

*М.А. Толстых<sup>1,2</sup>, Р.Ю. Фадеев<sup>1,2</sup>,  
В.В. Шашкин<sup>1,2</sup>, С.В. Травова<sup>1</sup>, Р.Б. Зарипов<sup>1</sup>, В.Г. Мизяк<sup>1</sup>,  
В.С. Рогутев<sup>1</sup>, Куликова И.А.<sup>1</sup>, Круглова Е.Н., М.А. Трубина<sup>1</sup>*

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

*<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 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](http://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).