

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-1-6-20>
УДК 551.509.313+551.509.323

Усовершенствованный динамико-статистический метод прогноза среднемесячной приземной температуры воздуха

Р.М. Вильфанд¹, Е.Н. Круглова¹, И.А. Куликова¹, В.М. Хан^{1,2}

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

*²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской академии наук, г. Москва, Россия*

kulikova@mecom.ru, kruglova@mecom.ru, khan@mecom.ru

Обосновывается возможность улучшения динамико-статистического метода прогноза среднемесячной температуры воздуха с применением более совершенных гидродинамических моделей и статистических методов для использования в оперативной практике ФГБУ «Гидрометцентр России». Представлена технология месячного прогноза аномалий приземной температуры воздуха, основанная на использовании результатов усовершенствованной схемы среднесрочных прогнозов элементов погоды на 15 суток и результатов интегрирования модели ПЛАВ на интервале 16–30 суток. Приводятся оценки качества прогнозов, полученные в режиме реального времени для 326 станций, расположенных на территории России. Показаны преимущества предложенного подхода, особенно выраженные в случае значительных аномалий температуры воздуха. Полученные результаты предполагается использовать в технологии выпуска долгосрочных прогнозов Гидрометцентра России.

Ключевые слова: приземная температура воздуха, прогнозы на месяц, статистическая коррекция, верификация

Improved dynamic statistical method for forecasting monthly surface air temperature

R.M. Vilfand¹, E.N. Kruglova¹, I.A. Kulikova¹, V.M. Khan^{1,2}

¹Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

*²A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

kulikova@mecom.ru, kruglova@mecom.ru, khan@mecom.ru

The possibility of improving the dynamic statistical method for forecasting monthly air temperature using modern hydrodynamic models and statistical methods in operational practice of the Hydrometeorological Research Center of Russia is substantiated. The technology for monthly forecasting of surface air temperature anomalies based on the combination of the improved scheme of medium-range forecasts of weather elements for 15 days and the SL-AV model output forecast data for 16–30 days is presented. Forecast skill scores obtained in real time for 326 stations located on the territory of Russia are given. Advantages of the proposed approach are shown, especially in the case of significant air temperature anomalies. The results are supposed to be used in the technology of long-range forecasting at the Hydrometeorological Research Center of Russia.

Keywords: surface air temperature, monthly forecasts, statistical correction, verification

Введение

В настоящее время в области среднесрочных и долгосрочных метеорологических прогнозов, а также прогнозов климата достигнут существенный прогресс, на фоне которого появляются реальные возможности для реализации единой системы моделирования погоды и климата, так называемого «бесшовного» подхода [8, 10]. При этом погода и климат рассматриваются как непрерывный процесс, объединяющий движения различных масштабов от нескольких часов до нескольких недель, месяцев, лет, десятилетий и более. Временной диапазон от субсезонного до сезонного (ССП), который соответствует прогнозам с заблаговременностью более двух недель, но менее сезона, заполняет пробел между прогнозированием погоды и климата и представляет собой центральный компонент для бесшовного прогнозирования погоды и климата [2]. Данный диапазон является наиболее сложным для прогнозирования, поскольку роль начальных условий ослабевает, а влияние условий, обуславливающих неадиабатические притоки и стоки тепла (температуры поверхности океана, морского льда, снежного покрова и др.), еще не проявляется достаточно полным образом.

Важную роль в повышении качества прогнозов на субсезонных интервалах интегрирования играет статистическая коррекция. Процедура статистической коррекции результатов гидродинамического моделирования для прогноза средней месячной приземной температуры воздуха широко используется в практике мировых метеорологических центров. В ФГБУ «Гидрометцентр России» наряду с прогнозом месячной заблаговременности, основанном на синоптическом методе, в отделе долгосрочных прогнозов погоды выпускается оперативный прогноз средней месячной температуры с нулевой заблаговременностью на основе комплексования трех разных подходов в соответствии с решениями Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета от 29 октября 2002 г. и 4 апреля 2006 года.

