56
MAM	0.23	3.07	0.11	0.52	0.53	0.54	0.53
AMJ	-0.35	2.58	-0.09	0.23	0.46	0.26	0.32
MJJ	0.25	1.70	0.34	0.95	0.50	0.54	0.52
JJA	-0.17	1.67	0.45	0.36	0.59	0.63	0.53
JAS	-0.27	2.46	0.33	0.30	0.54	0.50	0.44
ASO	-0.42	2.07	0.37	0.29	0.33	0.28	0.30

Коэффициент корреляции *ACC* для H500 по Северной Евразии для прогнозов с нулевой и месячной заблаговременностью варьируется в пределах от -0.57 до 0.63, *RMSE* в диапазоне от 1.4 до 3.5, *MSSS* в пределах от -0.26 до 0.6, *ROC_B* от 0.23 до 0.95, *ROC_N* от 0.38 до 0.71, *ROC_A* от 0.38 до 0.74.

Так же как и для других метеозаэментов, наилучшие оценки для H500 получены для детерминистских прогнозов за 2022 год. Осредненная оценка *ACC* за год при нулевой заблаговременности составила 0.43, а при месячной – 0.45. *RMSE* для нулевой и месячной заблаговременности составляли, соответственно, 2.13 и 2.19. Значения *MSSS* при разных заблаговременностях оказались 0.22 и 0.21, что существенно превышает пороговое значение 0.

Оценки качества квазиоперативных сезонных прогнозов **H500**
с нулевой заблаговременностью по модели Земной системы ИВМ РАН
для территории **земного шара** за период с июня 2021 по октябрь 2023 г.

Мес[/yr]	<i>ACC</i>	<i>RMSE</i> (°C)	<i>MSSS</i>	<i>ROC_B</i>	<i>ROC_N</i>	<i>ROC_A</i>	<i>ROC_AG</i>
JJA/2021	0.18	2.08	0.09	0.60	0.39	0.43	0.48
JAS	0.30	1.84	0.21	0.75	0.68	0.80	0.74
ASO	0.43	1.97	0.30	0.85	0.70	0.80	0.78
SON	0.58	2.16	0.37	0.81	0.69	0.78	0.76
OND	0.65	2.19	0.44	0.81	0.69	0.82	0.77
NDJ	0.73	1.93	0.51	0.80	0.67	0.81	0.76
DJF	0.43	2.54	0.21	0.71	0.54	0.65	0.63
JFM/2022	0.11	2.68	-0.06	0.6	0.43	0.47	0.5
FMA	0.41	1.94	0.09	0.62	0.48	0.54	0.55
MAM	0.38	1.76	0.18	0.68	0.62	0.67	0.66
AMJ	0.47	1.56	0.23	0.59	0.62	0.65	0.62
MJJ	0.31	1.73	0.14	0.63	0.52	0.57	0.57
JJA	0.44	1.92	0.28	0.62	0.59	0.63	0.61
JAS	0.43	2.43	0.25	0.69	0.56	0.63	0.63
ASO	0.71	2.22	0.43	0.75	0.62	0.72	0.7
SON	0.62	2.30	0.36	0.76	0.62	0.73	0.7
OND	0.44	2.56	0.22	0.65	0.55	0.65	0.62
NDJ	0.45	2.90	0.20	0.65	0.44	0.58	0.56
DJF	0.42	2.40	0.18	0.65	0.55	0.59	0.6
JFM/2023	0.18	2.44	-0.03	0.69	0.46	0.53	0.56
FMA	0.15	2.58	0.04	0.60	0.53	0.61	0.58
MAM	0.17	2.74	0.05	0.62	0.68	0.74	0.68
AMJ	0.14	2.64	0.08	0.69	0.68	0.74	0.71
MJJ	-0.10	2.58	0.08	0.66	0.71	0.79	0.72
JJA	0.39	2.17	0.37	0.78	0.76	0.86	0.80
JAS	0.37	2.11	0.45	0.84	0.76	0.86	0.82
ASO	0.09	1.95	0.40	0.57	0.71	0.76	0.68

За неполный 2023 год значения качества детерминистских прогнозов оказались наименее успешными по сравнению с предыдущими двумя годами. Осредненная оценка *ACC* за 2023 г. при нулевой заблаговременности составила 0.17, а при месячной – 0.20. *RMSE* для нулевой и месячной заблаговременности составляли 2.40 и 2.35 соответственно. Значение *MSSS* при нулевой заблаговременности оказалось равным 0.18, а при месячной заблаговременности – 0.22. Средние вероятностные оценки за 2023 г. для категории «выше нормы» *ROC_A* составляли 0.68 при нулевой заблаговременности и 0.71 при месячной заблаговременности, для категории «около нормы» *ROC_N* составлял 0.66 при нулевой заблаговременности и 0.70 при месячной заблаговременности, а для категории «ниже

нормы» ROC_B составлял 0.74 при нулевой заблаговременности и 0.70 при месячной заблаговременности.

Согласно проведенному анализу данных, коэффициент корреляции ACC для H500 с усреднением по земному шару находился в диапазоне от -0.05 до 0.64 для прогнозов с нулевой и месячной заблаговременностью. Значения $RMSE$ варьировались от 1.54 до 2.81, а $MSSS$ – от 0 до 0.46. Оценки ROC_B были в пределах от 0.56 до 0.85, ROC_N – от 0.43 до 0.79, а ROC_A – от 0.46 до 0.88.

Сравнение качества квазиоперативных сезонных прогнозов по модели Земной системы ИВМ РАН с аналогичными прогнозами зарубежных метеоцентров

В результате анализа были обнаружены особенности и закономерности сезонной изменчивости оценок качества прогнозов с нулевой заблаговременностью для модели Земной системы ИВМ РАН на территории Северной Евразии в сравнении с оценками других глобальных моделей метеорологических центров.

Отмечается, что пространственные коэффициенты корреляции имеют наиболее выраженную дисперсию значений ACC сезонных прогнозов геопотенциала на уровне 500 гПа. В период с декабря 2021 по август 2022 года выявлены более однородные значения ACC и общие тенденции к росту или снижению. Диапазон изменчивости ACC составляет от -0.6 до 0.6.

Пространственные коэффициенты корреляции для модели Земной системы ИВМ РАН в период с июля по октябрь 2021 г. были примерно на среднем уровне по сравнению с другими моделями. В период с ноября 2021 по май 2022 г., а также с июля по декабрь 2022 г. они были выше среднего, а наибольшие значения были отмечены в ноябре 2021 г. и в марте-апреле 2022 г. Однако с января по апрель 2023 г. коэффициенты корреляции для прогнозов по модели ИВМ РАН были ниже большинства других центров, а наименьшие значения были в июле 2022 г., январе и апреле 2023 года.

Средние оценки качества прогнозов H500 по модели Земной системы ИВМ РАН (**INM-CM5**) и моделям зарубежных метеоцентров за испытываемый прогностический период с 2021 по 2023 год по критериям $MSSS$, $RMSE$, ACC сведены в табл. 11.

Модели зарубежных метеоцентров: Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (**CMCC**), European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (**ECMWF**), United Kingdom Met Office (**UKMO**), Météo France (**MFR**), Deutscher Wetterdienst (**DWD**), National Centers for Environmental Prediction (**NCEP**), Environment and Climate Change Canada (**ECCC**), Japan Meteorological Agency (**JMA**), Tokio Climate Center (**TCC**).

Оценки качества квазиоперативных сезонных прогнозов INM-CM5 и зарубежных метеоцентров для **H500** с нулевой заблаговременностью по территории **земного шара** и **Северной Евразии**, осредненные за период с июня 2021 г. по октябрь 2023 г.

Модель	Территория земного шара	Северная Евразия
<i>MSSS, H500</i>		
INM-CM5	0.23	0.20
ECMWF	0.26	0.01
NCEP	0.23	0.02
UKMO	0.28	0.12
MFR	0.25	0.13
DWD	0.08	-0.23
CMCC	0.21	0.02
ECCC	0.05	-0.20
JMA	0.28	0.15
TCC	0.38	0.26
<i>RMSE, H500 (дам)</i>		
INM-CM5	2.23	2.36
ECMWF	2.18	2.58
NCEP	2.21	2.56
UKMO	2.14	2.45
MFR	2.18	2.43
DWD	2.39	2.86
CMCC	2.24	2.56
ECCC	2.43	2.83
JMA	2.15	2.42
TCC	1.99	2.26
<i>ACC, H500</i>		
INM-CM5	0.35	0.09
ECMWF	0.44	0.03
NCEP	0.44	0.00
UKMO	0.44	0.06
MFR	0.41	0.06
DWD	0.36	-0.04
CMCC	0.41	0.06
ECCC	0.34	-0.02
JMA	0.44	0.09
TCC	0.57	0.25

Заключение

Таким образом, результаты испытаний показали, что оценки успешности ансамблевых сезонных вероятностных и детерминистских прогнозов основных метеоэлементов по территории земного шара и по отдельным регионам сопоставимы с оценками успешности ансамблевых прогнозов зарубежных метеоцентров, участвующих в проекте LC MME-WMO, что является свидетельством о соответствии разработанной Системы сезонного метеорологического прогноза на базе модели INM-CM5 мировому уровню.

По итогам рассмотрения и обсуждений представленной Системы сезонного метеорологического прогноза на базе модели INM-CM5 и решения Секции по гидрометеорологическим прогнозам Ученого совета ФГБУ «Гидрометцентр России» Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета на заседании 22 ноября 2023 г. сочла целесообразным:

«Одобрить и рекомендовать к внедрению в прогностическую работу ФГБУ «Гидрометцентр России» и Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) «Систему сезонного метеорологического прогноза на базе модели INM-CM5» наряду с использованием ранее внедренных отечественных технологий глобальных сезонных прогнозов Гидрометцентра России и Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.»

Список литературы

1. *Муравьев А.В., Вильфанд Р.М.* О стандартизации оценок качества среднесрочных и долгосрочных прогнозов погоды // *Метеорология и гидрология.* – 2000. – № 12. – С. 24–34.
2. *Струков Б.С., Реснянский Ю.Д., Зеленько А.А.* Релаксационный метод усвоения данных по сплоченности морского льда в модели NEMO-LIM3 с несколькими категориями ледяного покрова // *Метеорология и гидрология.* – 2020. – № 2. – С. 65–77.
3. *Carton J.A., Chepurin G.A., Chen L.* SODA3: A New Ocean Climate Reanalysis // *J. Clim.* – 2018. – Vol. 31. – P. 6967–6983.
4. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S.* The ERA5 global reanalysis // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* – 2020. – Vol. 146. – P. 1999–2049.
5. *Standardized Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF).* New Attachment II-9 to the Manual on the GDPS (WMO-No. 485). – Geneva: WMO, 2002. – Vol. I. – 21 pp.
6. *Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostykin S.V. et al.* Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5 // *Climate Dynamics.* – 2017. – Vol. 49, no. 11. – P. 3715–3734.
7. *Volodin E.M., Gritsun A.S.* Simulation of Possible Future Climate Changes in the 21st Century in the INM-CM5 Climate Model // *Izvestiya. Atmospheric and Ocean Physics.* – 2020. – Vol. 56, no. 3. – P. 218–228. – DOI: 10.1134/S0001433820030123.
8. *Vorobyeva V., Volodin E.* Evaluation of the INM RAS climate model skill in climate indices and stratospheric anomalies on seasonal timescale // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography.* – 2021. – Vol. 73, no. 1. – P. 1–12.

*В.А. Тищенко^{1,2}, В.М. Хан^{1,2}, Ю.Д. Реснянский¹,
Е.М. Володин^{2,1}, А.С. Грицун², В.В. Воробьева^{2,1}, М.А. Тарасевич^{2,1}*

**Метод сверхдолгосрочного прогнозирования
состояния климатической системы
на основе климатической модели ИВМ РАН INM-CM5
и системы подготовки данных Гидрометцентра России**

¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр

Российской Федерации, г. Москва;

² Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, г. Москва

Введение

ФГБУ «Гидрометцентр России» совместно с ФГБУН «Институт вычислительной математики имени Г.И. Марчука РАН» разработана технология глобального ансамблевого сверхдолгосрочного прогноза. Технология ансамблевого прогноза построена на базе глобальной климатической модели INM-CM5 [7, 8] и системы генерации ансамбля начальных состояний [9].

Основными блоками модели являются: блок динамики атмосферы, аэрозольный блок, блок динамики океана, дополненный блоком динамики и термодинамики морского льда. Разрешение в атмосферном блоке составляет $2^\circ \times 1.5^\circ$ по долготе и широте, 73 σ -уровня до высоты порядка 60 км, в океанском блоке $0.5^\circ \times 0.25^\circ$ по долготе и широте и 40 σ -уровней по вертикали. Модель участвует в программе по сравнению климатических моделей CMIP6. Для данной конфигурации модели проведена верификация динамических процессов в стратосфере и тропосфере, воспроизведения моделью Эль-Ниньо и других наиболее важных погодно-климатических явлений. В публикациях авторов [7–9] показано, что качество воспроизведения моделью INM-CM5 крупномасштабных процессов соответствует лучшим современным моделям.

Для обеспечения возможности расчета сверхдолгосрочных прогнозов на вычислительном комплексе ФГБУ «ГВЦ Росгидромета» Cray XC40-LC в квазиоперативном режиме реализована автоматическая система построения начального состояния. Расчет

ансамбля прогнозов происходит автоматически в несколько этапов, выполняемых последовательно: создание набора начальных состояний для климатической модели ИВМ РАН на требуемую дату начала прогноза, запуск счета ансамбля прогнозов на вычислительном комплексе ФГБУ «ГВЦ Росгидромета» Cray XC40-LC, подготовка результатов прогноза для дальнейшей обработки и использования в Гидрометцентре России.

Начальные состояния атмосферы, океана и суши для сверхдолгосрочных прогнозов задаются в терминах аномалий: «климатология модели + аномалия реанализа на момент старта прогноза». Выбор такого способа задания условий «в виде аномалий» определяется стремлением избежать шокового воздействия больших отклонений задаваемого начального поля от состояния модели с приспособленной собственной динамикой.

Для построения начальных состояний на дату старта прогноза используются данные реанализа ERA40 [6] (1960–1979 гг.), ERA5 [4] (с 1980 г.) для атмосферы и деятельного слоя суши; а также анализов ORAS5 [10] (1960–1979 гг.), SODA3.4.2 [3] (1980–2020 гг.) и GODAS НМС [2] (с 2021 г.) для океана и морского льда. Ансамбль начальных состояний (15 членов ансамбля) получен путем внесения в начальное состояние температуры воздуха на всех σ -уровнях модели в каждой точке модельной сетки гладкого длинноволнового возмущения с амплитудой 0.1 К.

Расчеты с моделью INM-CM5 проводятся на высокопроизводительном вычислительном комплексе (ВБК) Cray XC40-LC. На 720 ядрах расчет одного члена ансамбля сверхдолгосрочного прогноза на 15 лет выполняется 36 часов. Выходная прогностическая продукция записывается в базу данных SLME системы АССОИ Гидрометцентра России.

Протокол испытаний

В соответствии с Планом испытания новых и усовершенствованных технологий (методов) гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов Росгидромета на 2023 год, утвержденным Руководителем Росгидромета, были подготовлены и проведены испытания метода сверхдолгосрочного прогнозирования состояния климатической системы на основе климатической модели ИВМ РАН INM-CM5 и системы подготовки данных Гидрометцентра России. Под сверхдолгосрочными прогнозами в данном случае подразумеваются прогностические интервалы от года до пятилетия. В качестве объекта рассматривались следующие метеоэлементы:

- давление на уровне моря (MSLP);
- высота геопотенциала на уровне 500 гПа (H500);
- температура у земной поверхности (T2m);

– осадки (PREC).

Оперативные испытания метода ансамблевого сверхдолгосрочного прогноза на основе модели INM-CM5 были произведены для периода с 1960 по 2022 год.

Оценки успешности среднегодовых и средних за пять лет прогнозов атмосферного давления на уровне моря, геопотенциала поверхности 500 гПа, приземной температуры воздуха и количества осадков рассчитывались с учетом наставлений Всемирной метеорологической организации (ВМО) [1, 5], а также с учетом регламента выпуска прогнозов в Ведущем центре ВМО по прогнозированию климата от года до десятилетия (<https://hadleyserver.metoffice.gov.uk/wmolc/>).

Были рассмотрены следующие показатели успешности прогнозов: коэффициент корреляции аномалий (ACC), среднеквадратичная мера мастерства (MSSS) для детерминистского прогноза, относительная оперативная характеристика (площадь под кривой ROC) для двухкатегорийного вероятностного прогноза – использовались равновероятные категории выше/ниже нормы, аномалии рассчитывались относительно базового периода 1991–2020 гг. Показатель ROC, равный единице, свидетельствует об идеальном прогнозе. Показатель ROC выше 0.5 ($HR \leq FAR$) свидетельствует о том, что прогноз квалифицированный.

В качестве контрольных данных использовался реанализ ERA5.

Оценки ансамблевого сверхдолгосрочного прогноза были представлены по территории земного шара и крупным регионам Северного и Южного полушарий (табл. 1).

Таблица 1

Границы регионов, для которых представлены оценки ансамблевого
сверхдолгосрочного прогноза

Регион		Диапазон широт		Диапазон долгот	
Глобус	Globe	-90	90	0	360
Южные экстратропики	S_Ex_trop	-90	-20	0	360
Тропики	Tropic	-20	20	0	360
Северные экстратропики	N_Ex_trop	20	90	0	360
Северная Евразия	N_Eurasia	35	75	20	180
ЕТР	ETR	40	70	20	60
Северо-Восточная Азия	NE_Asia	35	75	60	180
Европа	Europe	30	70	0	60
Центральная Азия	Central_Asia	35	55	50	85
Сибирь	Siberia	50	75	60	110
Дальний Восток	Far_East	45	75	110	180

Особое внимание было уделено региону Северной Евразии, для которого были выделены однородные по физико-географическим условиям регионы. Интерес к данному региону обусловлен деятельностью Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ), который, выполняя рекомендации ВМО, осуществляет климатическое обслуживание территории Северной Евразии.

В период испытаний производилось сравнение успешности ансамблевых прогнозов по модели INM-CM5 с успешностью ансамблевых прогнозов зарубежных метеоцентров.

Результаты испытаний

Показатели *MSSS* для всех крупных районов при годовом и 5-летнем осреднении положительные для T2m и H500. Значения *ROC* варьировались от 0.5 до 0.95 и стабильно превышали 0.5, что свидетельствовало о квалифицированном прогнозе. Оценки *ACC* между контрольными и прогностическими данными для T2m, MSLP и H500 также были достаточно высокие и превышали в большинстве районов пороговые значения со статистической значимостью 95 %. Также было отмечено, что согласованность временной изменчивости между контрольными и прогностическими данными для 5-летнего прогноза выше, чем для годового. Основные результаты оценок по *ACC* и *ROC* представлены в табл. 2.

Значения пространственных коэффициентов *ACC* глобальной приземной температуры воздуха для всех временных масштабов прогноза свидетельствуют о согласованности прогностических данных и данных реанализа: 0.62 за первый год и 0.75 за срок с 1 по 5 годы прогноза. При этом в Северной Евразии данный показатель выше: 0.69 и 0.84 соответственно. Тот же уровень качества характерен для прогнозов геопотенциала с более высокой успешностью для всего земного шара. Для приземного атмосферного давления и для осадков коэффициенты пространственной корреляции низкие (0.06–0.16), при этом значения относительной оперативной характеристики *ROC* не ниже 0.5. Также представленные оценки позволяют сделать вывод, что коэффициенты корреляции аномалий и значения *ROC* у средних за 5-летний срок прогнозов выше, чем у прогнозов на первый год.

Анализ пространственного распределения коэффициента *ACC* приземной температуры свидетельствует о наиболее высоком качестве прогнозов на сроки от 1 до 5 лет, причем самые высокие значения *ACC* (выше 0.9) отмечаются на юге Европы, севере Африки, в Средней Азии, на юге Северной Америки и в центре Южной Америки. Для прогнозов на 1-й год области наиболее успешного прогноза те же, но значения *ACC* чуть ниже. В пространственном распределении *ACC* осадков выделяется небольшая область в южной половине Африканского континента, где $ACC < 0.2$, на территории Северной Евразии низкие значения *ACC* отмечаются в южных районах Европейской территории и в Средней Азии.

Оценка качества прогнозов модели INM-CM5 за 1 год прогноза и среднее за 1–5 лет

	ACC1	ACC5	ROC1	ROC5	MSSS1	MSSS5
T2m						
Globe	0.62	0.75	0.77	0.83	0.21	0.00
S_Ex_trop	0.44	0.60	0.68	0.74	-0.04	-0.33
Tropic	0.75	0.84	0.83	0.87	0.42	0.22
N_Ex_trop	0.68	0.82	0.80	0.88	0.24	0.11
N_Eurasia	0.65	0.84	0.79	0.90	0.13	-0.11
ETP	0.68	0.87	0.81	0.95	0.29	0.31
NE_Asia	0.63	0.82	0.77	0.88	0.07	-0.27
Europe	0.74	0.89	0.84	0.94	0.37	0.44
Central_Asia	0.64	0.87	0.81	0.92	0.16	0.17
Siberia	0.57	0.85	0.72	0.88	0.11	0.28
Far_East	0.65	0.82	0.79	0.88	-0.03	-0.55
MSLP						
Globe	0.24	0.25	0.59	0.61	-0.01	-0.21
S_Ex_trop	0.26	0.37	0.58	0.66	-0.01	-0.12
Tropic	0.35	0.23	0.64	0.61	0.08	-0.09
N_Ex_trop	0.12	0.14	0.54	0.55	-0.12	-0.43
N_Eurasia	0.08	0.09	0.54	0.55	-0.20	-0.89
ETP	0.02	0.05	0.52	0.55	-0.23	-1.13
NE_Asia	0.10	0.09	0.54	0.55	-0.19	-0.82
Europe	0.05	-0.04	0.52	0.50	-0.24	-1.09
Central_Asia	-0.00	0.07	0.52	0.56	-0.43	-1.58
Siberia	0.03	0.12	0.50	0.52	-0.16	-0.78
Far_East	0.13	0.07	0.56	0.55	-0.13	-0.62
PREC						
Globe	0.14	0.13	0.56	0.56	-0.21	-0.37
S_Ex_trop	0.16	0.21	0.57	0.59	-0.13	-0.22
Tropic	0.13	0.06	0.57	0.54	-0.38	-0.51
N_Ex_trop	0.12	0.11	0.56	0.56	-0.13	-0.39
N_Eurasia	0.05	-0.01	0.53	0.52	-0.19	-0.67
ETP	-0.01	-0.09	0.51	0.50	-0.15	-0.55
NE_Asia	0.06	0.00	0.54	0.52	-0.21	-0.74
Europe	0.03	0.04	0.52	0.53	-0.14	-0.35
Central_Asia	-0.02	-0.07	0.50	0.50	-0.19	-0.38
Siberia	0.02	0.01	0.53	0.53	-0.19	-0.77
Far_East	0.05	-0.04	0.53	0.51	-0.26	-1.06
H500						
Globe	0.66	0.78	0.78	0.89	0.39	0.28
S_Ex_trop	0.48	0.61	0.70	0.80	0.22	0.10
Tropic	0.87	0.91	0.89	0.97	0.65	0.46
N_Ex_trop	0.64	0.82	0.77	0.89	0.33	0.30
N_Eurasia	0.60	0.85	0.74	0.91	0.22	0.29
ETP	0.56	0.86	0.72	0.96	0.24	0.43
NE_Asia	0.60	0.84	0.75	0.90	0.21	0.23
Europe	0.61	0.87	0.74	0.92	0.28	0.44
Central_Asia	0.61	0.83	0.78	0.93	0.19	-0.05
Siberia	0.48	0.80	0.68	0.89	0.09	0.24
Far_East	0.58	0.82	0.73	0.87	0.17	0.24

В арктической зоне Евразии прогнозы осадков более успешны для всех прогностических сроков. Низкое качество прогнозов атмосферного давления на уровне моря наблюдается над Индийским океаном и на востоке Тихого океана у побережья Южной Америки. Для территории Северной Евразии коэффициенты корреляции заметно выше.

