

*М.А. Толстых<sup>1,2</sup>, Р.Ю. Фадеев<sup>1,2</sup>, В.В. Шашкин<sup>1,2</sup>,  
Г.С. Гойман<sup>1,2</sup>, С.В. Травова<sup>1</sup>, Р.Б. Зарипов<sup>1</sup>, К.А. Алипова<sup>1</sup>,  
В.С. Рогутов<sup>1</sup>, В.Г. Мизяк<sup>1</sup>, А.Н. Багров<sup>1</sup>, М.А. Трубина<sup>1</sup>*

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

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

*Российской Федерации, г. Москва;*

<sup>2</sup>*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 АСОИИ 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.

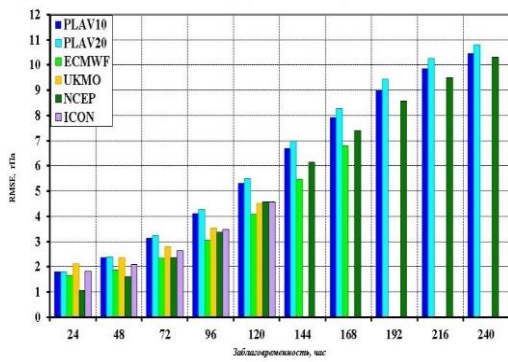
На рис. 1 представлена среднеквадратическая ошибка по территории внетропической части Северного полушария ( $20-90^\circ$  с. ш.) для:

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

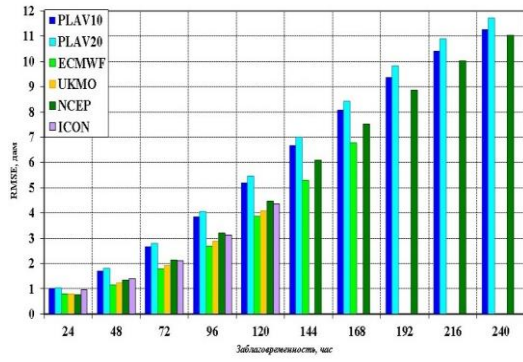
Заблаговременность прогнозов – до 10 суток. Исходный срок – 00 ч ВСВ для прогнозов на 1–5 сутки и 12 ч ВСВ для прогнозов на 6–10 сутки. Оценки по станциям делались для заблаговременностей до 120 часов.

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

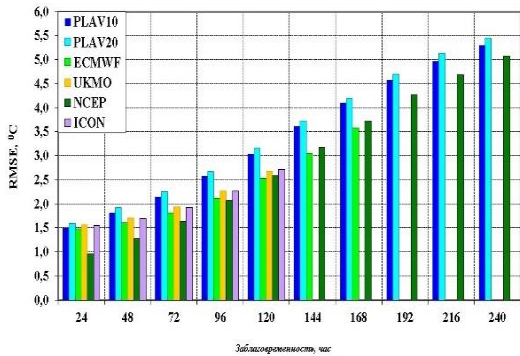
На рис. 3 представлены среднеквадратические ошибки прогноза давления на уровне моря, векторной ошибки ветра, температуры точки росы и абсолютной ошибки прогноза приземной температуры по станциям ЕТР. Заблаговременность прогнозов – до 3 суток. Исходный срок – 00 ч ВСВ.



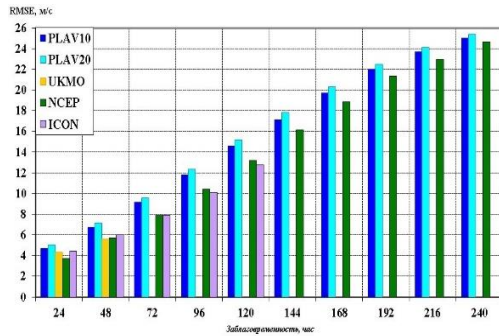
P<sub>0</sub>



H500

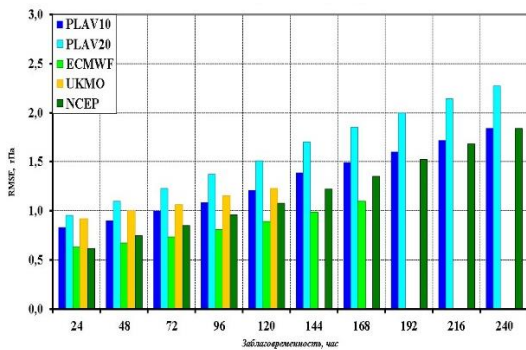


T850

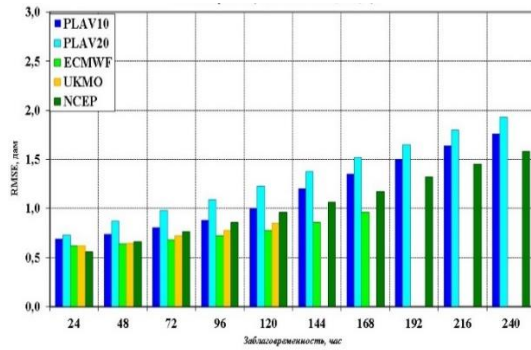


V250

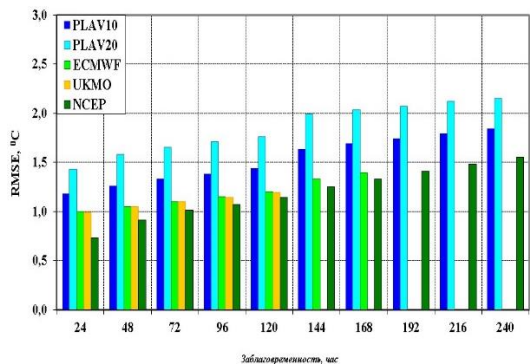
**Рис. 1.** Графики изменения среднеквадратической ошибки прогноза в зависимости от заблаговременности для внетропической части Северного полушария (20–90° с. ш.) по сетке 1,5°×1,5° (период 5 октября 2022 г. – 7 мая 2023 г.).