Один из этих подходов использует инерционную связь между аномалией температуры воздуха первой декады и аномалией всего месяца, в который она входит [3]. Второй подход основан на статистической интерпретации прогнозов двух гидродинамических моделей: модели ПЛАВ и модели Национального центра прогнозов окружающей среды США (NCER). Статистическая интерпретация выполняется в рамках регрессионной модели [4, 5]. И наконец, третий подход, реализованный в ГГО, базируется на результатах интегрирования глобальной спектральной модели атмосферы. В схеме ГГО температура воздуха определяется непосредственно на основе результатов гидродинамического моделирования, а коррекция систематических ошибок производится с использованием архивов ретроспективных прогнозов и последующей Фурье-аппроксимации сезонного хода [6, 7].

В данной работе предприняты попытки усовершенствования динамико-статистического метода месячного прогноза с использованием более совершенных гидродинамических моделей и статистических методов для использования в оперативной практике Гидрометцентра России.

1. Исходные данные и методы исследования

Основой технологии месячного прогноза служит усовершенствованная схема среднесрочных прогнозов элементов погоды (РЭП) [1] с расширенным (до двух недель) сроком действия. Важным вкладом в повышение качества метеорологических прогнозов и расширение их срока действия стала реализация Международного научного проекта "Subseasonal to seasonal prediction project "(S2S) с участием с 2016 года Гидрометцентра России. Результаты интегрирования моделей мировых метеорологических центров-участников проекта S2S (ECMWF, UKMO, NCEP, JMA, ПЛАВ) используются в качестве предикторов в схеме РЭП.

Дальнейшая обработка результатов гидродинамического моделирования и их оптимальная коррекция производится на основе метода центрального типирования атмосферных макропроцессов, сезонной классификации при формировании обучающих выборок с учетом непрерывности прогностических полей по территории. С использованием расчетов статистических характеристик прогнозов осуществляется комплексация результатов с весами, пропорциональными скользящей оправдываемости прогнозов, входящих в мультимодельный ансамбль. Ряд характеристик полей и их производных (H500, T850 и MSLP) используются в качестве предикторов. Во всех предикторах при расчете дифференциальных и интегральных операторов в конечно-разностной форме используются трафареты для сферических трапеций различных масштабов. На каждом шаге осуществляется пошаговое просеивание с сокращением размерности вектора предикторов. Для отобранных компонентов решением перераспределенной системы регрессионных уравнений находится искомый вектор коэффициентов. Этот вектор служит в качестве свертки с вектором оперативных предикторов для расчетов прогностических значений приземной температуры воздуха на 15 суток.

В представленной работе динамико-статистический метод месячного прогноза приземной температуры воздуха основывается на полученных на базе РЭП прогнозах аномалий приземной температуры воздуха на 15 суток и результатах интегрирования модели ПЛАВ [9] на интервале 16–30 суток.

2. Общая схема месячного прогноза

На рис. 1 приводится общая технологическая схема месячного прогноза аномалий приземной температуры воздуха с нулевой заблаговременностью, реализованная на трех вычислительных платформах.