Сравнение качества среднегодовых и пятилетних прогнозов по модели INM- CM5 с аналогичными прогнозами зарубежных метеоцентров

Анализ успешности ансамблевых сверхдолгосрочных прогнозов (за первый год прогноза и среднего за пятилетие) на основе модели INM-CM5 сопоставлялся с результатами аналогичных прогнозов, выпущенных ведущими международными метеорологическими центрами, участвующими в консорциуме по годовому и десятилетнему прогнозированию ВМО (LC-ADCP WMO) (<https://hadleyserver.metoffice.gov.uk/wmolc/>). Среднегодовые значения прогнозов метеопараметров, рассматриваемых для испытания, за первый год и за 5-летний прогностический периоды сравнивались с другими прогнозами по формату прогнозов LC-ADCP. Для оценки успешности использовался коэффициент корреляции аномалий и показатель ROC для вероятностных прогнозов по двум градациям: выше или ниже средних значений. При расчетах аномалий учитывался базовый период с 1991 по 2020 год.

Оценки качества показали, что модель INM-CM5 демонстрирует высокую результативность в воспроизведении среднегодового температурного режима как на прогностический период в 1 год, так и на более длительный период – 5 лет, что подтверждено данными табл. 3. При этом климатическая модель ИВМ РАН выделяется среди прочих анализируемых моделей ведущих мировых климатических центров высоким коэффициентом корреляции: 0.62 за первый год прогноза и 0.75 для прогноза на осредненный 5-летний период. Следует отметить, что и скомплексированный прогноз по ансамблю моделей LC-ADCP также показывает сопоставимые результаты с коэффициентами корреляции на уровне 0.62 за один год и 0.71 за 5 лет. Кроме того, результаты оценок ROC также демонстрируют хорошую успешность модели INM-CM5. Значения ROC равны 0.77 на первый год и 0.83 для 5-летнего периода, тогда как для прогноза мультиансамбля моделей LC-ADCP эти показатели составляют 0.80 и 0.85 соответственно.

Помимо температурного режима, был проведен сравнительный анализ воспроизведения межгодовой изменчивости осадков, давления на уровне моря и высоты геопотенциала на уровне 500 гПа с целью оценки успешности вероятностных и детерминистских прогнозов этих параметров на фоне прогнозов зарубежных метеоцентров. Результаты показали (таблицы не приводятся), что сверхдолгосрочные прогнозы по моделям

Земной системы ИВМ РАН и ведущих зарубежных метеоцентров обладают сопоставимой точностью в прогнозировании межгодовой изменчивости указанных метеопараметров.

Таблица 3

Сравнительные оценки воспроизведения среднегодового температурного режима за первый год прогноза и среднего за пятилетие по ретроспективным прогнозам моделей ВМО (1960–2018) и модели INM-CM5 (1960–2020)

Модель	1 год		1–5 годы	
	<i>ACC</i>	<i>ROC</i>	<i>ACC</i>	<i>ROC</i>
INM-CM5	0,62	0,77	0,75	0,83
Среднее по ансамблю	0,62	0,80	0,71	0,85
BCCR	0,51	0,74	0,65	0,81
BSC	0,53	0,75	0,64	0,81
CCCMA	0,57	0,77	0,66	0,82
CMCC	0,5	0,74	0,63	0,8
CSIRO	0,46	0,71	0,56	0,76
DWD	0,53	0,76	0,66	0,81
GFDL	0,57	0,77	0,67	0,82
LASG	0,43	0,69	0,58	0,77
MIROC	0,51	0,74	0,63	0,81
MOHC	0,55	0,76	0,66	0,82
MRI	0,55	0,76	0,67	0,82
SMHI/DMI	0,49	0,73	0,65	0,82

Заключение

Таким образом, результаты испытаний показали, что оценки успешности ансамблевых 5-летних вероятностных и детерминистских прогнозов основных метеозаэментов по территории земного шара и по отдельно взятым регионам сопоставимы с оценками успешности ансамблевых прогнозов зарубежных метеоцентров, участвующих в проекте LC-ADCP WMO, что является свидетельством о соответствии разработанного метода сверхдолгосрочного метеорологического прогноза на базе модели INM-CM5 мировому уровню.

Результаты проведенных испытаний были представлены к рассмотрению на заседании секции Ученого Совета по метеорологическим прогнозам Гидрометцентра России 27.09.2023. Секция Ученого совета постановила одобрить работу по созданию в Гидрометцентре России метода глобального ансамблевого прогноза на сверхдолгосрочных временных масштабах на основе климатической модели INM-CM5. На заседании Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета

22 ноября 2023 года данный метод был одобрен и рекомендован к внедрению в качестве основного в ФГБУ «Гидрометцентр России» и в Северо-Евразийском климатическом центре.

Список литературы

1. *Муравьев А.В., Вильфанд Р.М.* О стандартизации оценок качества среднесрочных и долгосрочных прогнозов погоды // *Метеорология и гидрология.* – 2000. – № 12. – С. 24–34.
2. *Струков Б.С., Реснянский Ю.Д., Зеленко А.А.* Релаксационный метод усвоения данных по сплоченности морского льда в модели NEMO–LIM3 с несколькими категориями ледяного покрова // *Метеорология и гидрология.* – 2020. – №2. – С. 65–77.
3. *Carton J. A., Chepurin G. A., Chen L.* SODA3: A New Ocean Climate Reanalysis // *J. Clim.* – 2018. – Vol. 31. – P. 6967–6983.
4. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S.* The ERA5 global reanalysis // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* – 2020. – Vol. 146. – P. 1999–2049.
5. *Standardized Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF).* New Attachment II-9 to the Manual on the GDPS (WMO-No. 485). – Geneva: WMO, 2002. – Vol. I. – 21 pp.
6. *Uppala S.M., K  llberg P.W., Simmons A.J., Andrae U., da Costa Bechtold V., Fiorino M., Gibson J.K., Haseler J., Hernandez A., Kelly G.A., Li X., Onogi K., Saarinen S., Sokka N., Allan R.P., Andersson E., Arpe K., Balmaseda M.A., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Caires S., Chevallier F., Dethof A., Dragosavac M., Fisher M., Fuentes M., Hagemann S., H  lm E., Hoskins B.J., Isaksen L., Janssen P.A.E.M., Jenne, R., McNally A.P., Mahfouf J.-F., Morcrette J.-J., Rayner N.A., Saunders R.W., Simon P., Sterl A., Trenberth K.E., Untch A., Vasiljevic D., Viterbo P., Woollen J.* The ERA-40 re-analysis // *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 2005. – Vol. 131. – P. 2961–3012. – <https://doi.org/10.1256/qj.04.176>.
7. *Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostykin S.V. et al.* Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5 // *Climate Dynamics.* – 2017. – Vol. 49, no. 11. – P. 3715–3734.
8. *Volodin E.M., Gritsun A.S.* Simulation of Possible Future Climate Changes in the 21st Century in the INM-CM5 Climate Model // *Izvestiya. Atmospheric and Ocean Physics.* – 2020. – Vol. 56, no. 3. – P. 218–228. – DOI: 10.1134/S0001433820030123.
9. *Vorobyeva V., Volodin E.* Evaluation of the INM RAS climate model skill in climate indices and stratospheric anomalies on seasonal timescale // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography.* – 2021. – Vol. 73, no. 1. – P. 1–12.
10. *Zuo H., Balmaseda M.A., Tietsche S., Mogensen K., Mayer M.* The ECMWF operational ensemble reanalysis-analysis system for ocean and sea ice: a description of the system and assessment // *Ocean Sci.* – 2019. – Vol. 15. – P. 779–808. – <https://doi.org/10.5194/os-15-779-2019>.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ
МЕТОДА ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА УРОЖАЙНОСТИ
И ВАЛОВОГО СБОРА ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ
ПО ФЕДЕРАЛЬНЫМ ОКРУГАМ И РОССИИ В ЦЕЛОМ**

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

²Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, г. Москва

В ФГБУ «ВНИИСХМ» в 2017–2019 гг. на основе синоптико-статистического подхода был разработан метод долгосрочного прогноза урожайности и валового сбора зерновых и зернобобовых культур в целом. Прогноз составляется в марте с заблаговременностью около 6 месяцев.

Специфика задачи разработки методов прогноза урожайности яровых зерновых культур до сева состоит в том, что для ее решения нельзя воспользоваться информацией, обычно используемой для составления агрометеорологических прогнозов. В прогнозах, составляемых в период вегетации, используются данные, характеризующие состояние посевов к моменту составления прогноза (высота, густота посевов, биомасса и т. д.) и погодные условия (значения температуры воздуха, сумм осадков за период с начала вегетации до даты составления прогноза). При составлении прогноза до сева указанные данные отсутствуют, поэтому в них учитываются особенности циркуляции атмосферы, складывающиеся в конкретном году. Возможность составления таких прогнозов обусловлена наличием связей между особенностями циркуляции атмосферы в период, предшествующий вегетации, и урожайностью зерновых культур. Существование таких связей подтверждено целым рядом численных экспериментов [9, 10].

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 [11, 12].

Использование указанного подхода в методиках прогноза урожайности сельскохозяйственных культур позволяет увеличить их заблаговременность до 4–7 месяцев (прогноз составляется в феврале-марте) [3–7].

Долгосрочные агрометеорологические прогнозы могут быть использованы органами сельскохозяйственного управления при планировании и принятии многих оперативно-хозяйственных решений в процессе сельскохозяйственного производства.

В методе долгосрочного прогноза урожайности и валового сбора ярового ячменя по пяти федеральным округам и России в целом в качестве предикторов были использованы показатели циркуляции атмосферы в пределах всего Северного полушария и значения температуры поверхности Тихого и Атлантического океанов за осенне-зимний период, предшествующий периоду вегетации.

По данным Росстата за 2014–2018 гг., 96,7 % посевных площадей, занятых яровым ячменем, расположены в пяти федеральных округах (ФО) Российской Федерации (Центральный ФО – 25,1 %, Южный ФО – 10,7 %, Приволжский ФО – 37,1 %, Уральский ФО – 9,1 %, Сибирский ФО – 14,7 %), поэтому прогноз ожидаемой урожайности составляется для пяти федеральных округов.

В данном методе прогноза предиктантом является отклонение урожайности ярового ячменя от тренда по федеральному округу или по группе субъектов РФ, определяющих валовой сбор ярового ячменя в том или ином федеральном округе.

Временные ряды урожайности ярового ячменя рассматриваются как сумма двух слагаемых – детерминированной составляющей и случайных отклонений от нее (1):

$$Y_t = f_t + \omega_t, \quad (1)$$

где Y_t – временной ряд урожайности; f_t – некоторая неслучайная функция времени (тренд); ω_t – случайная составляющая временного ряда.

Для ярового ячменя по каждому федеральному округу (или группе субъектов РФ) на прогнозируемый год рассчитывается прогностическое значение трендовой составляющей с помощью статистических приемов (метод гармонических весов, прямая линия) [2, 13].

Метеорологическая составляющая урожайности в каждом году представлена в отклонениях от тренда:

$$\Delta Y_i = (Y_i - \hat{Y}_i) / \hat{Y}_i, \quad (2)$$

где ΔY_i – метеорологическая составляющая урожайности; Y_i – фактическое значение урожайности в i -м году; \hat{Y}_i – трендовая составляющая урожайности.

В табл. 1 приведен перечень субъектов РФ, в которых значения урожайности ярового ячменя используются в расчетах по Центральному и Приволжскому федеральным округам. В графе 4 приведены сведения данных Росстата в среднем за 2014–2018 годы. Прогнозируемая урожайность в целом по указанным округам рассчитывается по уравнению регрессии.

По остальным федеральным округам (Южному, Уральскому и Сибирскому) в расчетах используются значения урожайности в целом по федеральному округу. Ожидаемая урожайность ярового ячменя по Российской Федерации рассчитывается по уравнению регрессии на основании расчетов ожидаемой урожайности по пяти федеральным округам.

Таблица 1

Список субъектов РФ, по которым статистические данные по урожайности ярового ячменя используются для расчета прогнозируемой урожайности ячменя по Центральному и Приволжскому федеральным округам

Федеральный округ	Количество субъектов в ФО	Субъекты РФ, по которым статистические данные по урожайности используются для расчета	Валовой сбор в субъектах по отношению к валовому сбору в целом по ФО, %
Центральный	17	Белгородская обл., Воронежская обл., Курская обл., Липецкая обл., Орловская обл., Рязанская обл., Тамбовская обл., Тульская обл.	94,3
Приволжский	14	I. Республика Башкортостан Республика Татарстан	34,9
		II. Оренбургская обл. Самарская обл., Саратовская обл.	26,3
		III. Нижегородская обл., Пензенская обл., Республика Мордовия	18,9

Потенциальными предикторами для расчета ожидаемой урожайности ярового ячменя по группам субъектов РФ или по федеральным округам Российской Федерации были использованы средние месячные значения следующих параметров:

- геопотенциала на уровне 500 гПа в узлах регулярной десятиградусной сетки в пределах Северного полушария с октября по февраль;
- температуры поверхности воды Тихого океана с октября по февраль в узлах регулярной десятиградусной сетки;
- температуры поверхности воды Атлантического океана с сентября по февраль в узлах регулярной десятиградусной сетки;
- широты планетарной высотной зоны в феврале.

В качестве математического аппарата для построения уравнений и расчета прогностических отклонений урожайности ярового ячменя от тренда применяется метод разложения случайных полей по естественным ортогональным составляющим, корреляционный и регрессионный анализы [2, 8].

Прогноз составляется в первой декаде марта, после поступления оперативных данных об используемых предикторах за декабрь прогнозируемого года и фактических данных Федеральной службы государственной статистики об урожайности и валовом сборе ярового ячменя за предшествующий прогнозу год.

Блок-схема метода прогноза урожайности и валового сбора ярового ячменя по федеральным округам представлена на рис. 1.

В табл. 2 приведены предикторы (параметр и месяц осенне-зимнего периода), отобранные для расчета ожидаемой урожайности ярового ячменя по федеральным округам РФ.

Полученные уравнения для расчета ожидаемой урожайности ярового ячменя проходили проверку на статистическую значимость [2]: значимость уравнения множественной регрессии в целом оценена с помощью F-критерия Фишера, статистическая значимость каждого из факторов в уравнении оценена с помощью t-критерия Стьюдента.

Ежегодно уравнения регрессии уточняются с учетом вновь поступившей информации.

Для расчета валового сбора ячменя в прогнозах, из-за отсутствия данных о посевных площадях текущего года к моменту составления прогноза, используются данные о посевных площадях ярового ячменя за предшествующий год.

На рис. 2, для примера, показаны области, в которых значения геопотенциала на уровне 500 гПа и температура поверхности воды океанов используются в расчетах.



Рис. 1. Блок-схема метода долгосрочного прогноза урожайности ярового ячменя по группе субъектов или федеральному округу РФ.

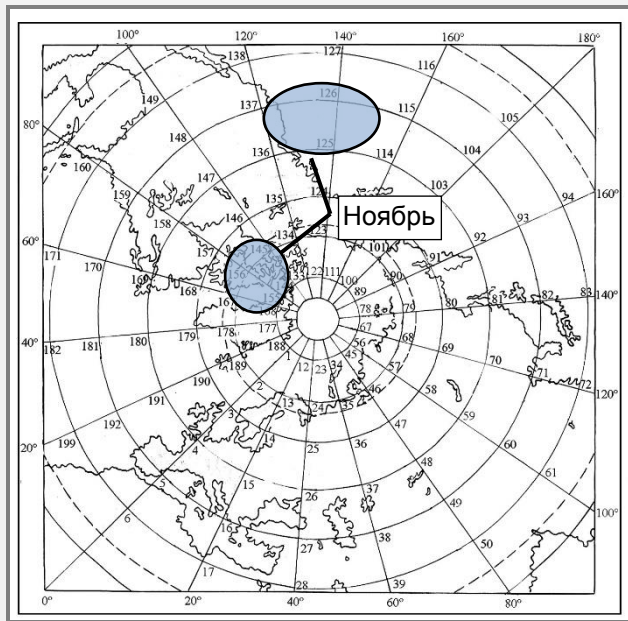
Предикторы (параметр и месяц осенне-зимнего периода), отобранные для расчета ожидаемой урожайности ярового ячменя по федеральным округам или группам субъектов РФ

Федеральный округ, группа субъектов	Средняя месячная температура поверхности воды Атлантического океана						Средняя месячная температура поверхности воды Тихого океана						Средние месячные значения геопотенциала на уровне 500 гПа				Широта высотной фронтальной зоны		
	Месяц, предшествующий периоду вегетации IX (сентябрь–февраль)																		
	IX	X	XI	XII	I	II	X	XI	XII	I	II	X	XI	XII	I	II		II	
Центральный			+					+					++						
Южный			+				+					+	+		+				
Приволжский																			
1 группа субъектов					+			+						+			+		
2 группа субъектов						+					+			+	+				
3 группа субъектов			+									+	+			+			
Уральский					+							++	+			+			
Сибирский	+	+										+	+						

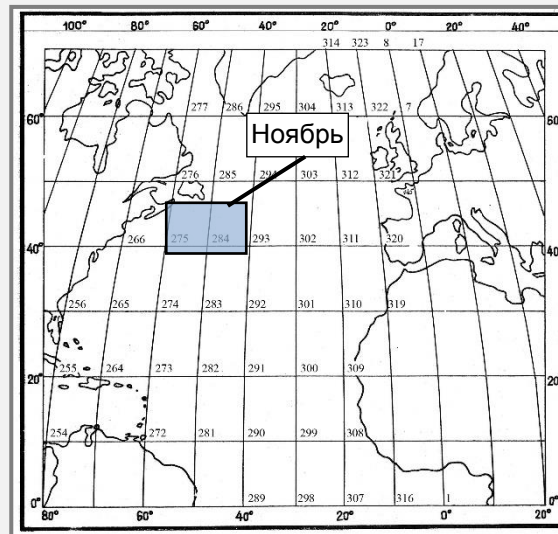
Примечание: два знака + обозначают, что в качестве предикторов используются значения параметров в двух областях.

Центральный федеральный округ

Значения геопотенциала
на уровне 500 гПа



Значения температуры
поверхности воды
Атлантического океана



Значения температуры
поверхности воды
Тихого океана

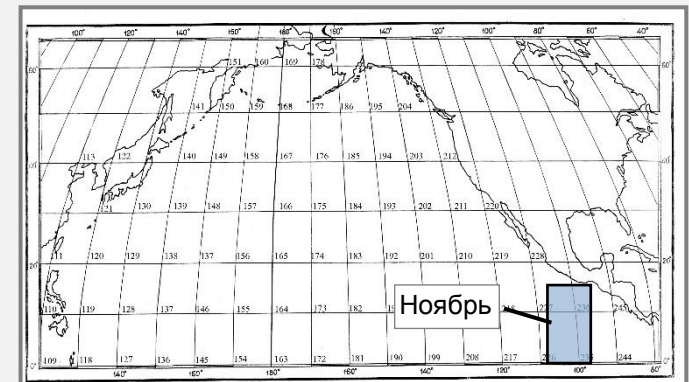


Рис. 2. Предикторы, отобранные для прогноза урожайности ярового ячменя по восьми субъектам Центрального федерального округа.

Технология составления прогноза

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.

Для расчета урожайности и валового сбора ярового ячменя по федеральным округам и России в целом разработан автоматизированный прогностический комплекс (рис. 3).

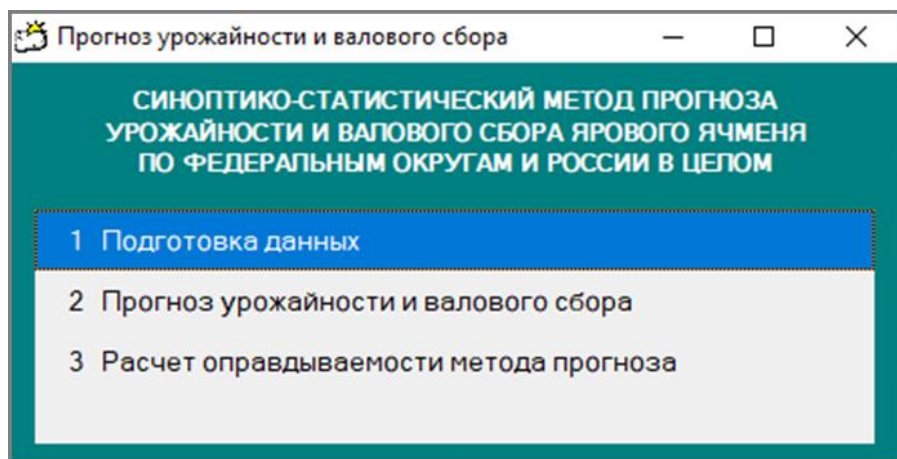


Рис. 3. Основное меню программного комплекса.

Расчет прогноза ярового ячменя проводится в три этапа.

1. В пункте меню «Подготовка данных» подготавливаются исходные данные для проведения расчетов: архив исходных данных пополняется вновь поступившими данными за предшествующий год (рис. 4):

- значения геопотенциала на уровне 500 гПа;
- значения температуры поверхности воды океанов;
- статистические данные.

2. В меню «Прогноз урожайности и валового сбора» рассчитываются прогностические значения урожайности и валового сбора ярового ячменя по федеральным округам и России в целом (рис. 5).

3. В меню «Расчет оправдываемости метода прогноза» рассчитывается оправдываемость метода долгосрочного прогноза валового сбора ярового ячменя по федеральным округам и России в целом. Расчет проводится по мере поступления фактических данных об урожайности и валовом сборе ярового ячменя на прогнозируемый год (рис. 6). Результаты расчетов автоматически заносятся в папку «Результаты прошлых лет».