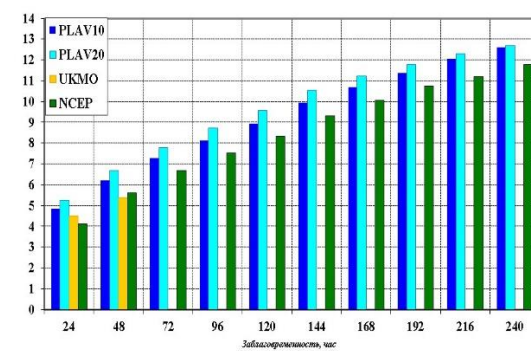
P<sub>0</sub>



H500

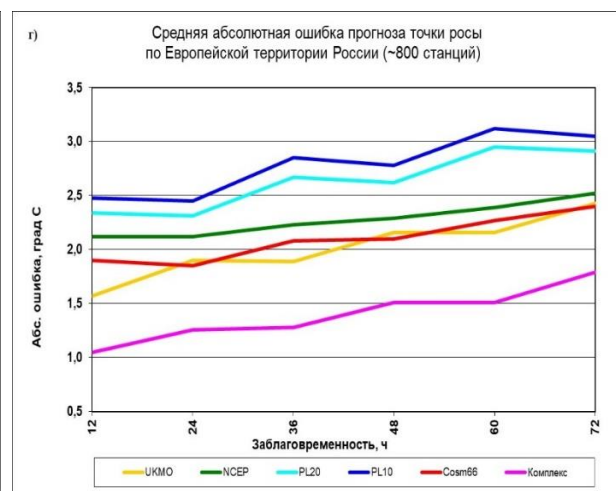
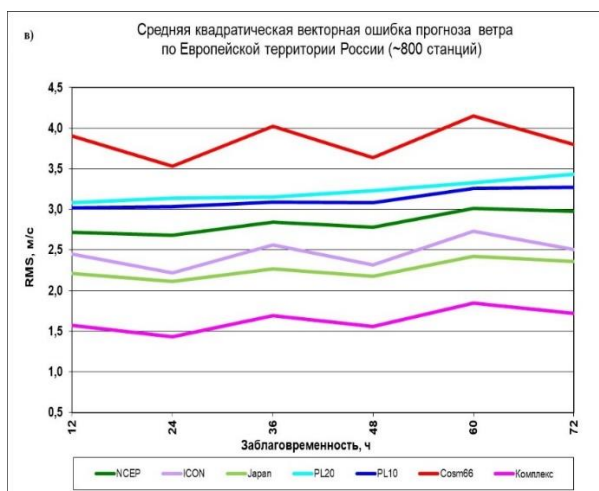
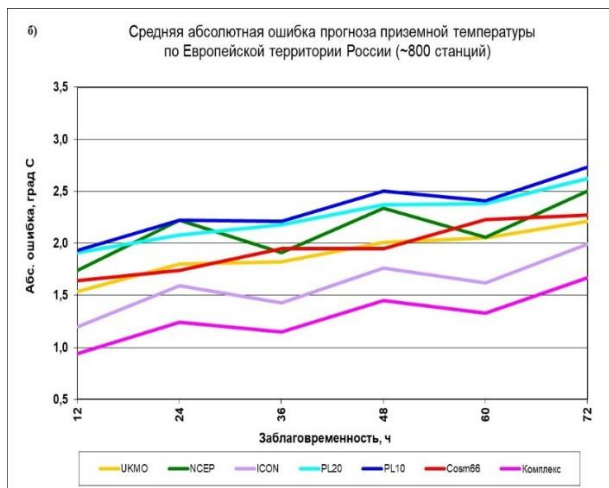
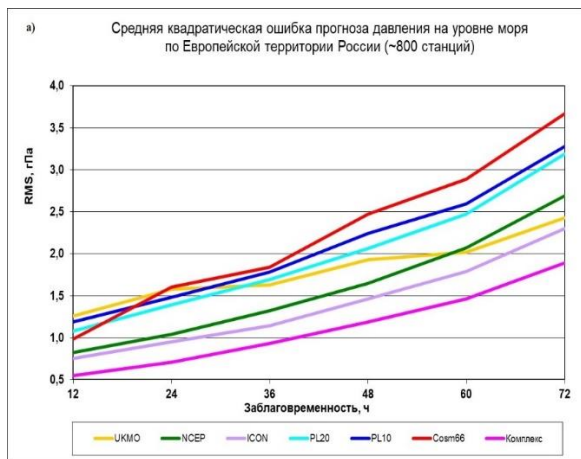


T850



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

Таблица 2

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

8

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