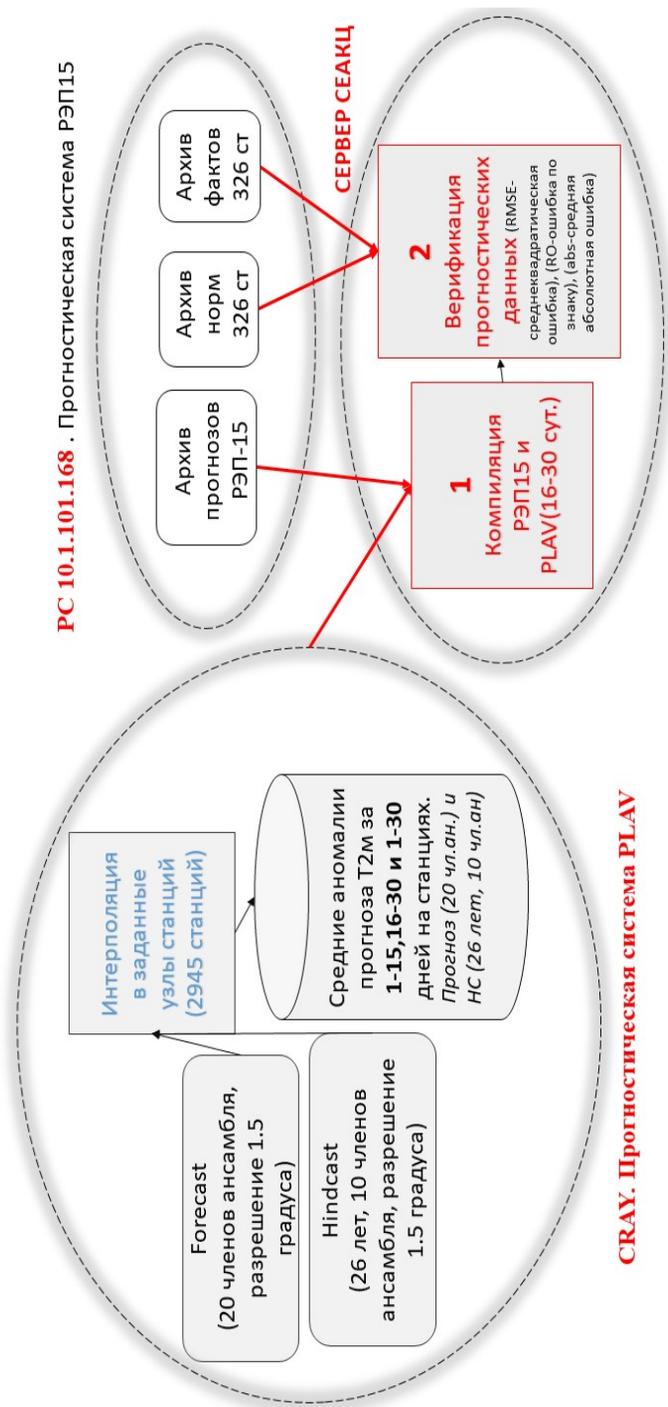


Рис. 1. Общая блок-схема комплексации прогнозов.
Fig. 1. The block diagram of integration of forecasts.

На суперкомпьютере CRAY еженедельно по четвергам проводятся расчеты прогностических полей метеорологических элементов по гидродинамической модели ПЛАВ на период до четырех календарных месяцев. В параллельном режиме на внутреннем сервере Гидрометцентра России ежедневно рассчитываются прогнозы РЭП на 15 суток для 2945 станций, расположенных на территории Евразии (рис. 2).

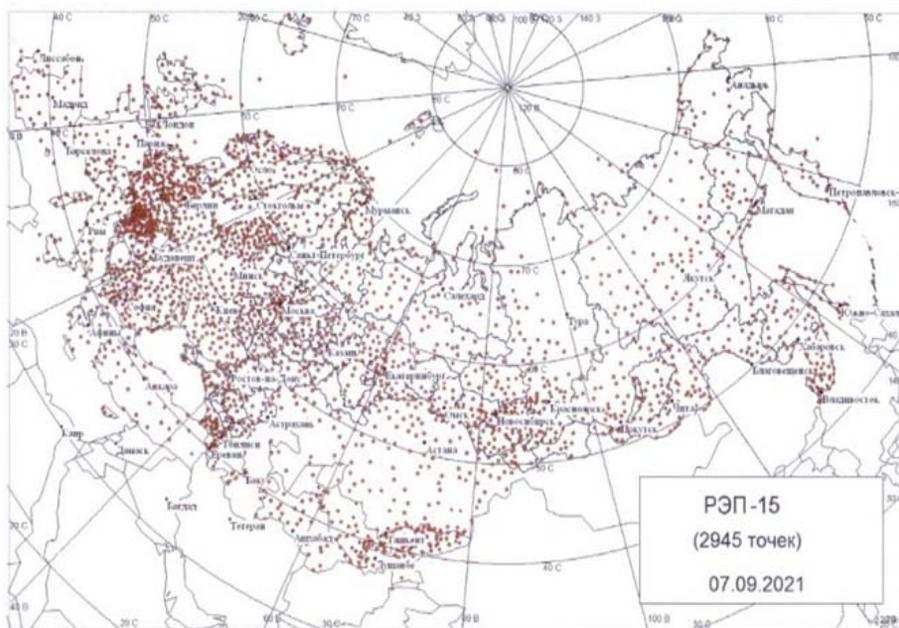


Рис. 2. Географическое расположение 2945 станций прогноза РЭП-15.