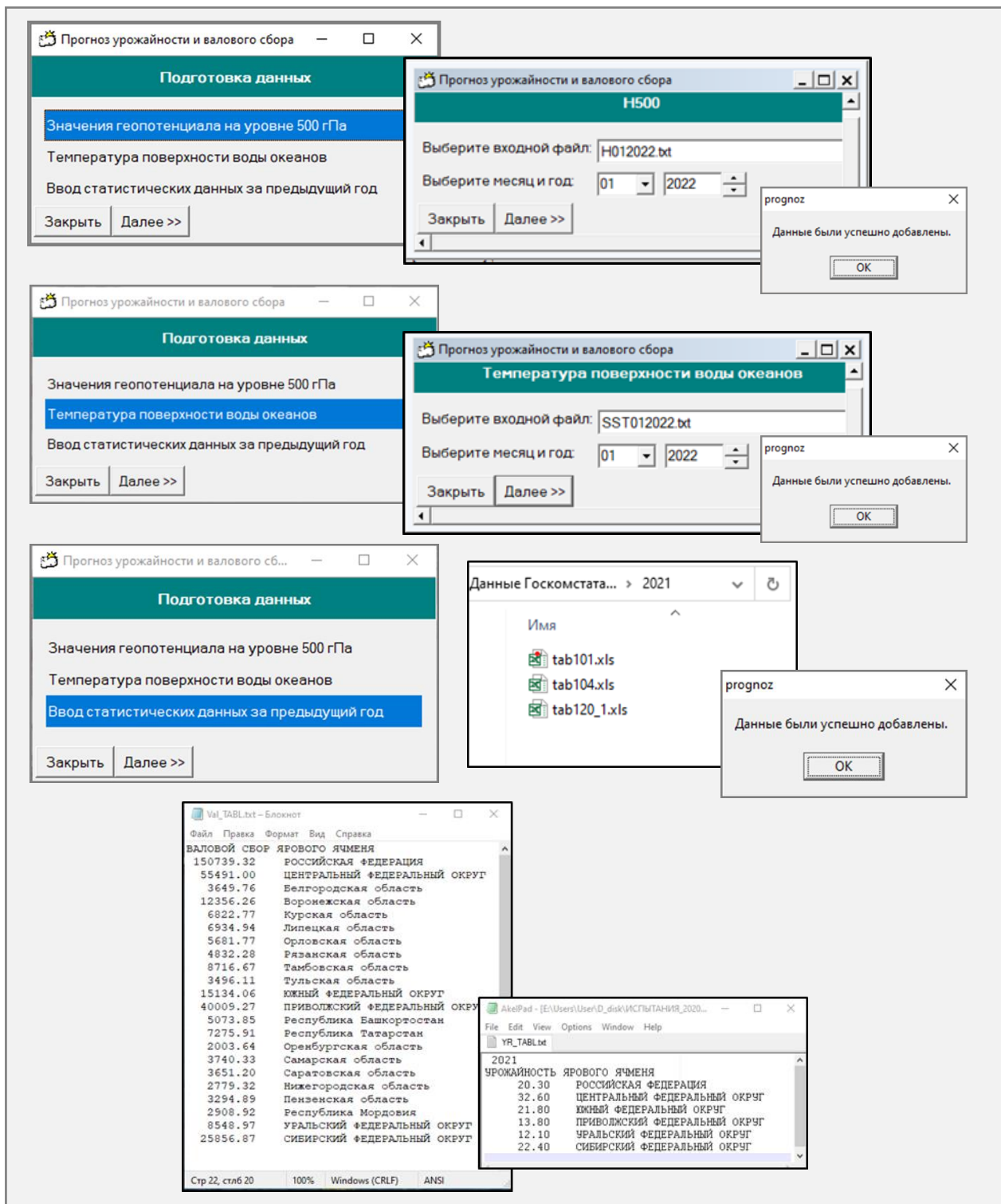


Рис. 4. Подпункты меню «Подготовка данных».

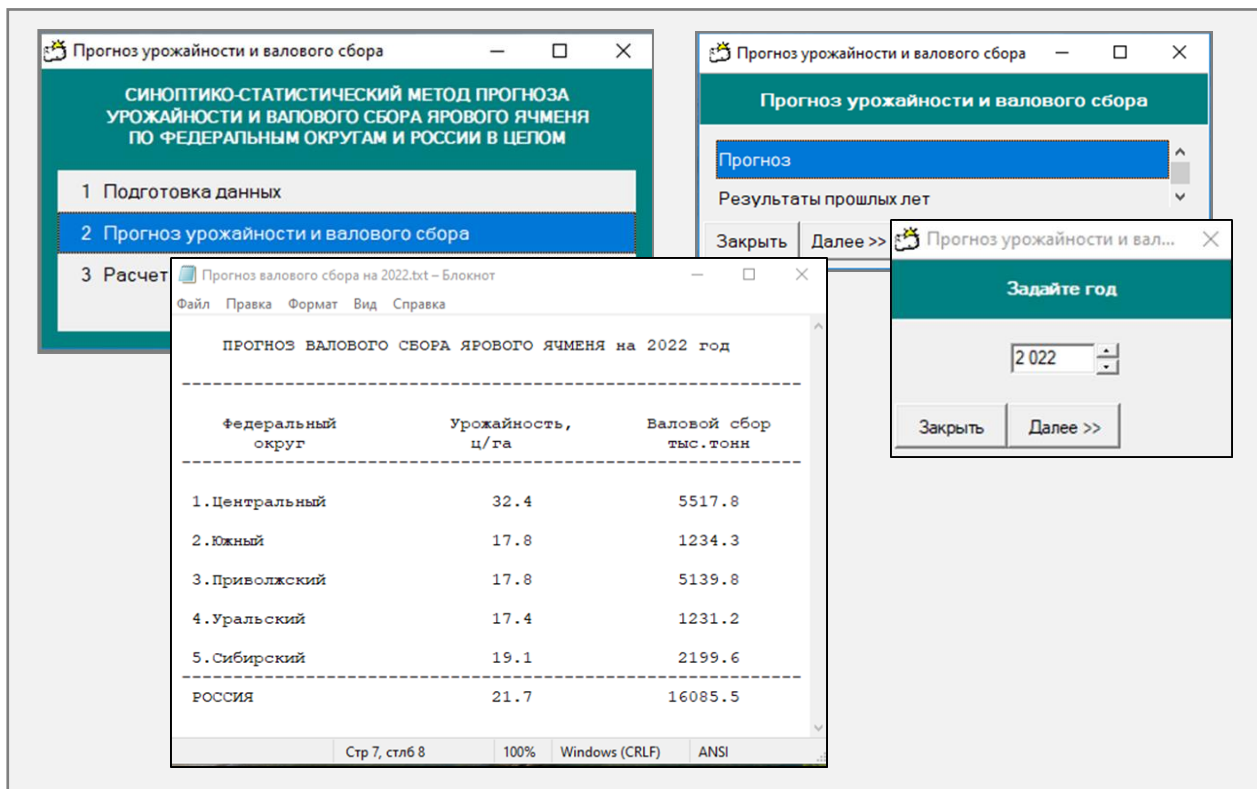


Рис. 5. Подпункты меню «Прогноз урожайности и валового сбора».

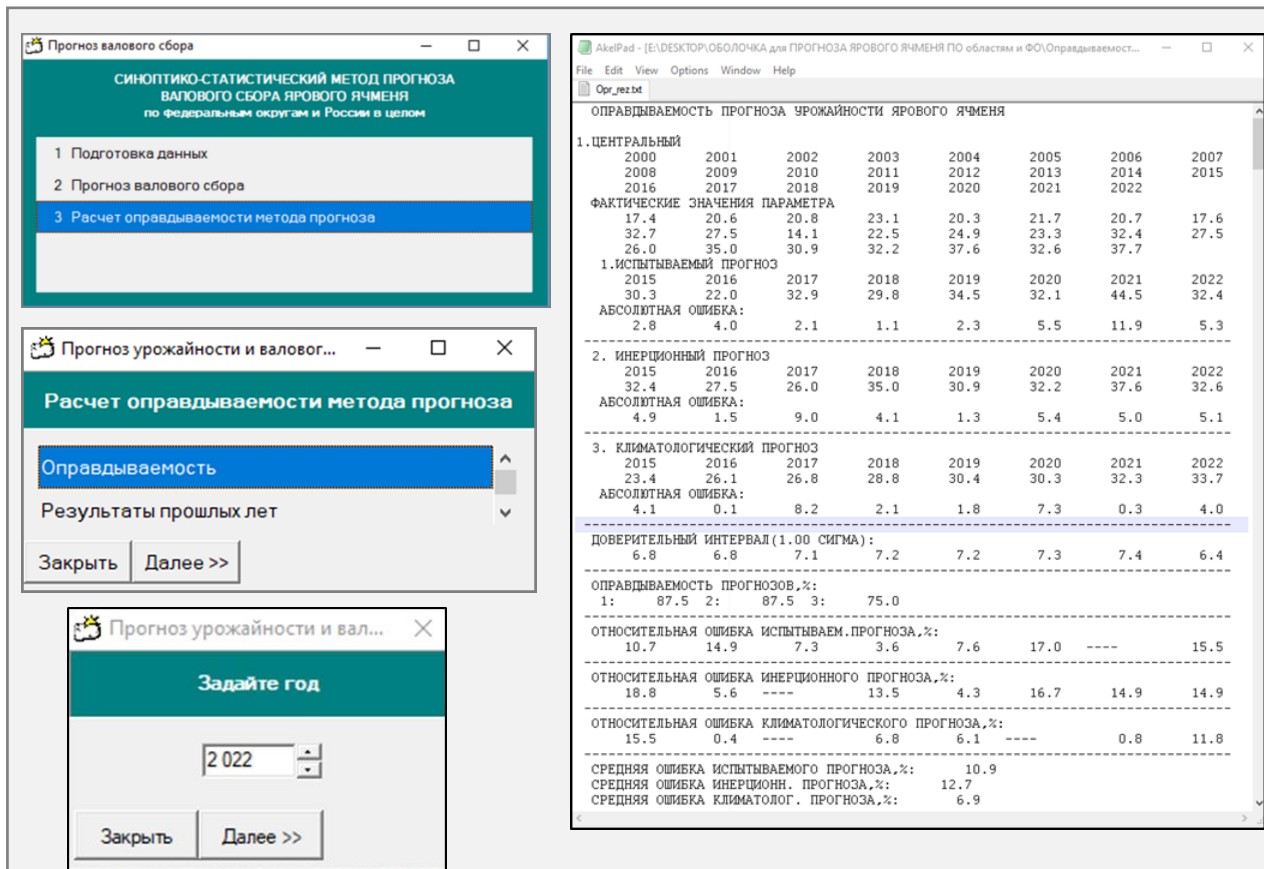


Рис. 6. Подпункты меню «Расчет оправдываемости метода прогноза».

Результаты испытаний метода прогноза

Авторские испытания метода прогноза урожайности и валового сбора зерновых культур проводились на данных 2015–2019 гг., а производственные – в ФГБУ «Гидрометцентр России» в течение трех лет с 2020 по 2022 год.

Оценка качества метода осуществлялась согласно РД 52.27.284-91 [14].

Критерии оправдываемости прогнозов:

- с заблаговременностью более четырех месяцев прогноз считается оправдавшимся, если его ошибка не превышает среднее квадратическое отклонение прогнозируемого элемента (σ),
- оправдываемость метода является выраженным в процентах отношением числа оправдавшихся прогнозов к числу всех прогнозов, составленных по данному методу;
- средняя ошибка представляет собой выраженную в процентах среднюю относительную ошибку оправдавшихся прогнозов.

При оценке оправдываемости метода по РД 52.27.284-91 [14] в трех федеральных округах (Центральном, Южном, Приволжском) оправдываемость испытываемого метода выше оправдываемости инерционного и климатологического. В Уральском федеральном округе при одинаковой оправдываемости метода (87,5 %) ошибка испытываемого метода оказалась равной 15,3 %, при этом у инерционного – несколько ниже, 12,6 %. В Сибирском федеральном округе оправдываемость метода составила 87,5 % (один прогноз не оправдался), в то время как по инерционному методу все прогнозы оправдались. В целом по Российской Федерации оправдываемость испытываемого метода выше оправдываемости инерционного и климатологического методов (табл. 3).

Оценка оправдываемости прогнозов в оперативной работе проводится в соответствии с Инструкцией по оценке оправдываемости агрометеорологических прогнозов [3]. 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 было составлено 18 прогнозов. При оценке оправдываемости прогнозов по «Инструкции...», в 2020 и 2021 годах не оправдались прогнозы в двух федеральных округах, в 2022 году – в одном федеральном округе. По результатам производственных испытаний средняя оправдываемость составленных прогнозов составляет 78–82 %, средняя оправдываемость оправдавшихся прогнозов составляет 82–90 % (табл. 4).

Таблица 3

Результаты авторских (2015–2019 гг.) и производственных (2020–2022 гг.) испытаний метода прогноза валового сбора зерновых и зернобобовых культур по федеральным округам и России в целом

Российская Федерация, федеральный округ	Метод прогноза урожайности					
	испытываемый		инерционный		климатологический	
	Оправды- ваемость, %	Ошибка %	Оправды- ваемость, %	Ошибка, %	Оправды- ваемость, %	Ошибка, %
Российская Федерация	87,5	9,7	75	13,7	75	8,8
Центральный ФО	87,5	10,9	87,5	12,7	75	6,9
Южный ФО	87,5	9,0	87,5	16,7	75	18,1
Приволжский ФО	87,5	17,3	62,5	21,3	75	15,0
Уральский ФО	87,5	15,3	87,5	12,6	62,5	10,5
Сибирский ФО	87,5	2,7	100	6,9	87,5	11,7

Таблица 4

Результаты производственных испытаний метода долгосрочного прогноза урожайности и валового сбора ярового ячменя по федеральным округам и России в целом

56

Российская Федерация, федеральный округ	Оправдываемость прогноза, %		
	2020 год	2021 год	2022 год
Российская Федерация	85,7	74,9	78,3
Центральный ФО	85,4	63,5	85,9
Южный ФО	94,3	86,2	81,3
Приволжский ФО	69,3	64,7	82,9
Уральский ФО	58,2	78,5	68,7
Сибирский ФО	96,0	99,1	80,6
Средняя оправдываемость, %	82	78	80
Средняя оправдываемость оправдавшихся прогнозов, %	90	85	82

Рекомендации о внедрении

Решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 25 декабря 2023 г. метод долгосрочного прогноза урожайности и валового сбора ярового ячменя по федеральным

округам и России в целом рекомендован для использования в оперативной практике отдела агрометеорологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» в качестве вспомогательного метода.

Список литературы

1. Инструкция по оценке оправдываемости агрометеорологических прогнозов. – М.: Гидрометеиздат, 1983. – 7 с.
2. *Исаев А.А.* Статистика в метеорологии и климатологии. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 248 с.
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 ВНИИСХМ.* – 2010. – Вып. 37. – С. 69–81.
5. *Лебедева В.М., Страшная А.И.* Основы сельскохозяйственной метеорологии». Том II. «Методы расчетов и прогнозов в агрометеорологии». Книга 2. «Оперативное агрометеорологическое прогнозирование: Учебное пособие. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. – 216 с.
6. *Лебедева В.М.* Синоптико-статистические методы прогноза урожайности озимых культур и теплообеспеченности вегетационного периода // *Труды ВНИИСХМ.* – 2013. – Вып. 38. – С. 71–86.
7. *Лебедева В.М., Береза О.В.* Результаты испытания метода долгосрочного прогноза валового сбора зерновых и зернобобовых культур в целом по федеральным округам и России в целом // *Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов.* – 2021. – Информационный сборник № 48. – С. 96–102.
8. *Мещерская А.В., Руховец Л.В., Юдин М.И., Яковлева Н.И.* Естественные составляющие метеорологических полей. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 200 с.
9. *Пасов В.М.* Путь увеличения заблаговременности составления прогноза урожая сельскохозяйственных культур // *Труды ИЭМ.* – 1971. – Вып. 22. – С. 82–88.
10. *Пасов В.М.* Численные эксперименты по составлению прогноза урожая яровых культур с большой заблаговременностью // *Метеорология и гидрология.* – 1972. – № 2. – С. 71–78.
11. *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.: Гидрометеиздат, 1985. – 39 с.
12. *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.
13. *Полевой А.Н.* Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 320 с.
14. 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.

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

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

²*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, г. Москва*

**Автоматизированная технология составления оценки условий
вегетации и прогноза урожайности сельскохозяйственных культур**

В системе оперативного агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства особая роль отводится агрометеорологическим прогнозам урожайности зерновых культур. Согласно Плану выпуска основных агрометеорологических прогнозов и докладов Росгидромета, прогноз средней урожайности и валового сбора зерна гречихи составляется по субъектам Российской Федерации в ФГБУ «Гидрометцентр России» 21 июня и уточняется 21 июля. По данным Росстата в Российской Федерации посевные площади под гречихой в среднем за пятилетний период 2018–2022 гг. составили 964,74 тыс. га, в том числе в Алтайском крае – 532,0 тыс. га, Башкортостане – 68,3 тыс. га, Оренбургской области – 37,2 тыс. га, Орловской области – 57,4 тыс. га. Валовые сборы гречихи заметно колеблются по годам в зависимости от урожайности, связанной с погодными условиями.

В ФГБУ «ВНИИСХМ» в 2017–2019 гг. на основе динамической модели формирования продукционного процесса сельскохозяйственных культур разработана динамическая модель и динамико-статистический метод прогноза урожайности гречихи, созданы методики для прогнозирования урожайности гречихи в субъектах РФ.

Данная работа является продолжением работ по разработке динамико-статистических методов прогнозов урожайности основных сельскохозяйственных культур (озимой и яровой пшеницы, озимой ржи, ярового ячменя, кукурузы на зерно, зерновых и зернобобовых

культур в целом, картофеля) для использования в оперативных подразделениях Росгидромета при составлении прогнозов урожайности и валового сбора сельскохозяйственных культур [5, 9–11, 13].

Временные ряды урожайности гречихи рассматриваются как сумма двух слагаемых – детерминированной составляющей, зависящей от культуры земледелия в конкретных почвенно-климатических условиях, и случайных отклонений от нее, обусловленных колебаниями погоды конкретных лет. Прогнозируемая урожайность рассчитывается с учетом обеих составляющих временного ряда: тренда – путем экстраполяции по методу гармонических весов и отклонений от тренда – с помощью метода оценки агрометеорологических условий формирования урожая. В основу моделирования продукционного процесса положено описание «поведения» ряда наблюдаемых физиологических процессов (фотосинтеза, дыхания, роста и распределения ассимилятов), т. е. «создается» некоторый реальный аналог жизни растений.

Числовые параметры, входящие константами в формулы, биометрические параметры, являющиеся характеристиками, присущими определенной сельскохозяйственной культуре, для гречихи установлены экспериментальным путем: динамика удельной поверхностной плотности листьев и стеблей, соотношение отдельных органов растений, сухой биомассы и площадь поверхности отдельных органов «среднего» растения гречихи на дату всходов. Данные получены в мелкоделяночных опытах, проводившихся ранее на агрометеорологической базе им. В.В. Синельникова в Калужской области [8].

59

Функциональные параметры (суммы эффективных температур воздуха), характеризующие влияние изменения возраста органов растения на интенсивность фотосинтеза, роста, дыхания, устанавливаются для территории каждого субъекта на основании данных об агроклиматических условиях произрастания сельскохозяйственных культур.

Начало периода расчета по модели определяется самой ранней средней многолетней датой всходов гречихи, а окончание – средней датой созревания на территории области. Суммы эффективных температур, устанавливающие точки перегиба, максимума и минимума в функциональных зависимостях, вычисляются в зависимости от средних многолетних дат наступления основных фаз развития гречихи (появление соцветий, цветение, созревание) на территории субъекта.

В используемой модели установлены функциональные зависимости параметров модели от текущих погодных условий, определяемых следующими оперативными декадными данными – значениями температуры воздуха и сумм осадков. Функция воздействия

температуры воздуха на фотосинтез представлена температурной кривой, а функция воздействия влажности почвы на фотосинтез заменена на функцию влияния осадков.

В основу количественной оценки агрометеорологических условий вегетации сельскохозяйственных культур положено отношение биомассы репродуктивного органа, рассчитанной по модели с использованием информации, характеризующей условия оцениваемого периода, к биомассе репродуктивного органа, рассчитанной по модели по средним многолетним данным. Численное значение оценки (С) позволяет количественно характеризовать условия формирования урожая. Если численное значение оценки близко к 100 %, то агрометеорологические условия оцениваемого периода близки к средним многолетним. Значение «С» больше 100 % означает, что условия оцениваемого периода более благоприятны для формирования урожая по сравнению со средними многолетними значениями. Худшие условия формирования урожая по сравнению со среднемноголетними условиями характеризуются значением оценки меньше 100 % (рис. 1).

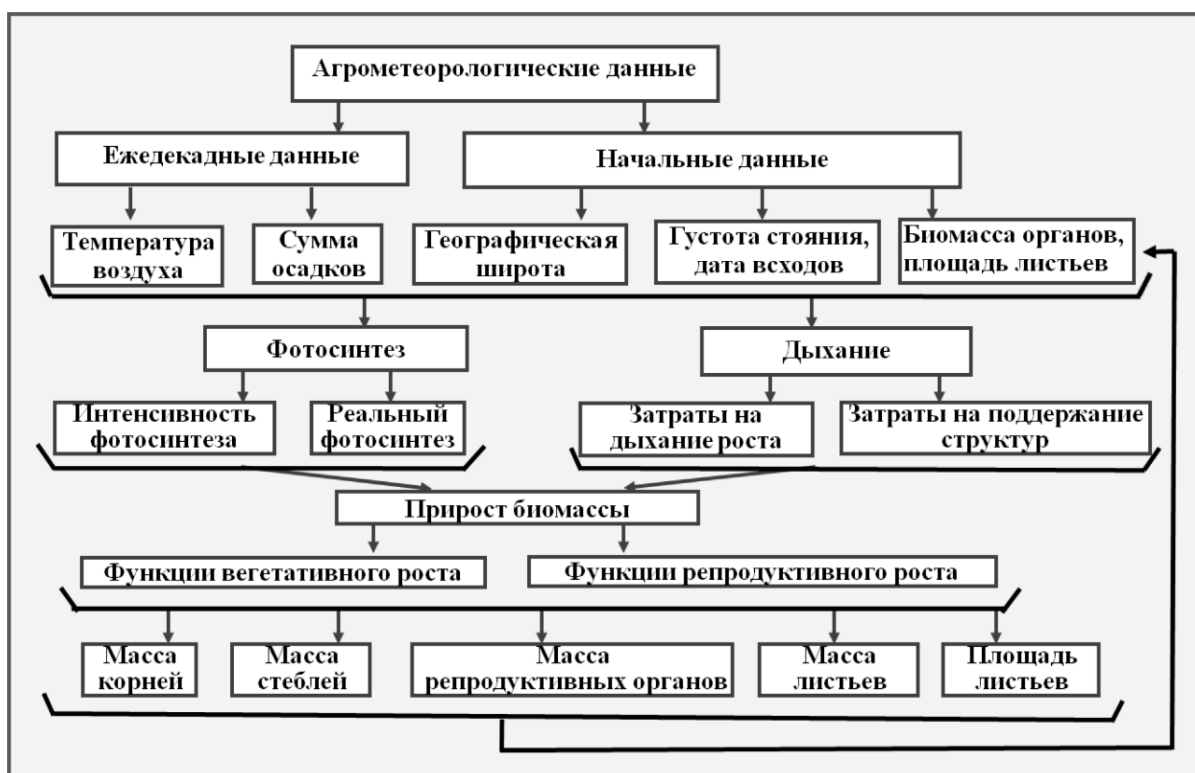


Рис. 1. Блок-схема динамической модели продукционного процесса продуктивности сельскохозяйственных растений.

Создание динамической модели продукционного процесса и динамико-статистического метода прогноза урожайности гречихи позволили разработать методики прогноза урожайности указанной культуры для 20 субъектов РФ (субъекты, в которых валовой сбор гречихи составляет более 5 тыс. т).

После проведения авторских испытаний разработанного метода прогноза урожайности гречихи по субъектам РФ, в существующей информационно-прогностической системе (ИПС) создана новая подсистема оценки условий вегетации и прогноза урожайности гречихи по 20 субъектам РФ.

Блок-схема автоматизированной технологии составления оценки условий вегетации и прогноза урожайности сельскохозяйственных культур в ИПС представлена на рис. 2.

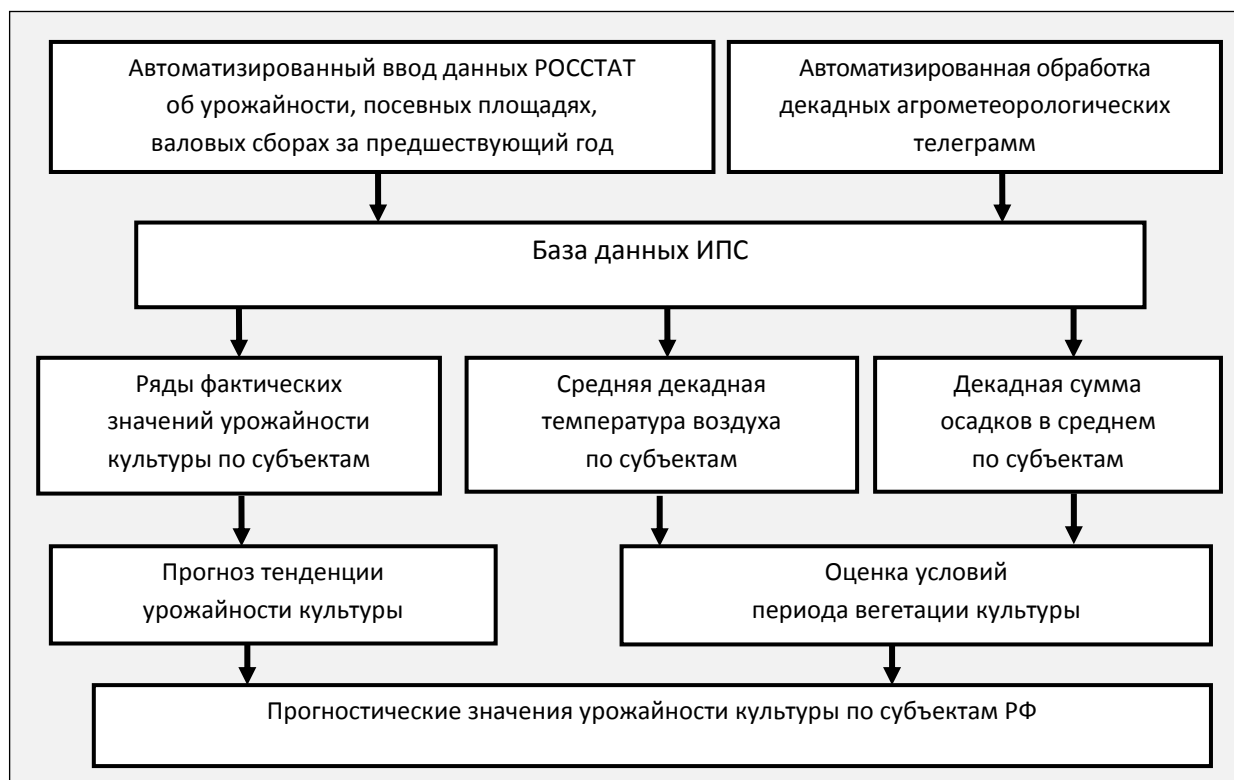


Рис. 2. Блок-схема автоматизированной технологии составления оценок условий вегетации и прогноза урожайности сельскохозяйственных культур.

База данных ИПС содержит оперативные агрометеорологические данные, полученные в результате обработки декадных телеграмм, а также данные Росстата 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 РФ, установленные Планом выпуска основных агрометеорологических прогнозов и докладов [1, 2, 4, 6, 7, 14].

В существующей информационно-прогностической системе (ИПС) создана новая подсистема оценки условий вегетации и прогноза урожайности гречихи по 20 субъектам РФ.

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 РФ: 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 гречихи в определенных почвенно-климатических условиях конкретного субъекта).

Из базы оперативных данных в расчетах используются оперативные данные о средних декадных значениях температуры воздуха и декадных суммах осадков по станциям, ряды урожайности гречихи с уборочной площади 1971 года по год прогноза, а также оперативные статистические данные по субъектам РФ о размерах посевных площадей, занятых сельскохозяйственными культурами в текущем сельскохозяйственном году. Данные о посевных площадях необходимы для расчета ожидаемого валового сбора в прогнозируемом году по территории конкретного субъекта РФ и расчета прогноза урожайности по федеральным округам и России в целом. После получения фактических данных об урожайности культуры за прогнозируемый год и внесения их в базу данных, предусмотрена оценка оправдываемости составленных прогнозов в соответствии с действующей Инструкцией по оценке оправдываемости оперативных агрометеорологических прогнозов [3]. Критерием оценки оправдываемости оперативных прогнозов урожайности является относительная ошибка (P , %) – частное от деления абсолютной разности между фактической и прогнозируемой урожайностью на фактическую урожайность, выраженное в процентах. Оправдываемость прогнозов (%) рассчитывается по формуле: $100 \% - P$.

Разработанная в ФГБУ «ВНИИСХМ» информационная подсистема оценки условий вегетации и прогноза гречихи по субъектам РФ с включенной в нее схемой расчета прогноза урожайности гречихи по территории федеральных округов и России в целом на основе прогноза урожайности по субъектам была установлена в ИПС ФГБУ «Гидрометцентр России» для производственных испытаний.

На рис. 3 показаны основные меню ИПС, с помощью которых осуществляется расчет прогнозируемой урожайности гречихи.

Примеры выходных файлов подсистемы прогноза урожайности гречихи по субъектам РФ и с расчетом оправдываемости составленных оперативных прогнозов приведены на рис. 4 и 5.

В период вегетации гречихи в ИПС ежедекадно можно получать оценку условий вегетации гречихи по сравнению со средними многолетними условиями, приравненными

к 100 %. На рис. 6 показан пример оценки условий вегетации гречихи, сложившихся на конец третьей декады июня в 2022 году.

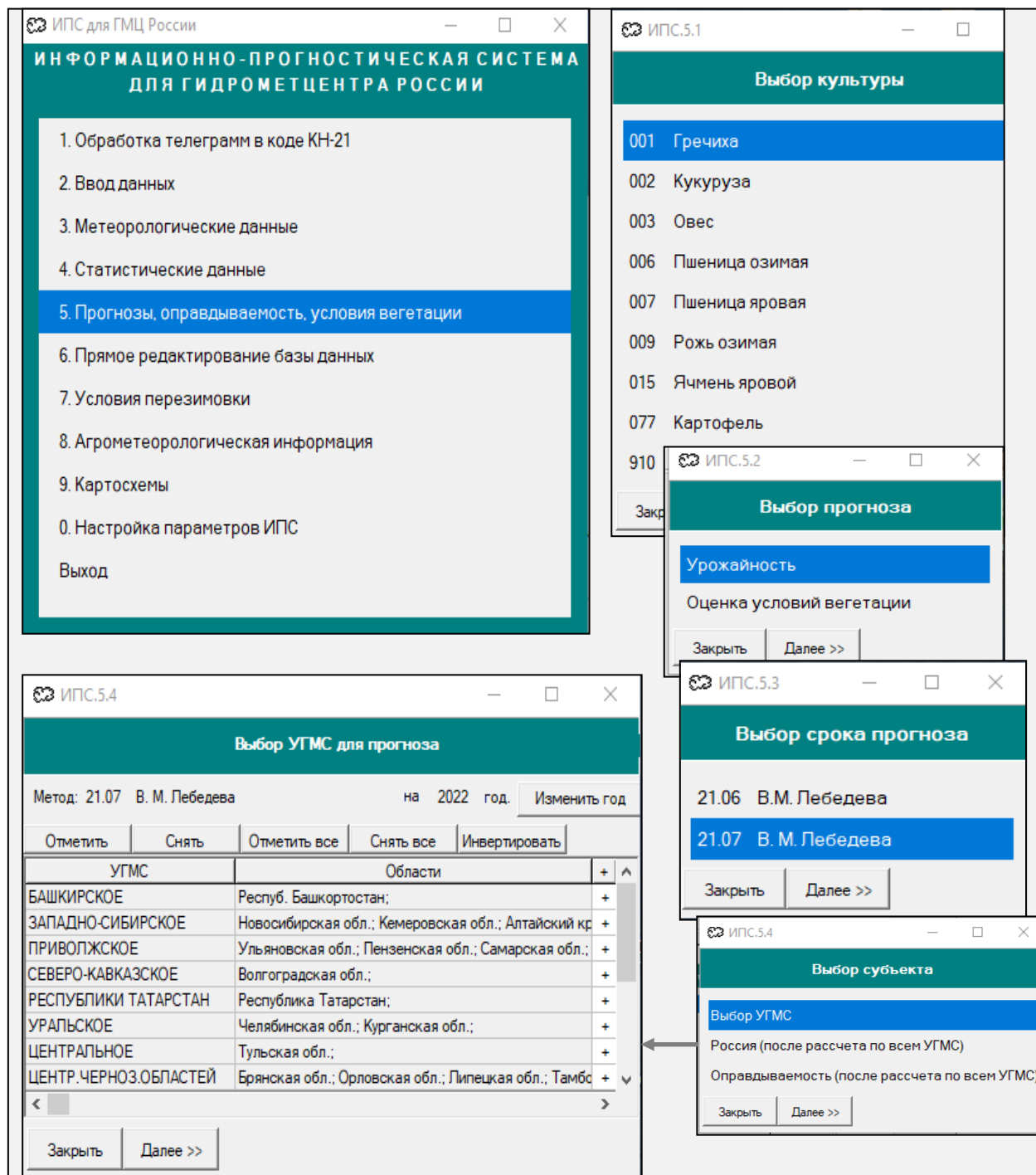


Рис. 3. Меню ИПС, используемые для расчета прогнозируемой урожайности гречихи.

Прогноз урожайности в расчете с уборочной площади на 21.07.2022					
Культура - Гречиха					
Автор(ы) метода: В. М. Лебедева					
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	13,2	95,2	12,60	2,00	2.52
Брянская область	10,3	110,7	11,40	5,70	6.49
Воронежская область	11,0	98,4	10,90	7,20	7.82
Курская область	12,9	91,4	11,80	10,00	11.77
Липецкая область	11,7	76,4	8,90	6,50	5.81
Орловская область	11,9	87,7	10,40	46,90	48.80
Тамбовская область	12,0	95,6	11,50	7,70	8.85
Тульская область	11,9	109,4	13,10	11,20	14.64
			11.0	97,20	106.75
ЮЖНЫЙ					
Волгоградская область	8,0	105,8	8,50	2,00	1.70
			8.5	2,00	1.70
ПРИВОЛЖСКИЙ					
Пензенская область	9,5	100,9	9,60	5,20	4.98
Республика Башкортостан	9,6	107,9	10,30	72,90	75.38
Республика Татарстан	11,0	88,3	9,70	15,20	14.77
Самарская область	9,0	108,0	9,70	8,70	8.46
Саратовская область	8,1	88,1	7,10	9,90	7.02
Ульяновская область	8,5	103,2	8,80	5,30	4.65
			9.8	117,20	114.96
УРАЛЬСКИЙ					
Курганская область	10,0	124,1	12,40	21,50	26.65
Челябинская область	7,1	133,8	9,60	29,30	27.99
			10.8	50,80	54.79
СИБИРСКИЙ					
Алтайский край	9,6	106,2	10,10	655,30	664.36
Кемеровская область	10,3	97,6	10,10	0,00	0.00
Новосибирская область	10,0	99,5	10,00	55,10	55.03
			10.1	710,40	716.95
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ			10,2	977.60	995.15

Рис. 4. Пример файла с результатами расчета ожидаемой урожайности гречихи по субъектам РФ и федеральным округам.

Оправдываемость метода прогноза урожайности на 21.07.2022				
Культура - Гречиха				
Автор(ы) метода: В. М. Лебедева				
Субъект Российской Федерации	Прогноз урожайности, ц/га	Фактическая урожайность, ц/га	Относительная ошибка, %	Оправдываемость прогноза, %
Брянская обл.	11.4	9.7	17,2	82,8
Орловская обл.	10.4	13.0	20,3	79,7
Липецкая обл.	8.9	15.6	42,8	57,2
Тамбовская обл.	11.5	11.9	3,7	96,3
Курская обл.	11.8	17.9	34,0	66,0
Белгородская обл.	12.6	16.1	21,7	78,3
Воронежская обл.	10.9	13.3	18,3	81,7
Тульская обл.	13.1	14.5	9,5	90,5
Республика Татарстан	9.7	11.8	18,1	81,9
Ульяновская обл.	8.8	12.7	30,5	69,5
Пензенская обл.	9.6	10.6	9,1	90,9
Самарская обл.	9.7	10.9	10,9	89,1
Саратовская обл.	7.1	10.0	28,8	71,2
Оренбургская обл.				
Волгоградская обл.	8.5	7.8	9,1	90,9
Челябинская обл.	9.6	7.9	21,7	78,3
Курганская обл.	12.4	12.3	0,5	99,5
Респуб. Башкортостан	10.3	11.1	6,9	93,1
Новосибирская обл.	10.0	10.0	0,3	99,7
Кемеровская обл.	10.1			
Алтайский кр.	10.1	11.3	10,8	89,2

Рис. 5. Пример файла с результатами расчета оправдываемости прогнозов урожайности гречихи.

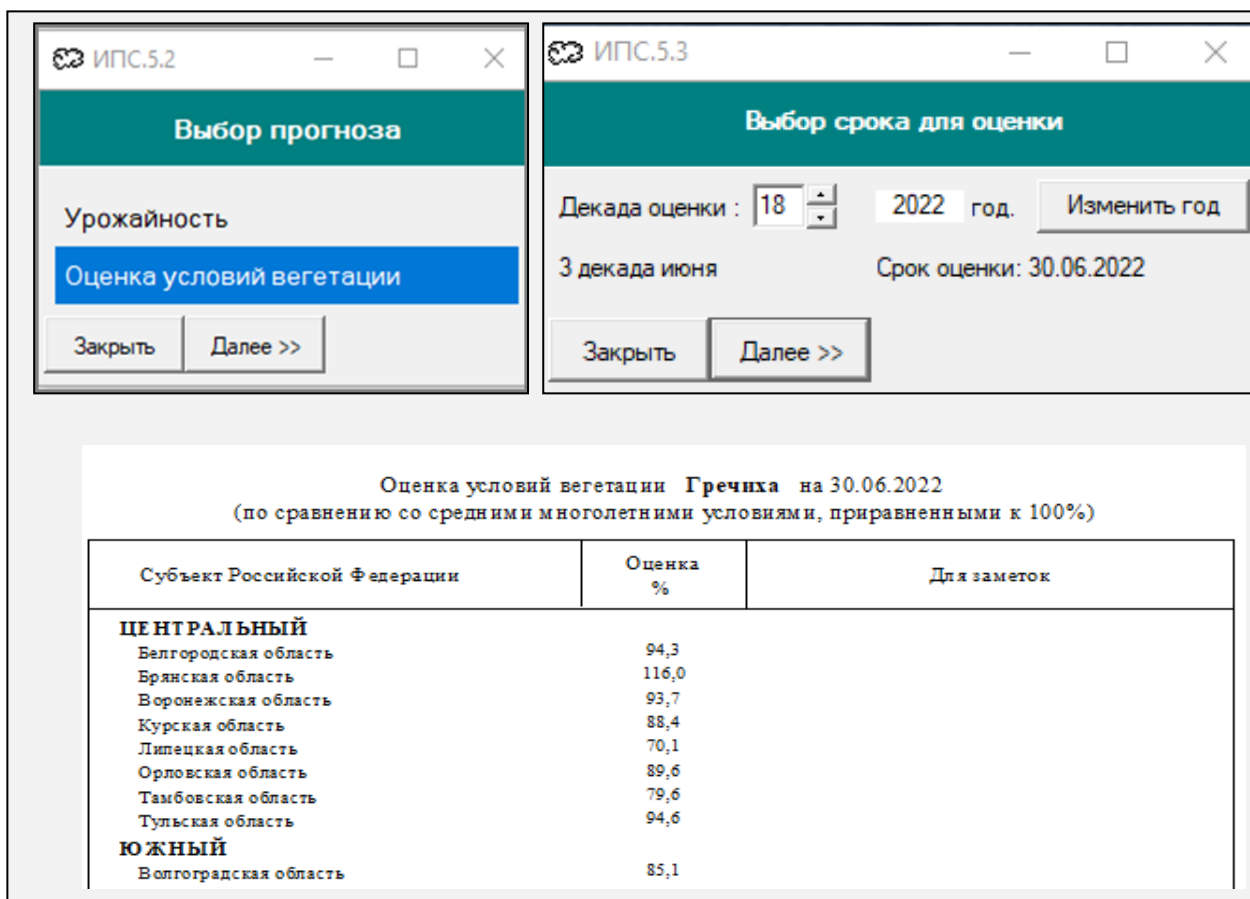


Рис. 6. Меню ИПС и пример файла с оценкой условий вегетации гречихи, сложившихся на конец третьей декады июня в 2022 г.

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

Производственные испытания метода проводились в ФГБУ «Гидрометцентр России» в рамках ИПС в течение трех лет: в 2017–2019 гг. были проведены испытания метода прогноза гречихи по 20 субъектам РФ. Прогнозы урожайности гречихи составляются в вегетационный период с различной заблаговременностью до созревания: за два месяца – 21 июня, за один месяц – 21 июля.

Согласно Методическим указаниям [12] 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 и 2 показаны результаты авторских и производственных испытаний динамико-статистического метода прогноза урожайности гречихи для двух сроков прогноза. Для сравнения в таблицах приведены прогностические значения урожайности гречихи, рассчитанные с помощью инерционного и климатологического методов прогнозов [9].

В первый срок прогноза по РД 52.27.284–91 оправдываемость испытываемого метода для 15 субъектов Европейской территории России составила 87 %. При этом в Брянской и Самарской областях оправдываемость испытываемого метода оказалась несколько ниже, чем в инерционном и (или) климатологическом методе. Во второй срок прогноза оправдываемость метода по территории ЕТР составила 93 %, так как в Брянской области оправдываемость испытываемого метода составила 87 %, а инерционного – 100 % (табл. 1, 2).

По пяти субъектам Азиатской территории России в первый срок прогноза оправдываемость испытываемого метода составила 90 %; поскольку в Кемеровской области при оправдываемости прогнозов, равной 75 %, ошибка оправдавшихся прогнозов по инерционному методу оказалась ниже, чем по испытываемому, соответственно, 8,1% и 9,1 %. Во второй срок прогноза оправдываемость испытываемого метода составила 100 % (табл. 1, 2).

В табл. 3 приведены результаты оценки прогнозов по относительной ошибке за три года производственных испытаний в ФГБУ «Гидрометцентр России» в соответствии с Инструкцией по оценке оправдываемости агрометеорологических прогнозов [3].

Результаты производственных испытаний по субъектам Европейской территории России (15 субъектов) в 2020 и 2022 гг. показали хорошую оправдываемость испытываемого метода прогноза в оба срока его составления, средняя относительная ошибка прогнозов составила 81–82 %, а оправдываемость метода по территории составляет 79–86 %.

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

Субъект Российской Федерации	Метод прогноза					
	испытываемый		инерционный		климатологический	
	Оправды- ваемость, %	Ошибка, %	Оправды- ваемость, %	Ошибка %	Оправды- ваемость, %	Ошибка, %
Европейская территория России						
1. Брянская обл.	87,5	8,8	100	9,4	87,5	8,1
2. Орловская обл.	62,5	8,4	62,5	15,1	62,5	15,3
3. Липецкая обл.	50,0	5,8	37,5	15,2	50,0	16,0
4. Тамбовская обл.	87,5	11,1	62,5	14,8	62,5	24,5
5. Курская обл.	62,5	6,6	62,5	8,1	62,5	10,5
6. Белгородская обл.	75,0	8,4	25,0	5,5	62,5	12,7
7. Воронежская обл.	87,5	10,4	62,5	11,1	50,0	11,8
8. Тульская обл.	75,0	9,1	25,0	14,6	50,0	19,6
9. Респ. Татарстан	87,5	13,2	37,5	15,3	87,5	18,2
10. Пензенская обл.	87,5	16,8	62,5	12,7	75,0	15,3
11. Самарская обл.	75,0	9,7	62,5	12,1	87,5	17,5
12. Саратовская обл.	75,0	8,8	50,0	16,5	75,0	20,4
13. Оренбургская обл.	62,5	15,0	25,0	4,8	62,5	22,5
14. Волгоградская о.	75,0	5,2	75,0	18,2	75,0	14,0
15. Респ. Башкортостан	100	8,4	62,5	9,7	75	10,1
Среднее	76,7	9,7	54,2	12,2	68,3	15,8
Оправдываемость по территории	87					
Азиатская территория России						
16. Челябинская обл.	100	11,2	100	16,0	87,5	10,7
17. Курганская обл.	100	10,9	87,5	10,5	100	12,9
18. Новосибирская обл.	87,5	10,2	75,0	11,5	62,5	9,7
19. Кемеровская обл.	75,0	9,1	62,5	13,2	75,0	8,1
20. Алтайский край	87,5	9,9	62,5	7,1	75,0	8,3
Среднее	90	10,3	77,5	11,7	80	9,9
Оправдываемость по территории	80					

Результаты авторских и производственных испытаний
динамико-статистического метода прогноза урожайности гречихи
с заблаговременностью два месяца (второй срок прогноза)

Субъект Российской Федерации	Метод прогноза					
	испытываемый		инерционный		климатологический	
	Оправды- ваемость, %	Ошибка, %	Оправды- ваемость %	Ошибка %	Оправды- ваемость %	Ошибка, %
Европейская территория России						
1. Брянская обл.	87,5	8,4	100	9,6	87,5	7,8
2. Орловская обл.	62,5	12,4	50,0	13,0	37,5	10,0
3. Липецкая обл.	62,5	10,1	25,0	9,2	37,5	13,6
4. Тамбовская обл.	87,5	10,7	37,5	11,3	50,0	18,3
5. Курская обл.	62,5	7,9	62,5	8,1	62,5	10,5
6. Белгородская обл.	62,5	8,2	25,0	5,5	50,0	10,1
7. Воронежская обл.	87,5	10,3	62,5	11,1	50,0	11,8
8. Тульская обл.	87,5	7,3	12,5	3,9	25,0	10,6
9. Респ. Татарстан	100,0	12,1	25,0	7,7	75,0	17,1
10. Пензенская обл.	87,5	11,0	62,5	12,3	75,0	15,2
11. Самарская обл.	87,5	6,3	62,5	12,1	75,0	15,1
12. Саратовская обл.	75,0	13,1	50,0	16,5	50,0	14,5
13. Оренбургская обл.	62,5	9,3	25,0	9,3	37,5	18,9
14. Волгоградская о.	87,5	9,3	62,5	15,1	50,0	7,8
15. Респ. Башкортостан	87,5	4,9	62,5	9,7	75,0	10,1
Среднее	79,2	9,4	48,3	10,3	55,8	12,8
Оправдываемость по территории	93					
Азиатская территория России						
16. Челябинская обл.	87,5	9,1	87,5	13,9	87,5	10,7
17. Курганская обл.	87,5	4,8	87,5	10,5	100	12,9
18. Новосибирская обл.	100,0	9,1	62,5	10,8	50,0	5,9
19. Кемеровская обл.	75,0	8,2	37,5	9,6	62,5	6,6
20. Алтайский край	87,5	9,4	62,5	7,1	62,5	5,5
Среднее	87,5	8,1	67,5	10,4	72,5	8,3
Оправдываемость по территории	100					

Оправдываемость прогнозов урожайности гречихи
по субъектам РФ в период производственных испытаний
в Гидрометцентре России в 2020–2022 гг.

Субъект Российской Федерации	Оправдываемость прогноза, %					
	2020 год		2021 год		2022 год	
	21.06	21.07	21.06	21.07	21.06	21.07
Европейская территория России						
1. Тульская обл.	98	93	46	92	94	90
2. Брянская обл.	100	91	51	46	81	82
3. Орловская обл.	61	63	56	54	83	80
4. Липецкая обл.	69	67	14	41	58	58
5. Тамбовская обл.	94	100	0	0	96	97
6. Курская обл.	72	73	63	18	68	66
7. Белгородская обл.	98	98	40	19	82	78
8. Воронежская обл.	74	73	19	52	81	82
9. Пензенская обл.	63	67	69	80	85	91
10. Самарская обл.	75	82	45	89	83	89
11. Саратовская обл.	95	76	29	9	69	71
12. Оренбургская обл.	82	96	–	–	–	–
13. Респ.. Башкортостан	78	76	92	90	88	93
14. Респ. Татарстан	83	81	0	83	80	82
15. Волгоградская обл.	77	82	37	73	100	91
Среднее	81,3	81,2	40,1	53,3	82,0	82,1
Оправдываемость по территории	80,0	80,0	7,1	42,8	78,6	85,7
Азиатская территория России						
16. Челябинская обл.	74	64	86	76	94	87
17. Курганская обл.	95	90	75	75	93	99
18. Новосибирская обл.	73	91	99	87	88	98
19. Кемеровская обл.	80	83	80	81	94	84
20. Алтайский край	86	90	92	91	91	89
Среднее	81,6	83,6	86,4	82,0	92,0	91,4
Оправдываемость по территории	100	80	100	100	100	100

В 2021 году прогноз по Европейской территории России по большинству субъектов не оправдался, особенно по Тамбовской, Оренбургской областям и Республике Татарстан. В 2021 году в указанных субъектах в критически важный период формирования зерна гречихи (вторая

декада июня – вторая декада июля) наблюдалась жаркая, преимущественно сухая погода, во многих областях наблюдались низкие запасы продуктивной влаги и суховейные явления.

По пяти субъектам Азиатской территории России оправдываемость метода в период производственных испытаний дала хорошие результаты. Всего было составлено 30 прогнозов и только один из них был с оправдываемостью 64 % (Челябинская область, прогноз на 21 июля 2020 г.).

Рекомендации о внедрении

Решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 25 декабря 2023 года автоматизированная технология составления оценок условий вегетации и прогнозов урожайности гречихи по 20 субъектам Российской Федерации рекомендована в качестве основного расчетного метода в ФГБУ «Гидрометцентр России». Методики прогноза урожайности гречихи по Тамбовской, Оренбургской областям и Республике Татарстан рекомендовано доработать в целях повышения оправдываемости прогноза.

В 2020–2021 гг. метод прогноза урожайности успешно прошел испытания в Центральном, Приволжском, Башкирском, Уральском УГМС и УГМС Республики Татарстан. Решениями Технических советов пяти УГМС метод был внедрен в оперативную практику в качестве основного метода для восьми субъектов и для одного субъекта – в качестве вспомогательного метода.

70

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.: Гидрометеиздат, 1983. – 7 с.

4. *Клещенко 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.* Учебное пособие «Основы сельскохозяйственной метеорологии» Том II. «Методы расчетов и прогнозов в агрометеорологии». Книга 2. «Оперативное агрометеорологическое прогнозирование». – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. – 216 с.

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

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

8. *Коченова Р.П.* Об определении параметров динамической модели формирования урожая гречихи // Труды ВНИИСХМ. – 1986. – Вып.18. – С. 53–59.

9. *Полевой А.Н.* Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов. – Л.: Гидрометеоиздат. 1988. – 320 с.

10. *Полевой А.Н., Русакова Т.И. и др.* Прикладная динамическая модель формирования урожая сельскохозяйственных культур // Сборник докладов: «Гидрометеорологическое обеспечение агропромышленного комплекса страны». – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – С. 15–31.

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

12. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. – С. 98–107.

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

14. *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.

Методика краткосрочного и среднесрочного прогноза уровней воды на реках бассейна Тобола

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

Введение

Краткосрочные с заблаговременностью до 5–6 суток и среднесрочные с заблаговременностью от 6–7 до 10–15 суток прогнозы речного стока дают гидрологическую информацию, необходимую для научно обоснованного планирования и эффективного проведения мероприятий по использованию водных ресурсов и защите населения от неблагоприятных и опасных явлений, связанных с водным режимом рек [9, 11–13].

Для рек бассейна Тобола прогнозы уровней воды необходимы для предупреждения о резких изменениях их водного режима (наводнениях, маловодьях), которые учитываются при проведении противопаводочных мероприятий, организации судоходства и лесосплава, использования водных ресурсов многочисленных прудов и водохранилищ сезонного регулирования [6, 8].

При выборе методики прогнозирования, помимо заблаговременности и точности выпускаемых с ее помощью прогнозов, необходимо учитывать трудоемкость их получения, а также возможность использования этой методики в рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов и своевременного доведения прогностической информации до всех заинтересованных потребителей в удобном для них виде. Таким образом, при прочих равных условиях предпочтение следует отдавать более простым методикам прогнозирования [5].

Именно требованиям достаточно высокого качества прогнозов и простоты их получения отвечает предлагаемая методика краткосрочного и среднесрочного прогнозирования уровней воды на реках бассейна Тобола, разработанная в ФГБУ «Гидрометцентр России». В ее основе лежит разработанный там же метод экстраполяции гидрографа, а при разработке использованы данные гидрологических наблюдений за последние десятилетия, предоставленные ФГБУ «Уральское УГМС».

Общие сведения о бассейне Тобола

Река Тобол является левым и самым многоводным притоком Иртыша. Длина реки 1591 км, площадь водосбора 426 000 км², средний расход воды 805 м³/с. Берет начало в Оренбургской области на границе восточных отрогов Южного Урала и Тургайской Столовой страны, далее течет по территории Республики Казахстан. Среднее и нижнее течение реки в пределах Западно-Сибирской равнины. Крупнейшие притоки слева – Уй, Исеть, Тура, Тавда, справа – Убаган.

Питание в основном снеговое, вниз по течению возрастает доля дождевого питания. Половодье с 1-й половины апреля до середины июня в верховьях и до начала августа в низовьях. Замерзает в низовьях в конце октября – ноябре, в верховьях в ноябре, вскрывается во 2-й половине апреля – 1-й половине мая [8].

Основная часть бассейна расположена в таежной зоне. Верховья левых притоков Тобола расположены в горно-таежной зоне, южная часть бассейна реки Миасс расположена в лесостепной зоне. Годовая сумма осадков составляет 800–900 мм на Среднем Урале, 1200–1500 мм на Южном Урале, на равнинной части осадки снижаются до 500–600 мм в таежной зоне и до 350–400 мм в лесостепной. Средняя годовая температура от -2 °С до +1,5 °С. В горных районах температура снижается с высотой на 0,5–0,7 °С на 100 метров подъема. В холодный период градиент температуры меньше, чем в теплый. Заболоченность достигает 50 % на севере и к югу резко снижается. Озерность в среднем оставляет 5–6 % [1].

Сток малых рек зарегулирован прудами и водохранилищами сезонного регулирования. Наиболее крупными являются Аргазинское водохранилище на р. Миасс, Белоярское на р. Пышма и Исетское на р. Исеть. На территории Казахстана сток Верхнего Тобола зарегулирован каскадом водохранилищ – Желкуарским, Верхнетобольским, Каратамарским, Сергеевским и Амангельдинским [6].

Метод экстраполяции гидрографа

Метод экстраполяции гидрографа разработан в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» и предназначен для реализации в рамках автоматизированной системы подготовки и ежедневного выпуска прогнозов расходов и уровней воды в течение всего года [3, 5].

Метод основан на том, что характерный для достаточно крупных равнинных рек плавный ход ежедневных уровней воды дает возможность его экстраполяции на несколько суток вперед и определения прогноза с заблаговременностью Δt суток в виде обобщенного полинома. Оценка $k+1$ параметров этого полинома по известным к дате составления

прогноза t среднесуточным уровням воды $H(t), H(t-1), \dots, H(t-k)$ приводит к тому, что получаемый путем такой экстраполяции прогноз определяется формулой:

$$\hat{H}(t+\Delta t) = \sum_{i=0}^k a_i(\Delta t)H(t-i) + b(\Delta t). \quad (1)$$

Параметры $a_0(\Delta t), a_1(\Delta t), \dots, a_k(\Delta t), b(\Delta t)$ и оптимальное значение k зависят от заблаговременности прогноза Δt и подлежат оценке по данным гидрологических наблюдений.

Определяемые формулой (1) величины $\hat{H}(t+\Delta t)$ могут принимать недопустимо высокие и низкие значения. Недопустимо высокие значения $\hat{H}(t+\Delta t)$ могут возникать при прогнозировании уровней воды на крутом подъеме половодья или паводка. Недопустимо низкие и даже отрицательные значения $\hat{H}(t+\Delta t)$ могут возникать при прогнозировании уровней воды на крутом спаде половодья или паводка.

Во избежание необоснованно низких и высоких значений прогноза результаты применения формулы (1) корректируются путем замены экстремальных значений $\hat{H}(t+\Delta t)$ допустимым минимумом $\min H$ или максимумом $\max H$. Окончательный прогноз уровня воды выражается формулой:

$$\tilde{H}(t+\Delta t) = \begin{cases} \min H, & \text{если } \hat{H}(t+\Delta t) < \min H; \\ \hat{H}(t+\Delta t), & \text{если } \min H \leq \hat{H}(t+\Delta t) \leq \max H; \\ \max H, & \text{если } \hat{H}(t+\Delta t) > \max H. \end{cases} \quad (2)$$

Входящие в формулу (2) допустимые минимум $\min H$ и максимум $\max H$ значений уровня воды подлежат определению по всему имеющемуся для каждого речного створа ряду гидрологических наблюдений с использованием трехпараметрического гамма-распределения вероятностей и методов статистического оценивания, изложенных в работе [9]. Допустимый для прогноза минимум $\min H$ определяется как значение годового минимума среднесуточного уровня воды $H_{\min}(99\%)$, соответствующее вероятности превышения (обеспеченности) 99 % и округленное до целой величины в меньшую сторону. Допустимый для прогноза максимум $\max H$ определяется как значение годового максимума среднесуточного уровня воды $H_{\max}(1\%)$, соответствующее обеспеченности 1 % и округленное до целой величины в большую сторону. Подобная оценка величин $\min H$ и $\max H$ гарантирует, что в течение десяти последующих лет использования предлагаемой методики прогнозирования более низкие или более высокие значения расходов воды могут появиться с вероятностью, не превышающей 10 %.

В целях автоматизации процедуры получения прогнозов и оценки их качества для любого набора речных створов и соответствующих гидрологических постов, в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» на языке Python разработана компьютерная программа. Она включает следующие этапы:

- считывание и обработка данных, которые могут храниться в одном или в нескольких файлах;
- оценка параметров схемы получения прогноза для каждого речного створа;
- оценка показателей качества получаемых прогнозов;
- создание для каждого створа отдельной директории, в которой сохраняются параметры – схемы получения прогноза и показатели его качества;
- создание сводной таблицы с результатами прогнозирования [5].

Получение методики

Предлагаемая схема получения прогнозов среднесуточных уровней воды с заблаговременностью $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток основана на методе экстраполяции гидрографа и разработана для 64 створов, расположенных на реке Тобол и его притоках различных порядков. В табл. 1 для этих створов помещены номера гидрологических постов, название реки, пункта и площадь водосбора A км².

94

Все необходимые данные гидрологических наблюдений в указанных створах были предоставлены ФГБУ «Уральское УГМС». Расположение рассматриваемых гидрологических постов и соответствующих им речных створов показано на рис. 1.

Параметры формулы (1) оценивались методом наименьших квадратов по ряду ежедневных гидрологических наблюдений за период с 01.01.2010 по 31.12.2022. Оптимальные значения параметра k , при которых среднеквадратическая погрешность прогноза принимает минимальное значение, не превышали 5. На этом основании все прогнозы определялись по формуле (1) при $k = 5$. Параметры $\min H = H_{\min}$ (99%) и $\max H = H_{\max}$ (1%) формулы (2) оценивались по рядам многолетних гидрологических наблюдений за период с 1985 по 2022 год.

В качестве примера в табл. 2 приведены параметры формул (1) и (2) для получения прогнозов среднесуточных уровней воды в створе на реке Тавда у города Тавда с заблаговременностью $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток.

Основные характеристики рассматриваемых речных створов

Номер	Река	Пункт	A км ²	Номер	Река	Пункт	A км ²
12010	Тобол	Звериноголовское	143000	12346	Реж	Ключи	4400
12014	Тобол	Курган	159000	12354	Бобровка	Липовское	101
12017	Тобол	Упорово	177000	12383	Пышма	Богандинское	18600
12018	Тобол	Ялуторовск	241000	12401	Юрмыч	Пышма	935
12022	Тобол	Иевлево	333000	12402	Беляковка	Потаскуева	1700
12040	Уй	Степное	3600	12407	Иска	Велижаны	895
12043	Уй	Троицкий свх	7660	12412	Тавда	Таборы	74200
12059	Увелька	Красосельское	3620	12413	Тавда	Тавда	81000
12061	Увелька	Карсинский зсх	5100	12415	Тавда	Н. Тавда	86100
12092	Юргамыш	Пертовское	1950	12417	Лозьва	Першино	6530
12098	Емуртла	Емуртла	3250	12422	Ивдель	Ивдель	2250
12101	Ук	Заводоуковск	917	12430	Сосьва	Денежкино	4390
12115	Исеть	Колюткино	3500	12434	Сосьва	Сосьва	22100
12123	Исеть	Катайск	12800	12435	Сосьва	Гари	23600
12125	Исеть	Шадринск	23400	12476	Вагран	Североуральск	1430
12127	Исеть	Мехонское	52300	12498	Турья	Карпинск	480
12129	Исеть	исетское	56000	12511	Сотрина	Сотрино	403
12136	Решетка	Новоалексеевское	32	12517	Лобва	Лобва	2940
12155	Синара	Верхнеключевское	5000	12528	Карабашка	Карабашка	648
12189	Миасс	Новоандреевка	1830	12554	Тобол	Кокино	172000
12202	Миасс	Каргополье	21400	12606	Бочанка	Заводопетровское	678
12222	Ирюм	Бобылево	778	12611	Сосьва	Морозково	11500
12238	Тура	Санкино	23000	12613	Караталаят	Карталы	659
12239	Тура	Туринск	29000	12614	Кунара	Быкова	380
12240	Тура	Туринская сл.	31500	12615	Исеть	Долматово	13100
12244	Тура	Тюмень ЦГМС	58500	12617	Н. Алабуга	Плотниково	456
12248	Тура	Покровское	80200	12620	Суерь	Волосниково	10300
12279	Тагил	Трошкова	7920	12631	Уй	Усть-Уйское	34400
12305	Мугай	Топоркова	1400	12632	Ирбит	Зайково	3320
12315	Ница	Ирбит	17300	12646	Каква	Каквинское	716
12316	Ница	Краснослободское	22000	12651	Пышма	Талица	11200
12320	Нейва	Черемшанка	1860	12652	Нейва	Кировское	5240

Карта-схема
 расположения наблюдательных подразделений (НП)
 на бассейнах рек Свердловской, Челябинской,
 Курганской областей



Рис. 1. Расположение рассматриваемых гидрологических постов
 в бассейне Тобола.

Параметры формул (1) и (2) получения прогноза среднесуточных уровней воды
в створе р. Тавда – г. Тавда

Δt	$a_0(\Delta t)$	$a_1(\Delta t)$	$a_2(\Delta t)$	$a_3(\Delta t)$	$a_4(\Delta t)$	$a_5(\Delta t)$	$b(\Delta t)$	min H	max H
1	1,531	0,000	-0,578	0,000	0,000	0,045	0,5	93	883
2	2,010	0,000	-1,091	0,000	0,000	0,076	1,6	93	883
3	2,450	0,000	-1,556	0,000	0,000	0,097	3,0	93	883
4	2,870	0,000	-2,007	0,000	0,000	0,123	4,9	93	883
5	3,274	0,000	-2,450	0,000	0,000	0,154	7,0	93	883
6	3,666	0,000	-2,891	0,000	0,000	0,196	9,5	93	883
7	4,046	0,000	-3,331	0,000	0,000	0,246	12,3	93	883
8	4,401	0,000	-3,745	0,000	0,000	0,296	15,3	93	883
9	4,715	0,000	-4,108	0,000	0,000	0,334	18,7	93	883
10	4,985	0,000	-4,414	0,000	0,000	0,359	22,3	93	883

Значения коэффициентов $a_1(\Delta t)$, $a_3(\Delta t)$ и $a_4(\Delta t)$ оказались нулевыми вследствие их округления.

Верификация прогнозов

Качество краткосрочных и среднесрочных прогнозов среднесуточных уровней воды оценивалось на независимом материале, то есть по данным, которые не учитывались при определении параметров формул получения прогноза. С этой целью использована следующая процедура скользящего контроля [2].

1. Из 13-летнего периода наблюдений исключался первый год.
2. Данные за оставшиеся 12 лет использовались для оценки параметров схемы получения прогноза.
3. Полученные оценки подставлялись в формулы (1) и (2) для прогнозирования уровней воды в течение исключенного года.
4. В результате для исключенного года формировался полученный на независимом материале ряд ошибок прогноза за 365 или за 366 суток для високосного года.
5. Данные за исключенный первый год возвращались, и исключался следующий год.
6. После повторения описанной процедуры для всех 13 лет формировался ряд ошибок прогноза длиной $N = 4748$, полученный на независимом материале.

Если обозначить через $H(t)$ значение уровня воды за сутки t , а через $\tilde{H}(t)$ ее прогноз, то для периода с 01.01.2010 по 31.12.2022 среднеквадратическая погрешность прогноза определяется формулой:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [H(t) - \tilde{H}(t)]^2} . \quad (3)$$

В соответствии с Наставлением по службе прогнозов [7] для оценки эффективности методики прогнозирования в качестве альтернативы использовался инерционный прогноз. При заблаговременности прогноза Δt суток инерционный прогноз $\tilde{H}_I(t)$ использует известное на дату его составления $t - \Delta t$ значение $H(t - \Delta t)$ и определяется формулой:

$$\tilde{H}_I(t) = H(t - \Delta t) + \bar{\Delta} , \quad (4)$$

где $\bar{\Delta}$ вычисляется как среднее арифметическое ряда $\Delta_1, \dots, \Delta_N$, образованного N наблюдавшимися изменениями рассматриваемой характеристики за период заблаговременности прогноза. Оценка погрешности инерционного прогноза определяется формулой:

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta_i - \bar{\Delta})^2} . \quad (5)$$

Вывод о применимости методики прогнозирования делается на основании отношения S/σ_{Δ} : при достаточно большом числе N проверочных прогнозов методика считается хорошей при $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,50$, удовлетворительной при $0,50 < S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$ и неудовлетворительной при $S/\sigma_{\Delta} > 0,80$ [7].

В качестве другого показателя качества прогнозирования используется оправдываемость прогноза P , то есть частота случаев, когда абсолютные значения ошибок прогноза не превышали допустимую ошибку, равную $0,674 \sigma_{\Delta}$.

В Наставлении по службе прогнозов [7] критическим значениям 0,50 и 0,80 показателя S/σ_{Δ} соответствуют значения оправдываемости $P = 82,5 \%$ и $P = 60 \%$ [7].

В качестве примера в табл. 3 для прогнозов среднесуточных уровней воды в створе р. Тавда – г. Тавда с заблаговременностью $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток приведены следующие показатели качества прогнозирования:

R – коэффициент корреляции между фактическими расходами и их прогнозами;

S – среднеквадратическая погрешность прогнозов, см;

σ_{Δ} – среднеквадратическая погрешность инерционных прогнозов, см;

S/σ_{Δ} – показатель эффективности прогнозов;

P – оправдываемость прогнозов.

Показатели качества прогнозов среднесуточных уровней воды
в створе р. Тавда – г. Тавда

Δt	R	S	σ_{Δ}	S/σ_{Δ}	P
1	1,000	2,8	7,8	0,36	96%
2	1,000	6,1	15,4	0,40	95%
3	0,999	10,0	22,8	0,44	94%
4	0,998	14,0	30,1	0,47	93%
5	0,996	18,4	37,3	0,49	91%
6	0,993	22,9	44,3	0,52	90%
7	0,990	27,5	51,1	0,54	88%
8	0,987	32,4	57,9	0,56	88%
9	0,982	37,4	64,4	0,58	86%
10	0,977	42,6	70,9	0,60	85%

Приведенные в табл. 3 данные свидетельствуют о том, что для данного речного створа все краткосрочные прогнозы с заблаговременностью 1–5 суток относятся к категории хороших, а среднесрочные прогнозы с заблаговременностью 6–10 суток относятся к категории удовлетворительных.

На рис. 3 для этого створа приведены совмещенные графики хода фактических и спрогнозированных с заблаговременностью $\Delta t = 7$ суток среднесуточных уровней воды в 2018 году.

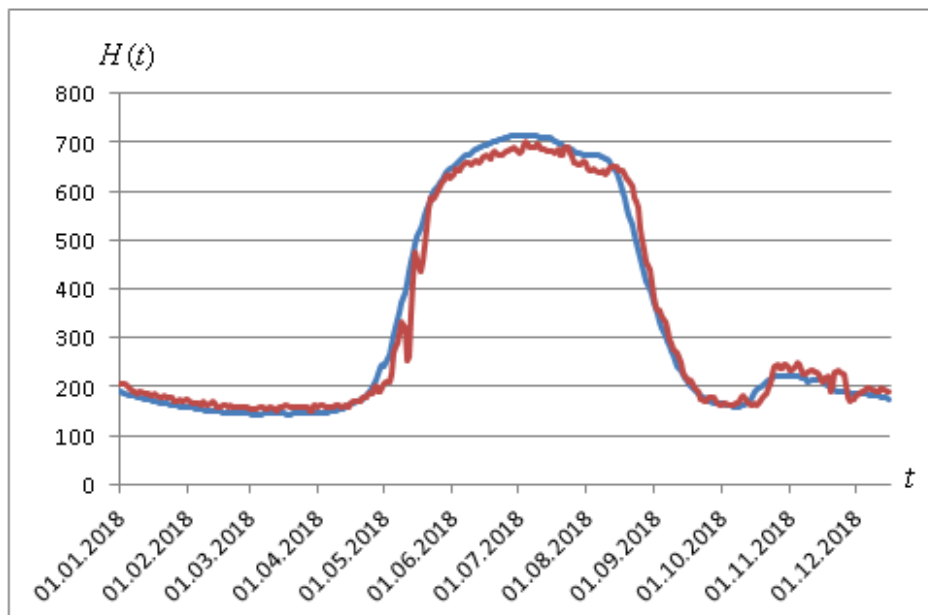


Рис. 3. Фактический (синим) и спрогнозированный с заблаговременностью $\Delta t = 10$ суток (красным) ход среднесуточных уровней воды в створе р. Тавда – г. Тавда в 2018 году.

Появившиеся на спрогнозированном гидрографе незначительные всплески обусловлены интенсивным ростом уровней воды перед датой составления прогноза.

Анализ результатов верификации прогнозов

Для всех случаев, когда соотношение S/σ_{Δ} не превышало 0,80, оправдываемость таких прогнозов P превышала 65%. Следовательно, соотношение S/σ_{Δ} в достаточной степени характеризует удовлетворительность прогнозов уровней воды. В табл. 4 помещены значения показателя S/σ_{Δ} прогнозов среднесуточных уровней воды для всех рассматриваемых речных створов бассейна Тобола.

Таблица 4

Значения показателя S/σ_{Δ} прогнозов среднесуточных уровней воды при
заблаговременности $\Delta t = 1, \dots, 10$ суток

Номер	Река	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12010	Тобол	0,63	0,68	0,69	0,70	0,70	0,70	0,71	0,73	0,74	0,76
12014	Тобол	0,62	0,66	0,68	0,70	0,72	0,73	0,75	0,76	0,77	0,78
12017	Тобол	0,49	0,58	0,65	0,72	0,76	0,80	0,82	0,84	0,85	0,86
12018	Тобол	0,47	0,54	0,60	0,65	0,69	0,72	0,75	0,77	0,78	0,79
12022	Тобол	0,42	0,44	0,46	0,49	0,51	0,53	0,55	0,57	0,58	0,60
12040	Уй	0,74	0,78	0,82	0,86	0,90	0,91	0,92	0,92	0,92	0,92
12043	Уй	0,83	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90
12059	Увелька	0,73	0,78	0,81	0,83	0,85	0,85	0,85	0,84	0,84	0,83
12061	Увелька	0,91	0,93	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86
12092	Юргамыш	0,81	0,85	0,87	0,89	0,90	0,91	0,90	0,90	0,90	0,89
12098	Емуртла	0,62	0,74	0,82	0,86	0,88	0,89	0,89	0,88	0,88	0,87
12101	Ук	0,84	0,88	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,84	0,83	0,83
12115	Исеть	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90
12123	Исеть	0,82	0,89	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,92
12125	Исеть	0,74	0,81	0,83	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,90
12127	Исеть	0,53	0,60	0,65	0,70	0,74	0,76	0,78	0,80	0,81	0,82
12129	Исеть	0,57	0,63	0,67	0,71	0,73	0,76	0,77	0,79	0,80	0,81
12136	Решетка	0,96	0,96	0,95	0,94	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90
12155	Синара	0,80	0,85	0,91	0,93	0,94	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90
12189	Миасс	0,92	0,95	0,96	0,96	0,95	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92
12202	Миасс	0,66	0,73	0,78	0,81	0,83	0,84	0,86	0,87	0,88	0,88
12222	Ирюм	0,74	0,87	0,91	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89	0,88
12238	Тура	0,63	0,72	0,77	0,81	0,83	0,85	0,86	0,87	0,87	0,88
12239	Тура	0,35	0,44	0,52	0,58	0,63	0,67	0,70	0,72	0,74	0,76
12240	Тура	0,30	0,37	0,44	0,50	0,54	0,58	0,61	0,64	0,66	0,67
12244	Тура	0,37	0,42	0,46	0,50	0,53	0,56	0,59	0,62	0,64	0,66
12248	Тура	0,42	0,45	0,48	0,51	0,53	0,55	0,57	0,59	0,61	0,63

Номер	Река	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12279	Тагил	0,81	0,86	0,89	0,90	0,91	0,91	0,91	0,90	0,89	0,89
12305	Мугай	0,71	0,81	0,86	0,88	0,89	0,90	0,90	0,89	0,89	0,88
12315	Ница	0,61	0,70	0,77	0,81	0,84	0,87	0,88	0,88	0,89	0,89
12316	Ница	0,43	0,48	0,54	0,58	0,62	0,64	0,67	0,68	0,70	0,71
12320	Нейва	0,96	0,97	0,97	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92
12346	Реж	0,84	0,89	0,92	0,93	0,94	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92
12354	Бобровка	0,91	0,94	0,95	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,90
12383	Пышма	0,33	0,37	0,42	0,46	0,49	0,52	0,55	0,57	0,59	0,61
12401	Юрмыч	0,74	0,85	0,90	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89
12402	Беляковка	0,71	0,78	0,83	0,86	0,87	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88
12407	Иска	0,75	0,81	0,83	0,84	0,85	0,85	0,86	0,87	0,87	0,87
12412	Тавда	0,48	0,49	0,50	0,52	0,54	0,57	0,59	0,62	0,64	0,66
12413	Тавда	0,36	0,40	0,44	0,47	0,49	0,52	0,54	0,56	0,58	0,60
12415	Тавда	0,42	0,44	0,47	0,50	0,53	0,55	0,57	0,59	0,61	0,62
12417	Лозьва	0,73	0,84	0,89	0,91	0,92	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90
12422	Ивдель	0,86	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,91
12430	Сосьва	0,77	0,85	0,89	0,90	0,90	0,90	0,90	0,89	0,88	0,87
12434	Сосьва	0,35	0,44	0,53	0,60	0,66	0,71	0,74	0,77	0,80	0,81
12435	Сосьва	0,37	0,43	0,49	0,55	0,60	0,64	0,68	0,70	0,72	0,74
12476	Вагран	0,90	0,94	0,95	0,95	0,96	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93
12498	Турья	0,91	0,94	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,91	0,90	0,89
12511	Сотрина	0,66	0,74	0,79	0,83	0,86	0,88	0,88	0,89	0,89	0,89
12517	Лобва	0,79	0,87	0,90	0,91	0,92	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89
12528	Карабашка	0,84	0,89	0,91	0,92	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92
12554	Тобол	0,55	0,60	0,64	0,67	0,70	0,73	0,74	0,75	0,76	0,77
12606	Бочанка	0,68	0,78	0,84	0,87	0,90	0,91	0,92	0,93	0,93	0,93
12611	Сосьва	0,50	0,61	0,69	0,75	0,79	0,83	0,85	0,87	0,88	0,89
12613	Караталаят	0,91	0,90	0,89	0,88	0,88	0,88	0,87	0,87	0,86	0,85
12614	Кунара	0,87	0,91	0,92	0,93	0,93	0,93	0,92	0,91	0,91	0,90
12615	Исеть	0,87	0,90	0,92	0,94	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93
12617	Н. Алабуга	0,92	0,95	0,95	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,91
12620	Суерь	0,71	0,84	0,88	0,89	0,89	0,89	0,88	0,87	0,87	0,86
12631	Уй	0,67	0,72	0,75	0,77	0,79	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85
12632	Ирбит	0,72	0,81	0,87	0,91	0,92	0,92	0,92	0,91	0,90	0,90
12646	Каква	0,91	0,95	0,95	0,94	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90	0,90
12651	Пышма	0,72	0,76	0,80	0,83	0,86	0,87	0,88	0,88	0,89	0,89
12652	Нейва	0,95	0,96	0,96	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91

В табл. 5 для всех значений заблаговременности Δt от 1 до 10 суток приведено число речных створов M , для которых получены удовлетворительные прогнозы среднесуточных уровней воды с показателями S/σ_{Δ} 0,80 и $P > 60\%$.

Число M речных створов с удовлетворительными прогнозами среднесуточных уровней воды различной заблаговременности Δt

Δt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
M	42	31	25	21	21	19	18	17	17	15

Таким образом, удовлетворительные прогнозы среднесуточных уровней воды с заблаговременностью 1 сутки получаются для 65,6 %, а с максимальной заблаговременностью 10 суток – для 23,4 % рассматриваемых речных створов бассейна Тобола.

Как и следовало ожидать, метод экстраполяции гидрографа оказался неприменимым для рек с малой площадью водосбора, сток которых быстро реагирует на таяние снега или на выпадение жидких осадков. В результате водный режим определяется серией кратковременных паводков, за пределами зимней межени ход среднесуточных уровней имеет пилообразный характер и его невозможно предсказать методом экстраполяции даже на сутки [5, 10–13].

Для рек с большой площадью водосбора ход среднесуточных уровней имеет плавный характер, как на рис. 3, поэтому метод экстраполяции гидрографа позволяет давать удовлетворительные прогнозы с достаточно большой заблаговременностью.

На рис. 4 представлена зависимость максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов $\max(\Delta t)$ от логарифма площади водосбора $\ln A$. При этом величина $\max(\Delta t)$ определяется таким образом, что прогнозы с показателями $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$ и $P > 60\%$ могут быть получены при всех значениях Δt , не превышающих величину $\max(\Delta t)$. Равенство $\max(\Delta t)$ нулю означает, что для данного речного створа прогнозы уровней воды оказались неудовлетворительными даже при заблаговременности 1 сутки [4, 5].

Данная зависимость показывает, что с ростом площади водосбора максимальная заблаговременность удовлетворительных прогнозов в целом возрастает. Как правило, метод экстраполяции гидрографа не позволяет удовлетворительно прогнозировать среднесуточные уровни воды в речных створах с площадью водосбора менее 5 000 км². Для речных створов бассейна Тобола с площадью водосбора более 50 000 км² данный метод дает удовлетворительные прогнозы с заблаговременностью не менее 5 суток.

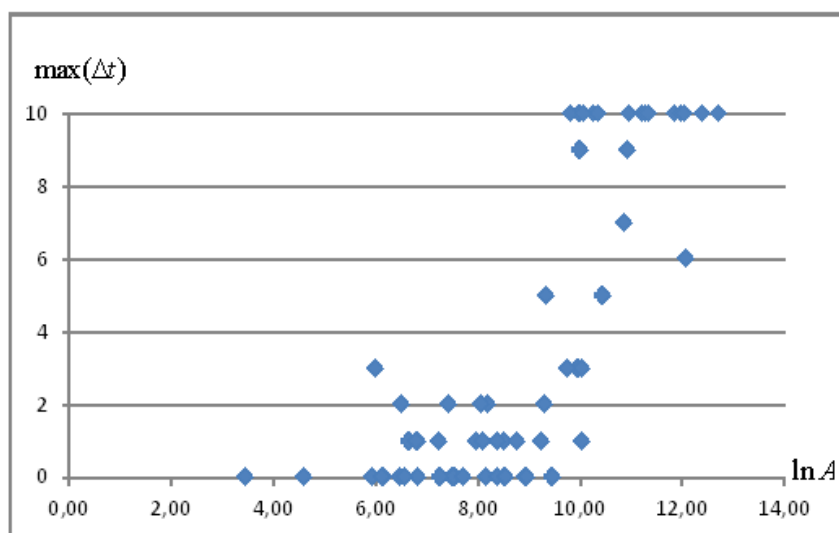


Рис. 4. Зависимость максимальной заблаговременности удовлетворительных прогнозов среднесуточных уровней воды $\max(\Delta t)$ от логарифма площади водосбора $\ln A$ для бассейна Тобола.

Заключение

В отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» для рек бассейна Тобола разработана методика ежедневного прогнозирования среднесуточных уровней воды с заблаговременностью 1–10 суток в течение всего года. Методика основана на данных гидрологических наблюдений за период с 1985 по 2022 год.

В основе методики лежит метод экстраполяции гидрографа, в котором учитываются уровни воды за дату составления прогноза и за 5 предыдущих суток. Оценка параметров методики выполняется с помощью статистического анализа данных гидрологических наблюдений для каждого речного створа. В целях автоматизации процедуры получения прогнозов и оценки их качества разработана компьютерная программа на языке Python.

Проверка прогнозов, выполненная на независимом материале методом скользящего контроля, показала, что предлагаемая методика в целом дает удовлетворительные результаты прогнозирования. Удовлетворительные прогнозы с показателем $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$ и оправдываемостью $P > 65\%$ при заблаговременности 1 сутки получены для 42 речных створов, при заблаговременности 4 суток – для 21 створа, при заблаговременности 7 суток – для 18 створов и при заблаговременности 10 суток – для 15 речных створов. Анализ результатов верификации методики показал, что в целом качество прогнозов возрастает с увеличением площади водосбора соответствующего речного створа.

Методика может быть использована в рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов в целях обеспечения необходимой прогностической информацией

оперативных решений по использованию водных ресурсов рек бассейна Тобола и защите населения от опасных наводнений.

Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета 25.12.2023 принято решение внедрить предлагаемую методику краткосрочного и среднесрочного прогноза уровней воды на реках бассейна Тобола в качестве основной методики прогнозирования.

Список литературы

1. Большой географический атлас России / Под ред. Г.В. Борисова. – М.: АСТ, 2019. – 224 с.
2. *Борщ С.В., Христофоров А.В.* Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. – 2015. – Специальный выпуск 355. – 198 с.
3. *Борщ С.В., Колий В.М., Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Христофоров А.В.* Прогнозирование стока рек России методом экстраполяции гидрографа // Гидрологические исследования и прогнозы. – 2021. – № 2 (380). – С. 77–94.
4. *Борщ С.В., Колий В.М., Семенова Н.К., Симонов Ю.А., Христофоров А.В.* Возможность прогнозирования стока рек России методом экстраполяции гидрографа в зависимости от характеристик их водосборов // Гидрологические исследования и прогнозы. – 2021. – № 3 (381). – С. 115–130.
5. *Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В.* Прогнозирование стока рек России. – М.: Гидрометцентр России, 2023. – 200 с.
6. *Бубин М.С., Рассказова Н.С.* Ритмичность многолетних колебаний стока рек как интегральный показатель изменчивости климата (на примере Урала). – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 278 с.
7. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 193 с.
8. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 11. Средний Урал и Приуралье. Вып. 2. Тобол / Под ред. В.В. Николаенко. – Л.: Гидрометеиздат, 1965. – 240 с.
9. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 245 с.
10. *Христофоров А.В., Юмина Н.М.* Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: АПР, 2017. – 151 с.
11. *Adams T.E., Pagano T.C.* Flood Forecasting: A Global Perspective. – London: Academic Press, 2016. – 480 p.
12. *Greco M., Cravetta A., Della Morte R.* River flow. – London: Taylor and Francis Group, 2004. – 1024 p.
13. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO-No. 168. – 2009. – 302 p.

**СИСТЕМА (ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ)
ПРОГНОЗА ВОЛНЕНИЯ В БУХТЕ НАГАЕВА ОХОТСКОГО МОРЯ
С ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ ДО 5 СУТОК**

*¹Дальневосточный региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт, г. Владивосток;*

*²Колымское Управление по гидрометеорологии и мониторингу
окружающей среды, г. Магадан*

Введение

Зона обслуживания ФГБУ «Колымское УГМС» включает открытые и прибрежные районы Охотского моря. Оперативные испытания системы (технологической линии) прогноза волнения в прибрежных районах Охотского моря (бухта Нагаева) с заблаговременностью до 5 суток проводились с 23 июня по 5 декабря 2021 года в соответствии с Планом испытания новых и усовершенствованных технологий (методов) гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов Росгидромета на 2021 год.

Система разработана в 2020 г. в ФГБУ «ДВНИГМИ». В её основе находятся две волновых модели последнего поколения. Расчет волнения производился автоматически дважды в сутки по расписанию на срок 00 и 12 ч ВСВ. Заблаговременность прогнозов составляет 120 часов.

1. Автоматизированная система прогноза волнения

Система прогноза ветрового волнения в прибрежной зоне включает в себя две волновых модели, программный продукт формирования карт и несколько модулей обработки информации.

Общее время работы оперативной технологии прогноза волнения по Тихому и Индийскому океанам, дальневосточным морям и районам Восточной Арктики достигает порядка трех часов на двух вычислительных кластерах (суммарно на 28 процессорах) ФГБУ «ДВНИГМИ». В современных условиях такие затраты времени не устраивают

пользователей. Кроме того, у потребителей имеются пожелания к освещению детальной информацией и других прибрежных акваторий зоны ответственности УГМС. Имеющиеся на настоящее время вычислительные возможности ФГБУ «ДВНИГМИ», а также в большинстве случаев их отсутствие в УГМС регионов Дальнего Востока, решить такую задачу не представляют возможным. Выход из подобной ситуации при минимальных затратах на приобретение новой вычислительной техники видится в следующем: разделение технологии прогноза на отдельные цепочки с использованием аналогии «клиент» – «сервер».

Основная идея заключается в том, чтобы отдельные задачи системы прогноза передать на места в Управления гидрометеорологической службы. На основном вычислителе ФГБУ «ДВНИГМИ» («сервер») производится прием входных потоков данных полей приводного ветра и сплоченности льда, расчет по дальневосточным морям с использованием глобальной модели волнения и подготовка начальных и граничных данных для расчета волнения по отдельным прибрежным районам. Эта информация сохраняется на ftp-сервере. В УГМС устанавливается прогностический комплекс волнения («клиент») прибрежных акваторий зон ответственности Управления. После приема «клиентом» начальных данных с «сервера» производится расчет волнения и формирование выходной продукции.

На «сервере» производится подготовка входной информации. По каналам сети Интернет с сервера NCEP/NCAR (<http://nomads.ncep.noaa.gov/>) скачиваются в автоматическом режиме файлы с прогнозами приводного ветра в коде GRIB2. Поскольку на каждый временной срок объем данных большой, составлен запрос, реализованный в программном скрипте, который позволяет получать с сервера только необходимую информацию в пределах расчетной области. Выбираются поля u и v компонент скорости приводного ветра на высоте 10 м. Разрешение сеточной области этих полей – $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Заблаговременность прогнозов до 120 часов, дискретность – 6 часов. Используются данные от срока 00 и 12 ч ВСВ. При расчетах волнения дополнительно используются поля сплоченности.

Далее составляется прогноз волнения при помощи дискретной спектральной модели WAVEWATCH III, версия 6.07 [4]. При прогностических расчетах учитываются все известные механизмы генерации и распространения волн. Функция источников и стоков включает в себя: генерацию волн ветром, диссипацию волнения на глубокой воде, нелинейное взаимодействие в спектре ветрового волнения, диссипацию за счет трения о дно, опрокидывание волн (эффект серфинга) и взаимодействие волн со льдом.

Вывод информации производится с дискретностью 6 часов и включает в себя: высоту, период, направление и длину волны смешанного, ветрового волнения и зыби трех систем. Дополнительно записываются спектральные характеристики волн и скорость приводного ветра в расчетных узлах области.

На следующем этапе производится обработка выходных данных модели и запись в файлы текстового формата, которые обрабатываются и сохраняются для решения последующих задач как оперативного, так и климатического плана.

Построение прогностических карт производится при помощи программного продукта “The Generic Mapping Tools” [5]. На карты наносится высота смешанного волнения, направления подхода волн и положение ледяного поля.

После обработки прогностических данных автоматически производится подготовка начальных и граничных условий для прибрежных акваторий. Выбирается информация о скорости ветра, высоте, периоде и направлении волн для соответствующего прибрежного района и формируются файлы в формате, используемом в модели SWAN [3]. В том случае, когда море покрыто льдом, расчет по данному району не производится. Информация размещается на ftp-сервере ФГБУ «ДВНИГМИ».

ФГБУ «Колымское УГМС» («клиент») скачивает на свой компьютер эти данные и запускает скрипт расчета волнения для бухты Нагаева Охотского моря. Расчеты производятся по волновой модели SWAN версии 41.20, специально разработанной для прибрежных и мелководных зон. Расчетная сетка состоит из 116×34 точек с пространственным шагом 155×290 м. Дискретность вывода информации равна 6 часам.

Затем происходит обработка результатов работы модели SWAN. На выходе получаем карты по акватории и текстовый файл с прогнозами по отдельным, предварительно заданным пунктам (рис. 1). Текст содержит информацию: дата и время, наименование пункта, высота, период, направление волнения, скорость и направление ветра.

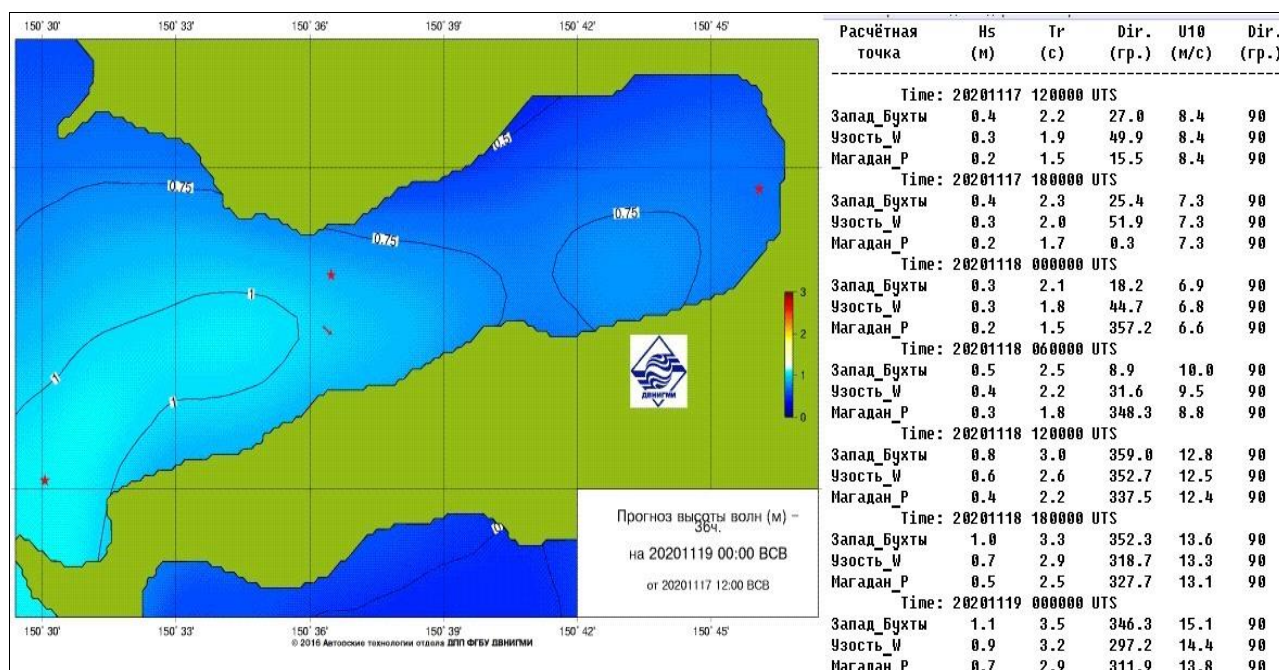


Рис. 1. Пример прогноза волнения по акватории бухты Нагаева.

2. Оперативные испытания системы прогноза волнения прибрежной зоны

За период оперативных испытаний составлено 318 прогнозов. По техническим причинам потеряно 13. На эти даты информация не восстанавливалась.

Качество прогнозов высоты волн проводилась согласно Наставлению [1]. Допустимой ошибкой принималась величина, не более 30 % от наблюдаемого значения. В бухтах, небольших заливах, портах и на мелководье прибрежных зон прогнозы считаются оправдавшимися при любой действительной высоте волн от 0 до 0,25 м [1, пункт 7.3.4.1.10].

Оценивалась высота волн в сравнении с данными наблюдений гидрометеорологической станции Магадан. Источник информации – телеграммы в коде КН-02 SEA.

Приняты следующие обозначения, которые будут использоваться по тексту и в таблицах: *Bias* — систематическая ошибка, $|\bar{\Delta}|$ – средняя абсолютная ошибка, *RMSE* – средняя квадратическая ошибка, σ – стандартное отклонение от среднего, *r* – коэффициент корреляции, *P* – оправдываемость прогнозов (%).

2.1. Оценка качества прогнозов скорости приводного ветра

Прежде чем перейти к оценке высоты волн, рассмотрено качество исходной информации для прогнозов волнения, а именно, модуля скорости и направления приводного ветра на высоте 10 м полей GFS (глобальной прогностической системы). За время испытаний максимальная скорость составила по данным наблюдений 12 м/с. Прогностическая колебалась от 13 до 17 м/с в зависимости от заблаговременности. В табл. 1 и 2 приведены оценки в сравнении с наблюдениями на станции Магадан.

Критерий оправдываемости – $\pm 0,674\sigma$. Для модуля скорости σ равна 2,6 м/с, по направлению – 115°.

Таблица 1

Оценка качества прогнозов скорости ветра GFS в сравнении с наблюдениями на станции Магадан

Статистики	Заблаговременность (часы)									
	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
<i>Bias</i> , м/с	0,87	0,82	0,76	0,74	0,89	0,75	0,78	0,63	0,45	0,34
<i>RMSE</i> , м/с	2,32	2,30	2,17	2,30	2,50	2,47	2,47	2,53	2,46	2,58
$ \bar{\Delta} $, м/с	1,80	1,78	1,73	1,76	1,93	1,86	1,80	1,90	1,97	1,90
<i>r</i>	0,72	0,69	0,73	0,68	0,64	0,64	0,65	0,60	0,58	0,52
<i>P</i> , %	77,1	75,7	77,0	76,8	71,5	75,2	81,5	74,3	72,6	77,7

Оценка качества прогнозов направления ветра GFS в сравнении с наблюдениями
на станции Магадан

Статистики	Заблаговременность (часы)									
	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
<i>Bias</i> , °	-18	-15	-15	-17	-19	-12	2	-20	-14	3
<i>RMSE</i> , м/с	89	95	95	96	93	95	97	109	98	97
$ \bar{\Delta} $, м/с	67	69	69	72	70	74	72	78	75	71
<i>r</i>	0,67	0,62	0,62	0,63	0,66	0,59	0,61	0,54	0,56	0,59
<i>P</i> , %	60,7	59,7	59,7	58,5	62,0	54,6	63,0	55,7	53,3	57,6

Как видно из таблиц, хуже всего оправдывается направление ветра, при этом абсолютная ошибка в пределах 70°, что является большой величиной. Согласно Наставлению [1], оценка по критерию *P* – неудовлетворительная. Для скорости ветра *P* в среднем равна 76 %, и начиная с третьих суток прогноза имеет удовлетворительную оценку.

2.2. Оценка качества прогнозов волнения

По данным телеграмм кода КН-02 SEA, наблюдения за волнением на прибрежной станции Магадан проводятся в сроки 00 и 06 ч ВСВ. Оценивалось качество прогнозов высот волн 13%-ной обеспеченности, или 1/3 значительных волн по международной классификации только за срок 00 ч, что соответствовало заблаговременностям, кратным 12 часам.

За период оперативных испытаний наблюдался максимум высот волн 0,5 м. Среднее арифметическое равно 0,22 м, $\sigma = 0,12$ м. Повторяемость штилей составила 15,9 %, высот волн от 0,1 до 0,3 м – 79,3 %.

В табл. 3 приведены результаты оперативных испытаний. Максимальная прогностическая высота волны (h_{max}) отличается от наблюдаемой не более чем на 10 см. Абсолютная и средняя квадратическая ошибки находятся в пределах σ . Значение коэффициента корреляции невелико, и минимум приходится на заблаговременность в 5 суток, но он значим с вероятностью 0,01 (1 %). По величине оправдываемости оценка прогноза отличная (> 93 % для краткосрочного и >90 % для среднесрочного).

В связи с тем, что колебания анализируемых рядов незначительное (в пределах 0,1–0,3 м), все ошибки не превышают точность измерения волн в 10 см.

Согласно [1, п. 7.3.4.1.13], направление ветровых волн не оценивается, но поскольку при прогнозе выдается и угол подхода, проведена оценка точности и направления. В табл. 4 представлены результаты по сравнению с наблюдениями.

Оценка качества прогнозов высот волн

Статистики	Заблаговременность (часы)									
	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
h_{\max} , м	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,5	0,6	0,5
$Bias$, м	-0,03	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	-0,02	-0,01	-0,02	-0,01	-0,02
$RMSE$, м/с	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,11	0,12	0,13
$ \Delta $, м/с	0,10	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09
r	0,44	0,40	0,47	0,43	0,41	0,42	0,38	0,41	0,32	0,22
P , %	92,1	93,1	95,7	95,8	94,2	95,7	95,5	94,3	93,3	92,8

Таблица 4

Оценка качества прогнозов направления подхода волн

Статистики	Заблаговременность (часы)									
	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
$Bias$, °	-25	-14	-31	-26	-32	-24	-23	-32	-2	-18
$RMSE$, м/с	107	108	98	101	99	101	105	101	115	107
$ \Delta $, м/с	88	88	84	87	84	85	88	88	96	90
r	0,64	0,63	0,72	0,71	0,73	0,70	0,68	0,72	0,58	0,64
P , %	46,4	50,0	43,9	47,9	47,4	46,1	47,4	47,9	44,4	44,6

Оправдываемость по направлению рассчитывалась согласно критерия не превышения $0,674\sigma$. Исходя из всех статистик, можно сделать вывод о неудовлетворительном прогнозе направления. Причина этого – неточности в данных ветра, для чего и была выше проведена оценка полей GFS.

2.3. Сравнение с другими методами

Дополнительно рассчитывалась высота волны по формулам полуэмпирического метода ФГБУ «ГОИН» – АО «Союзморниипроект» [2], на основании которых построена номограмма, используемая в оперативной работе Управлений Росгидромета.

Расчет проводился по скорости ветра в точке, используя данные из файла результатов модели SWAN. Таким образом, входные данные по ветру едины, как для модели SWAN, так и при расчете по номограмме. В табл. 5 приведены оценки качества прогнозов и эффективность испытываемой технологии по сравнению с полуэмпирическим методом.

Коэффициенты корреляции табл. 3 и 5 находятся в пределах доверительных интервалов (0,05–0,06), по остальным статистикам наблюдается уменьшение ошибок для испытываемой

технологии. Эффективность, в среднем по всем заблаговременностям, равна 5,7 %, что говорит о преимуществе автоматизированной системы прогноза волнения.

Таблица 5

Оценка качества прогнозов высот волн по методу ГОИН – Союзморниипроект

Статистики	Заблаговременность (часы)									
	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
h_{\max} , м	0,7	0,7	0,6	0,7	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6
$Bias$, м	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06	-0,05	-0,06	-0,05	-0,07	-0,07	-0,08
$RMSE$, м/с	0,15	0,14	0,14	0,16	0,15	0,15	0,14	0,15	0,16	0,17
$ \Delta $, м/с	0,12	0,11	0,11	0,12	0,11	0,12	0,11	0,12	0,13	0,13
r	0,52	0,51	0,50	0,48	0,48	0,49	0,49	0,41	0,37	0,31
P , %	87,1	88,9	87,8	88,0	89,1	87,2	89,6	91,4	88,9	87,8
$P_{мет} - P_{ГОИН}$	5,0	4,2	7,8	7,8	5,1	8,5	6,0	2,9	4,4	5,0

При сравнении с инерционным прогнозом на 24 часа (табл. 6), разработанная технология имеет меньшую среднеквадратическую ошибку и преимущество по эффективности. Коэффициент корреляции инерционного метода значим с вероятностью 10 %.

111

Таблица 6

Показатели качества инерционных прогнозов высоты волн на 24 часа

$Bias$, м	$RMSE$, м	$ \Delta $, м	r	P , %	$P_{мет} - P_{инерц}$
0,0	0,15	0,11	0,15	90,3	2,8

Заключение

Автоматизированная система разработана с использованием аналога технологий «клиент» – «сервер», что позволяет задействовать вычислительные возможности ФГБУ «Колымское УГМС» и уменьшить время на составление прогноза.

В процессе оперативных испытаний системы прогноза волнения прибрежной зоны установлено, что технология работоспособна и ее можно тиражировать на другие акватории. Полученные оценки качества прогнозов показали преимущество по сравнению с инерционным и полуэмпирическим методами.

Точность прогноза волнения сильно зависит от качества исходной информации, в данном случае от скоростей приводного ветра. Ошибки в направлении ветра приводят к

неудовлетворительному результату прогнозирования угла подхода волн. Необходимо проведение работ по уточнению данного параметра или использованию полей ветра атмосферных моделей с меньшим пространственным шагом сеточной области.

Среднеквадратическая и абсолютная ошибки сравнимы с точностью визуального наблюдения за высотами волн. Оправдываемость прогноза превышает 92 %, что относится к категории хороших и отличных прогнозов для всех заблаговременностей.

Результаты испытаний 29 марта 2022 г. были рассмотрены Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета, которая одобрила выполненную работу и рекомендовала методику к внедрению в оперативную практику ФГБУ «Колымского УГМС».

Список литературы

1. РД 52.27.759–2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. – М.: ТРИАДА ЛТД, 2011. – 195 с.
2. РД 52.10.865–2017. Руководство по расчету режимных характеристик морского ветрового волнения. – Обнинск: Атрифлекс, 2018. – 63 с.
3. SWAN. User manual / Delft University of Technology, Environmental Fluid Mechanics Section. – 2020. – 143 p. – URL: <http://www.swan.tudelft.nl> (дата обращения 2020-11-25)
4. *Tolman H.L.* User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 6.07 Technical Note 333 /NOAA/NWS/NCEP/MMAB, 2019. – 466 p. – URL: <https://github.com/NOAA-EMC/WW3/wiki/Tech-Docs/manual.pdf> (дата обращения 2020-11-25).
5. *Wessel P., Smith W.H.F., Scharroo R., Luis J., Wobbe F.* The Generic Mapping Tools. GMT Tutorial. URL: http://gmt.soest.hawaii.edu/doc/5.4.4/pdf/GMT_Tutorial.pdf (Дата обращения 2018-11-22).

**СИСТЕМА (ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ)
ПРОГНОЗА ВОЛНЕНИЯ
В ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНАХ ВОСТОЧНОЙ АРКТИКИ**

*Дальневосточный региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт, г. Владивосток*

Введение

Арктическим морям уделяется большое внимание как важному с экономической точки зрения региону. Прогнозы волнения востребованы при гидрометеорологическом обеспечении Северного морского пути и проведении хозяйственной деятельности в прибрежной зоне.

Восточно-Сибирское и Чукотское моря входят в зону обслуживания ФГБУ «Чукотское УГМС». Оперативные испытания системы прогноза ветрового волнения в прибрежных районах этих морей проводились с 6 июня по 6 ноября 2022 года в соответствии с Планом испытания новых и усовершенствованных технологий (методов) гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов Росгидромета на 2022 год.

Технология разработана в 2017 г. в отделе долгосрочных прогнозов погоды и изучения климата ФГБУ «ДВНИГМИ», в 2021 г. она была модифицирована. Расчеты производятся автоматически дважды в сутки по расписанию на срок 00 и 12 ч ВСВ. Заблаговременность прогнозов составляет 120 часов. Вся информация выставляется на сайте ФГБУ «ДВНИГМИ».

1. Автоматизированная система прогноза волнения

Технология прогноза ветрового волнения по морям Восточной Арктики (Восточно-Сибирское и Чукотское) и в прибрежной зоне включает в себя две волновых модели, программный продукт графического отображения и несколько модулей обработки информации. По сравнению с оперативной линией 2018 г. [1], были внесены следующие изменения.

– Произведена замена версий моделей. По морям используется WAVEWATCH III версии 6.07 [6], в прибрежных районах – SWAN версии 41.31 [5]. В моделях учитываются источники поступления энергии от ветра и диссипации энергии, нелинейное взаимодействие волн и влияние придонного трения.

– Построена новая расчетная сетка для модели WAVEWATCH III с тремя масштабами пространственного разрешения: в прибрежной зоне 4'×2', в открытой части морей 8'×4' и 16'×8', что соответствует шагу 4–8–16 км. Границы области: 138° в. д. – 153° з. д., 65,0167° с. ш. – 81,0167° с. ш. Общее количество расчетных узлов равно 23580.

– Для пунктов в районе прибрежных станций Амбарчик, Рау-Чуа, Айон, Валькаркай, Ванкарем и Уэлен, по результатам авторских испытаний 2021 г., построены регрессионные уравнения, уточняющие модельную высоту волны.

– Используются прогнозы скоростей приводного ветра на высоте 10 м модели ICON [4] (<https://opendata.dwd.de>) с пространственным разрешением ~15 км.

– Автоматически усваиваются ежедневные поля сплоченности льда, осредненные за пять дней, Японского агентства аэрокосмических исследований, Исследовательского центра наблюдения Земли с шагом сетки ~3'×3' (https://www.eorc.jaxa.jp/cgi-bin/jasmes/climate/jasmes_climate_map_v3.cgi?lang=en).

Расчетные области прибрежных районов модели SWAN остались без изменений. Пространственный шаг сеточной области для всех прибрежных акваторий один и составляет 30"×30", что приблизительно составляет 400×900 м.

Процедура расчета волнения состоит из двух этапов. Прогноз по Восточно-Сибирскому и Чукотскому морям производится по модели WAVEWATCH. После обработки прогностических данных, а именно, подготовки начальных и граничных условий, на втором этапе с использованием SWAN рассчитывается волнение в прибрежных районах. Дискретность вывода информации двух моделей равна 3 часам.

Продукция системы прогноза (карты и текстовый файл по девяти прибрежным станциям) выставляется дважды в сутки по сети Интернет на Web-странице ФГБУ «ДВНИГМИ» (<http://www.ferhri.org/prognozy/2017-07-26-04-47-44/62-volnenie-model-ww-III-otv-isp-vrazhkin-a-n.html>).

Использование всех этих изменений технологии позволило сократить время расчетов в 1,5 раза по сравнению с предыдущей оперативной версией 2018 года.

2. Оперативные испытания системы прогноза волнения прибрежной зоны

Качество прогнозов высот волн оценивалось по данным, полученным со спутника Saral программы Aviso (<ftp://avisoftp.cnes.fr/AVISO/pub>). При обработке данных модели WAVEWATCH использовалась высота волн 13%-ной обеспеченности (высота значительных волн), или по международной классификации «средняя высота 1/3 наивысших волн». Рассматривались только точки в прибрежной 4-километровой полосе морей. Характеристики волн этой зоны используются как граничные условия модели SWAN при составлении прогнозов в районах расположения прибрежных станций. На рис. 1 показаны точки, для которых получены статистические оценки.

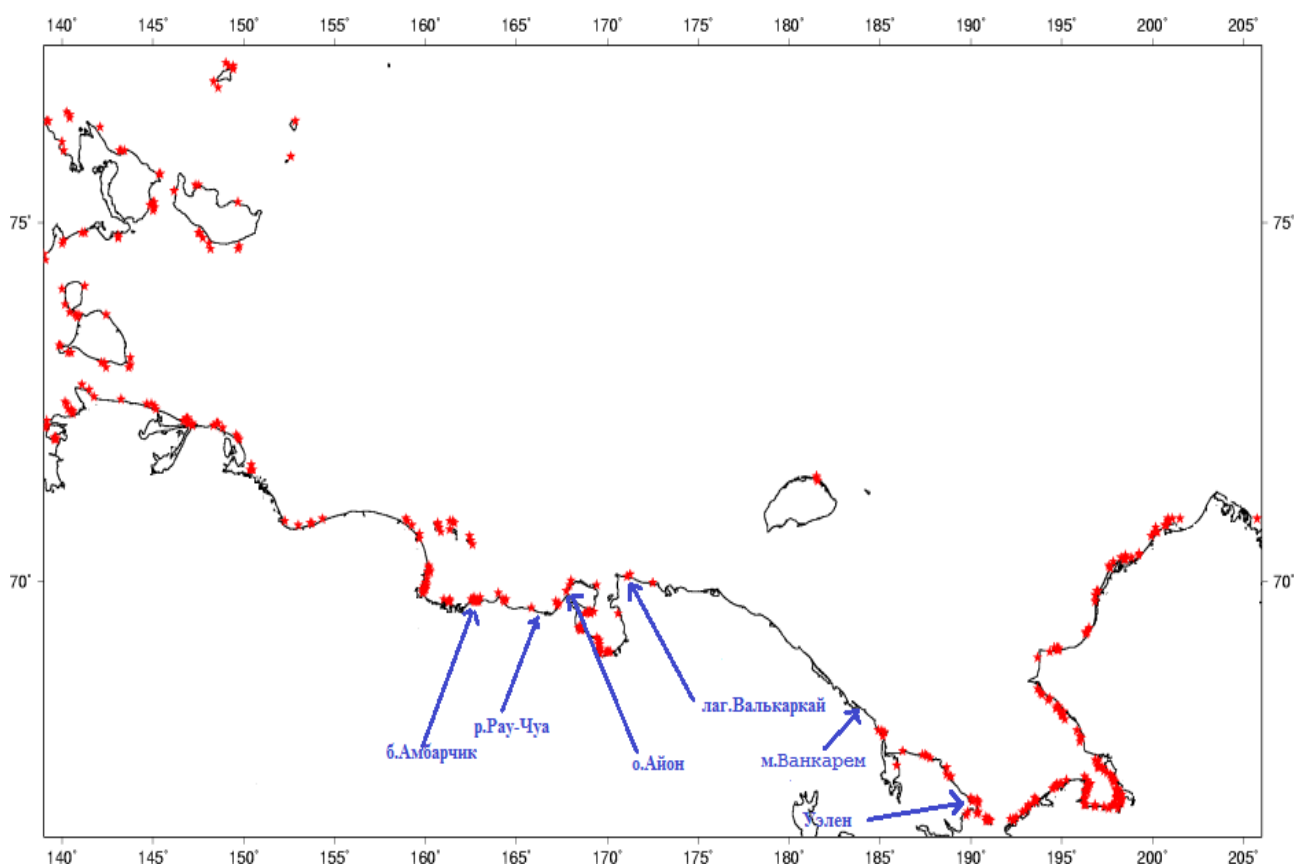


Рис. 1. Точки оценки высот волн по спутниковым наблюдениям (красные звездочки) и прибрежным станциям (синие стрелки).

Точность прогнозов высоты волн оценивалась согласно Наставлению [2]. В качестве допустимой ошибки прогноза принималась величина, равная 30 % от наблюдаемого значения. В морях прогнозы считаются оправдавшимися при любой действительной высоте волн от 0 до 1,0 м. В прибрежных мелководных районах, бухтах, портах – при любой действительной высоте волн от 0 до 0,2 м. Данные наблюдений на шести станциях (рис. 1) получены из телеграмм КН-02 МОРЕ на срок 00 ч ВСВ.

В табл. 1 приведены оценки качества высот волн за период проведения оперативных испытаний. Приняты следующие обозначения, которые будут использоваться по тексту и в таблицах: t – заблаговременность (часы), $Bias$ – систематическая ошибка (м), $|\bar{\Delta}|$ – средняя абсолютная ошибка (м), \bar{q} – средняя относительная ошибка (%), \bar{S} – средняя квадратическая ошибка, σ – стандартное отклонение от среднего, r – коэффициент корреляции, SI – индекс рассеивания, или разброс ошибок, P – оправдываемость (%).

Таблица 1

Показатели качества прогнозов высот волн в прибрежных районах морей
Восточной Арктики

t	$Bias$	$ \bar{\Delta} $	\bar{q}	\bar{S}	r	SI	S/σ	P
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Прибрежная 4-км зона								
6	-0,14	0,23	9,1	0,31	0,77	0,48	0,76	94,1
18	-0,15	0,23	9,1	0,30	0,78	0,48	0,77	94,5
30	-0,15	0,24	9,6	0,31	0,77	0,49	0,77	94,4
42	-0,15	0,23	9,2	0,30	0,79	0,47	0,74	94,8
54	-0,18	0,26	10,5	0,33	0,74	0,52	0,83	92,9
66	-0,17	0,26	10,2	0,33	0,74	0,51	0,82	93,8
78	-0,15	0,27	10,8	0,34	0,70	0,54	0,86	94,2
90	-0,17	0,26	10,6	0,35	0,68	0,55	0,88	94,6
102	-0,21	0,30	12,0	0,38	0,69	0,60	0,94	92,1
114	-0,19	0,31	12,3	0,38	0,62	0,62	0,98	90,4
Станция Амбарчик								
12	0,02	0,13	14,6	0,17	0,72	0,51	0,78	89,7
24	0,03	0,13	14,5	0,18	0,72	0,50	0,77	90,7
36	-0,04	0,13	14,5	0,17	0,71	0,50	0,77	90,7
48	-0,04	0,14	16,1	0,18	0,70	0,53	0,80	91,8
60	-0,01	0,13	14,9	0,17	0,71	0,51	0,78	89,4
72	-0,05	0,17	18,5	0,22	0,55	0,53	1,00	86,9
84	-0,03	0,18	19,6	0,23	0,47	0,66	1,02	80,0
96	-0,03	0,17	18,9	0,22	0,52	0,64	0,98	89,3
108	-0,02	0,18	20,6	0,24	0,45	0,69	1,06	84,5
120	-0,09	0,18	19,9	0,22	0,46	0,65	1,00	84,0
Станция Рау-Чуа								
12	0,00	0,04	9,8	0,08	0,64	0,57	0,78	92,2
24	0,00	0,05	9,6	0,09	0,62	0,58	0,79	92,0
36	0,00	0,04	8,8	0,08	0,64	0,56	0,81	92,0
48	0,00	0,05	9,8	0,09	0,55	0,61	0,88	89,8
60	0,01	0,04	8,6	0,08	0,60	0,57	0,90	95,9
72	0,00	0,04	7,5	0,07	0,64	0,51	0,79	97,9
84	0,00	0,04	7,0	0,07	0,55	0,55	1,00	97,9
96	0,00	0,04	8,5	0,08	0,35	0,61	1,10	97,9
108	0,00	0,04	7,9	0,08	0,43	0,59	1,08	95,8
120	0,00	0,02	5,3	0,06	0,59	0,46	0,82	97,8

Станция Айон								
12	0,00	0,10	6,8	0,13	0,86	0,58	0,51	93,2
24	0,00	0,10	6,7	0,13	0,88	0,55	0,49	93,0
36	0,00	0,10	6,8	0,14	0,85	0,60	0,53	94,8
48	0,00	0,12	6,2	0,12	0,89	0,51	0,45	91,1
60	-0,01	0,12	6,8	0,12	0,88	0,54	0,48	91,2
72	-0,02	0,10	7,0	0,13	0,88	0,54	0,49	92,7
84	-0,01	0,10	6,8	0,14	0,85	0,59	0,54	96,4
96	-0,02	0,11	7,2	0,13	0,88	0,53	0,49	92,5
108	-0,02	0,11	7,6	0,14	0,86	0,58	0,54	90,9
120	-0,04	0,12	8,1	0,15	0,85	0,60	0,55	94,1
Станция Валькаркай								
12	-0,09	0,13	10,8	0,19	0,74	0,44	0,77	90,3
24	-0,08	0,13	10,7	0,18	0,74	0,44	0,75	88,2
36	-0,08	0,13	9,8	0,19	0,73	0,44	0,75	88,4
48	-0,07	0,12	8,9	0,17	0,78	0,40	0,73	90,2
60	-0,08	0,13	9,8	0,18	0,70	0,45	0,79	88,2
72	-0,10	0,15	11,2	0,20	0,66	0,48	0,86	90,0
84	-0,10	0,14	18,0	0,20	0,49	0,50	1,03	90,0
96	-0,08	0,14	17,8	0,20	0,42	0,52	1,05	89,8
108	-0,09	0,16	20,0	0,22	0,38	0,56	1,13	86,0
120	-0,08	0,15	18,9	0,20	0,42	0,52	1,05	85,1
Станция Ванкарем								
12	-0,01	0,21	14,0	0,31	0,66	0,71	0,76	90,7
24	-0,01	0,20	13,6	0,29	0,74	0,65	0,68	85,4
36	-0,03	0,24	16,2	0,34	0,58	0,84	0,86	85,2
48	-0,03	0,24	16,2	0,36	0,58	0,85	0,86	85,2
60	-0,02	0,23	15,4	0,33	0,68	0,73	0,74	83,3
72	-0,02	0,23	15,4	0,32	0,68	0,73	0,74	83,3
84	-0,02	0,24	16,1	0,35	0,64	0,78	0,79	84,9
96	-0,02	0,24	15,9	0,32	0,71	0,70	0,73	84,3
108	-0,02	0,26	17,4	0,39	0,58	0,80	0,83	84,3
120	-0,01	0,26	17,0	0,38	0,63	0,82	0,84	85,1
Станция Уэлен								
12	-0,04	0,26	10,2	0,35	0,83	0,39	0,56	87,4
24	-0,04	0,27	10,9	0,37	0,81	0,42	0,60	84,1
36	-0,05	0,28	11,1	0,38	0,80	0,43	0,61	83,7
48	-0,04	0,31	12,4	0,43	0,73	0,49	0,70	84,9
60	-0,04	0,33	13,2	0,44	0,71	0,51	0,71	83,5
72	-0,10	0,34	13,6	0,48	0,62	0,56	0,81	83,3
84	-0,08	0,47	13,3	0,47	0,68	0,55	0,77	85,5
96	-0,07	0,33	13,3	0,47	0,67	0,55	0,77	85,5
108	-0,02	0,38	15,0	0,50	0,64	0,56	0,81	83,1
120	0,01	0,38	14,7	0,53	0,59	0,61	0,87	80,0

По величине P прогнозов модели WAVEWATCH в прибрежных районах Восточной Арктики превышает 90 %. В районе станций, по SWAN, колеблется от 97 до 80 % с заблаговременностью до 120 часов. К неудовлетворительным оценкам необходимо отнести превышение SI уровня 0,4.

С учетом количественных значений основных статистических критериев (S/σ , r , P) можно рекомендовать использование прогнозов для станций Айон, Ванкарем и Уэлен с заблаговременностью до 120 часов; Валькаркай – 72 часа; Амбарчик – 60 часов и Рау-Чуа – 48 часов.

3. Сравнение с другими методами и анализ ошибок

Оценки качества инерционных прогнозов на 24 часа по прибрежным станциям приведены в табл. 2. По комплексу всех оценок преимущество этого прогноза над методическим наблюдается для станции Рау-Чуа. Для Айона – только по эффективности и абсолютной ошибке, по остальным статистикам – выигрыш методического прогноза. По станциям Валькаркай и Ванкарем, в комплексе, методический лучше, но эффективность менее 1 %. Абсолютное преимущество получено для станций Амбарчик и Уэлен.

Таблица 2

Показатели качества инерционных прогнозов высоты волн на 24 часа

Станция	$Bias$	$ \bar{\Delta} $	\bar{q}	\bar{S}	r	SI	S/σ	P	$P_m - P_u$
Амбарчик	0,00	0,21	20,9	0,29	0,31	0,76	1,17	74,3	16,4
Рау-Чуа	-0,07	0,04	5,6	0,09	0,80	0,53	0,61	94,4	-2,4
Айон	-0,02	0,06	3,8	0,16	0,72	0,70	0,69	98,7	-5,7
Валькаркай	-0,02	0,17	12,9	0,24	0,68	0,50	0,77	87,5	0,7
Ванкарем	-0,02	0,22	14,9	0,42	0,52	1,01	0,95	86,3	-0,9
Уэлен	-0,02	0,46	18,6	0,61	0,49	0,70	0,99	71,0	13,1

В сравнении с оперативной технологией 2018 года [1], новый модифицированный вариант системы позволяет использовать прогнозы по всем прибрежным пунктам. Ранее наблюдались неудовлетворительные прогнозы волнения в трех из четырех районов, а именно: Амбарчик, Айон и Валькаркай (по комплексу всех статистик). Лучшие прогнозы получены по оперативной версии 2018 г. для Уэлена.

Рассмотрим причины ошибок. При оценке прогнозов скорости ветра модели ICON по станциям было выявлено, что, за исключением Валькаркай и Уэлена, по модулю скорости с заблаговременностью до двух суток оценка удовлетворительная. По направлению – для всех станций оценки неудовлетворительные. Это основная причина ошибок, влияющая на качество прогнозов волнения. Сравнительный анализ скоростей приводного ветра по моделям ICON (данные за 2022 г.) и GFS (данные за 2021 г. с пространственным шагом полей $0,25^\circ \times 0,25^\circ$) не показал однозначного преимущества одной над другой. Для станции

Уэлен причина удачных прогнозов волнения по технологии 2018 г. над новой объясняется более близкими к наблюдениям расчетной скорости ветра GFS.

Вторая причина – несоответствие координат реального расположения прибрежных станций, указанных в различных справочниках по климату, что усложняет выбор модельной точки, совпадающей пункту наблюдения. Для решения этой проблемы привлекалась компьютерная программа Google Earth. Рассматривалось спутниковое изображение местности и предположительное расположение станции (населенного пункта).

К третьей причине ошибок необходимо отнести большой шаг расчетной сетки модели SWAN (30"×30"), построенной по архиву батиметрии GEBCO. Согласно Руководства [3], при визуальном наблюдении за волнением на расстоянии до 100 м высота пункта наблюдения должна составлять 5–6 м, что не на всех станциях имеется. Перепад глубин на таком расстоянии может составлять от 1 до 10 м. При высоте волны более 0,5 м это уже существенно влияет на качество прогноза. И по этой причине сложно подобрать расчетный узел модели, который соответствует реальному пункту наблюдения.

Заключение

Автоматизированная система прогноза волнения в прибрежных районах Восточной Арктики является продолжением ранее разработанной технологии (2018 г.), созданной в ФГБУ «ДВНИГМИ». По результатам оперативных испытаний получены оценки качества расчетных высот волн. Так, в 4-километровой прибрежной зоне можно использовать данные модели WAVEWATCH, около гидрометеорологических станций (порядка 200 м от берега) – модели SWAN с учетом регрессионных зависимостей.

Получено преимущество новой системы по сравнению с аналогичными прогнозами технологии 2018 г. по всем прибрежным станциям, кроме Уэлена.

Результаты испытаний 21 марта 2023 г. были рассмотрены Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета, которая одобрила выполненную работу и рекомендовала ФГБУ «ДВНИГМИ» внедрить усовершенствованную технологию и обеспечить передачу прогнозов с использованием каналов связи Интернет, а ФГБУ «Чукотское УГМС» использовать в оперативной работе продукцию системы в качестве вспомогательного метода.

Список литературы

1. *Вражкин А.Н.* Автоматизированная система прогноза волнения прибрежной зоны Чукотского и Восточно-Сибирского морей. - URL: <http://method.meteorf.ru/methods/sea/shore.pptx>

2. РД 52.27.759–2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. – М.: ТРИАДА ЛТД, 2011. – 195 с.

3. РД 52.10.865–2017. Руководство по расчету режимных характеристик морского ветрового волнения. – Обнинск: Атрифлекс, 2018. – 63 с.

4. *Prill F., Reinert D., Rieger D., Zängl G.* ICON Tutorial: Working with the ICON. Deutscher Wetterdienst (DWD). – 2020. – 278p. – DOI: 10.5676/DWD pub/nwv/icon tutorial2020.

5. *SWAN.* User manual / Delft University of Technology, Environmental Fluid Mechanics Section. – 2020. – 143 p. – URL: <http://www.swan.tudelft.nl> (Дата обращения 2020-11-25)

6. *Tolman H.L.* User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 6.07 Technical Note 333 / NOAA/NWS/NCEP/MMAB, 2019. – 466 p. – URL: <https://github.com/NOAA-EMC/WW3/wiki/Tech-Docs/manual.pdf> (Дата обращения 2020-11-25).

УДК 551.509.313.001.572

Технология среднесрочного прогноза на основе модели ПЛАВ10 с горизонтальным разрешением около 10 км / Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Гойман Г.С., Травова С.В., Зарипов Р.Б., Алипова К.А., Рогутов В.С., Мизяк В.Г., Багров А.Н., Трубина М.А. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2024. – Информационный сборник № 51. – С. 3–11.

Представлено краткое описание глобальной модели ПЛАВ10, методика оценки результатов прогнозов. Описаны результаты оперативных испытаний модели.

Ключевые слова: численный прогноз погоды, глобальная модель атмосферы ПЛАВ, технология среднесрочного прогноза погоды

Табл. 5. Ил. 3. Библ. 10.

УДК 551.509.313.001.572

Технология детализированных по времени ансамблевых долгосрочных прогнозов с еженедельной дискретностью выпуска на основе модели ПЛАВ072L96 / Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Травова С.В., Зарипов Р.Б., Мизяк В.Г., Рогутов В.С., Куликова И.А., Круглова Е.Н., Трубина М.А. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2024. – Информационный сборник № 51. – С. 12–20.

В ФГБУ «Гидрометцентр России» выполнены испытания модели долгосрочного метеорологического прогноза ПЛАВ072L96. Модель имеет горизонтальное разрешение 0,9x0,72 градуса по долготе и широте, 96 уровней по вертикали. Представлена методика испытаний и некоторые результаты.

Ключевые слова: численный прогноз погоды, глобальная модель атмосферы ПЛАВ, технология долгосрочного прогноза погоды

Табл. 3. Библ. 14.

Система сезонного метеорологического прогноза на базе модели INM-CM5 / Хан В.М., Тищенко В.А., Круглова Е.Н., Субботин А.В., Реснянский Ю.Д., Володин Е.М., Грицун А.С., Воробьева В.В., Тарасевич М.А. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2024. – Информационный сборник № 51. – С. 21–36.

В ФГБУ «Гидрометцентр России» совместно с ФГБУН «ИВМ РАН» разработана система глобального ансамблевого сезонного прогноза на основе глобальной климатической модели INM-CM5 и системы подготовки начальных состояний в океане, разработанной в Гидрометцентре России. Проводились оперативные испытания системы сезонного метеорологического прогноза на базе модели INM-CM5 для периода со II квартала 2021 г. по III квартал 2023 г., а также авторские испытания вероятностных и детерминистских прогнозов на ретроспективной выборке за период с 1991 по 2020 год.

В период испытаний производилось сравнение успешности ансамблевых сезонных прогнозов по модели INM-CM5 с успешностью аналогичных ансамблевых прогнозов зарубежных метеоцентров. Результаты испытаний показали, что оценки успешности ансамблевых прогнозов рассматриваемых параметров по территории земного шара и по отдельным регионам сопоставимы с оценками успешности ансамблевых прогнозов зарубежных метеоцентров, участвующих в проекте LC-MME WMO. Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета сочла целесообразным рекомендовать к внедрению в прогностическую работу ФГБУ «Гидрометцентр России» и Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) «Систему сезонного метеорологического прогноза на базе модели INM-CM5».

Ключевые слова: сезонные прогнозы, модель INM-CM5, предсказуемость, неопределенность, оценки прогнозов, зарубежные метеоцентры

Табл. 11. Библ. 8.

Метод сверхдолгосрочного прогнозирования состояния климатической системы на основе климатической модели ИВМ РАН INM-CM5 и системы подготовки данных Гидрометцентра России / Тищенко В.А., Хан В.М., Реснянский Ю.Д., Володин Е.М., Грицун А.С., Воробьева В.В., Тарасевич М.А. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2024. – Информационный сборник № 51. – С. 37–44.

В ФГБУ «Гидрометцентр России» совместно с ФГБУН «ИВМ РАН» разработан метод сверхдолгосрочного прогнозирования климатической системы на основе климатической модели ИВМ РАН INM-CM5 и системы подготовки данных Гидрометцентра России. Испытания метода ансамблевого сверхдолгосрочного прогноза на основе модели INM-CM5 были произведены для периода с 1960 по 2022 год. Оценки успешности среднегодовых и средних за пять лет прогнозов атмосферного давления на уровне моря, геопотенциала поверхности 500 гПа, приземной температуры воздуха и количества осадков рассчитывались с учетом наставлений Всемирной метеорологической организации (ВМО). Анализ успешности ансамблевых сверхдолгосрочных прогнозов на основе модели INM-CM5 сопоставлялся с результатами аналогичных прогнозов, выпущенных ведущими международными метеорологическими центрами, участвующими в консорциуме по годовому и десятилетнему прогнозированию ВМО (LC-ADCP WMO). Результаты испытаний показали, что оценки успешности ансамблевых годовых и пятилетних вероятностных и детерминистских прогнозов основных метеоэлементов по территории земного шара и по отдельно взятым регионам сопоставимы с оценками успешности аналогичных ансамблевых прогнозов зарубежных метеоцентров, участвующих в проекте LC-ADCP WMO, что является свидетельством о соответствии разработанного метода сверхдолгосрочного метеорологического прогноза на базе модели INM-CM5 мировому уровню. Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета сочла целесообразным рекомендовать к внедрению в прогностическую работу ФГБУ «Гидрометцентр России» и Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) «Метод сверхдолгосрочного прогнозирования состояния климатической системы на основе климатической модели ИВМ РАН INM-CM5 и системы подготовки данных Гидрометцентра РФ».

Ключевые слова: свехдолгосрочные прогнозы, модель INM-CM5, предсказуемость, неопределенность, оценки успешности прогнозов, консорциум по годовому и десятилетнему прогнозированию ВМО

Табл. 11. Библ. 8.

УДК 631.559:633.16:551.509.32

Результаты испытания метода долгосрочного прогноза урожайности и валового сбора ярового ячменя по федеральным округам и России в целом / Лебедева В.М., Береза О.В. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2024. – Информационный сборник № 51. – С. 45–57.

Излагаются результаты авторских и производственных испытаний синоптико-статистического метода долгосрочного прогноза урожайности ярового ячменя 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 составляет около шести месяцев, прогноз составляется в марте.

Ключевые слова: метод, долгосрочный прогноз валового сбора, яровой ячмень, циркуляция атмосферы, температура поверхности океанов, методика, результаты испытаний

Табл. 4. Ил. 6. Библ. 14.

УДК 631.559:633.12:551.509.32

124

Результаты испытания автоматизированной технологии составления оценки условий вегетации и прогноза урожайности гречихи по субъектам Российской Федерации в Гидрометцентре России / Лебедева В.М., Береза О.В. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2024. – Информационный сборник № 51. – С. 58–71.

Представлены результаты авторских и производственных испытаний в Гидрометцентре России автоматизированной технологии составления оценки условий вегетации и прогноза урожайности гречихи по субъектам РФ с заблаговременностью 1–2 месяца в рамках информационно-прогностической системы.

Информационно-прогностическая система позволяет на базе персонального компьютера осуществлять обработку декадных телеграмм, ежедекадно получать оценку условий вегетационного периода и проводить расчёты 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, гречиха, оправдываемость метода, результаты испытаний

Табл. 3. Ил. 6. Библ. 14.

УДК 631.559:633.12:551.509.3

Результаты испытания методов прогноза урожайности картофеля по Иркутской области / Пищимко О.И., Соболева Т.Д. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2024. – Информационный сборник № 51. – С. 72–75.

Приведены результаты испытания методов прогноза урожайности картофеля по всем категориям хозяйств и сельскохозяйственным предприятиям Иркутской области, разработанных в рамках выполнения темы 1.2.4.2 Плана НИОКР Росгидромета на 2020–2024 гг. Решением Технического совета ФГБУ «Иркутское УГМС» от 20 апреля 2023 г. и ЦМКП от 29 мая 2023 г. рекомендованы к внедрению с 1 августа 2023 г. в оперативную практику специалистов-агрометеорологов Гидрометцентра ФГБУ «Иркутского УГМС» «Метод прогноза урожайности картофеля по всем категориям хозяйств Иркутской области» (модель 1) и «Метод прогноза урожайности картофеля по сельскохозяйственным предприятиям Иркутской области» (модель 1) в качестве основного расчетного метода на срок 1–3 августа.

Ключевые слова: прогноз урожайности картофеля, Иркутская область, результаты испытаний
Табл. 1. Библ. 4.

УДК 556.06

Методика краткосрочного и среднесрочного прогноза расхода и уровней воды на реках бассейна Дона / Христофоров А.В. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2024. – Информационный сборник № 51. – С. 76–90.

Для рек бассейна Дона в ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана методика ежедневного краткосрочного и среднесрочного прогнозирования расходов и уровней воды. Среднесуточные расходы и уровни воды прогнозируются в течение всего года с заблаговременностью от 1 до 10 суток на основе метода экстраполяции гидрографа, в котором учитываются их значения за дату составления прогноза и за 5 предыдущих суток. Для оценки параметров схемы получения прогноза используются данные гидрологических наблюдений для каждого речного створа.

Методика дает удовлетворительные результаты и может быть использована в рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов в целях обеспечения необходимой прогностической информацией оперативных решений по использованию водных ресурсов рек бассейна Дона и защите населения от опасных наводнений.

Ключевые слова: расходы воды, уровни воды, прогноз, заблаговременность; верификация, погрешность; оправдываемость прогнозов

Табл. 5. Ил. 3. Библ. 14.

УДК 556.06

Методика краткосрочного и среднесрочного прогноза уровней воды на реках бассейна Тобола / Христофоров А.В. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2024. – Информационный сборник № 51. – С. 91–104.

Для рек бассейна Тобола в ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана методика ежедневного краткосрочного и среднесрочного прогнозирования уровней воды. Среднесуточные уровни воды прогнозируются в течение всего года с заблаговременностью от 1 до 10 суток на основе метода экстраполяции гидрографа, в котором учитываются уровни воды за дату составления прогноза и за 5 предыдущих суток. Для оценки параметров схемы получения прогноза используются данные гидрологических наблюдений для каждого речного створа.

Методика дает удовлетворительные результаты и может быть использована в рамках автоматизированной системы подготовки и выпуска прогнозов в целях обеспечения необходимой прогностической информацией оперативных решений по использованию водных ресурсов рек бассейна Тобола и защите населения от опасных наводнений.

Ключевые слова: уровни воды, прогноз, заблаговременность; верификация, погрешность; оправдываемость прогнозов

Табл. 5. Ил. 4. Библ. 13.

УДК 551.466.33

Система (технологическая линия) прогноза волнения в бухте Нагаева Охотского моря с заблаговременностью до 5 суток / Вражкин А.Н., Таин В.Н. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2024. – Информационный сборник № 51. – С. 105–112.

Приведено описание технологии прогноза волнения в прибрежной зоне Охотского моря. Используются две модели последнего поколения. Оперативные испытания системы прогноза проводились с июня по декабрь 2021 года. Заблаговременность прогноза составляет 120 часов. Рассмотрены оценки качества прогнозов скорости приводного ветра и высоты волн в сравнении с данными наблюдений на гидрометеорологической станции Магадан.

Ключевые слова: волновая модель, бухта Нагаева, показатели успешности прогноза

Табл. 6. Ил. 1. Библ. 5.

УДК 551.466.33

Система (технологическая линия) прогноза волнения в прибрежных районах Восточной Арктики / Вражкин А.Н. // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2024. – Информационный сборник № 51. – С. 113–120.

Приведено описание изменений ранее разработанной технологии прогноза волнения прибрежной зоны Восточной Арктики. Используются две модели последнего поколения. Оперативные испытания проводились с июня по ноябрь 2022 г. Заблаговременность прогноза составляет 120 часов. Получены оценки качества расчетных высот волн в сравнении с данными наблюдений и инерционными прогнозами. Проведен анализ ошибок.

Ключевые слова: высота волнения, прибрежные акватории, показатели успешности прогноза

Табл. 2. Ил. 1. Библ. 6.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Гойман Г.С., Травова С.В., Зарипов Р.Б., Алипова К.А., Рогутов В.С., Мизяк В.Г., Багров А.Н., Трубина М.А.</i> Технология среднесрочного прогноза на основе модели ПЛАВ10 с горизонтальным разрешением около 10 км	3
<i>Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Травова С.В., Зарипов Р.Б., Мизяк В.Г., Рогутов В.С., Куликова И.А., Круглова Е.Н., Трубина М.А.</i> Технология детализированных по времени ансамблевых долгосрочных прогнозов с еженедельной дискретностью выпуска на основе модели ПЛАВ072L96	12
<i>Хан В.М., Тищенко В.А., Круглова Е.Н., Субботин А.В., Реснянский Ю.Д., Володин Е.М., Грицун А.С., Воробьева В.В., Тарасевич М.А.</i> Система сезонного метеорологического прогноза на базе модели INM-CM5	21
<i>Тищенко В.А., Хан В.М., Реснянский Ю.Д., Володин Е.М., Грицун А.С., Воробьева В.В., Тарасевич М.А.</i> Метод сверхдолгосрочного прогнозирования состояния климатической системы на основе климатической модели ИВМ РАН INM-CM5 и системы подготовки данных Гидрометцентра России	37
<i>Лебедева В.М., Береза О.В.</i> Результаты испытания метода долгосрочного прогноза урожайности и валового сбора ярового ячменя по федеральным округам и России в целом	45
<i>Лебедева В.М., Береза О.В.</i> Результаты испытания автоматизированной технологии составления оценки условий вегетации и прогноза урожайности гречихи по субъектам Российской Федерации в Гидрометцентре России	58
<i>Пищимко О.И., Соболева Т.Д.</i> Результаты испытания методов прогноза урожайности картофеля по Иркутской области	72
<i>Христофоров А.В.</i> Методика краткосрочного и среднесрочного прогноза расхода и уровней воды на реках бассейна Дона	76
<i>Христофоров А.В.</i> Методика долгосрочного прогноза типов температуры воздуха для западного района Арктики на осенне-зимний период (октябрь-февраль) на основе макроциркуляционного метода	92
<i>Вражкин А.Н., Таин В.Н.</i> Система (технологическая линия) прогноза волнения в бухте Нагаева Охотского моря с заблаговременностью до 5 суток	105
<i>Вражкин А.Н.</i> Система (технологическая линия) прогноза волнения в прибрежных районах Восточной Арктики	113