Fig. 2. The spatial distribution of 2945 stations with REP-15 forecast.

Заключительный этап расчетов и комплексация прогнозов РЭП (на 15 суток) и ПЛАВ (на 16–30 суток) производится на сервере СЕАКЦ, который связан по локальной сети с указанными ранее серверами. При этом важным этапом является горизонтальная интерполяция прогностических полей ПЛАВ в координаты 2945 станций.

На рис. 3 в качестве примера представлены прогностические поля, полученные на базе ПЛАВ (для временных интервалов 1–15, 16–20 и 1–30 дней) и РЭП (1–15 дней) для октября 2021 г. (начальная дата прогноза 30 сентября 2021 года).

Область на рисунке, ограниченная пунктиром, объединяет прогнозы, которые используются при комплексации. Результаты графического анализа позволяют проводить сравнение сеточных полей и полей, полученных на основе станционных данных.

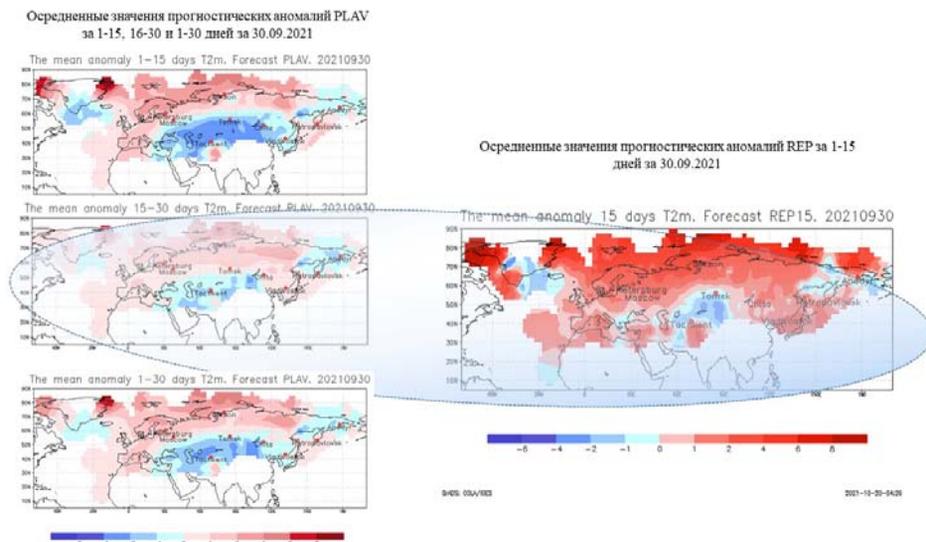


Рис. 3. Прогностические поля, полученные на базе ПЛАВ (для временных интервалов 1–15, 16–20 и 1–30 дней) и РЭП (1–15 дней) для октября 2021 г. (начальная дата прогноза 30 сентября 2021 г.).

Fig. 3. Maps of forecasts issued on the basis of SLAV (for the forecast period of 1–15, 16–20 and 1–30 days) and REP (1–15 days) for October 2021 (the initial forecast date is September 30, 2021).

3. Верификация прогнозов

Блок верификации прогнозов, реализованный в рамках основной технологической линии (см. рис. 1), позволяет проводить мониторинг качества прогнозов в реальном режиме времени. Оценками качества прогнозов служат средняя квадратическая ошибка RMSE, коэффициент корреляции знака аномалии RO и абсолютная ошибка ABS. Климатические параметры рассчитываются на базе архива ежедневных данных о приземной температуре воздуха на 326 станциях (рис. 4) на территории России за период с 1961 по 1990 г., созданного и поддерживаемого в отделе прогностических технологий Мирового метеорологического центра Москва.

В контексте обоснования целесообразности выбранного подхода проводится сравнение осредненных за 15 суток прогнозов, полученных на базе модели ПЛАВ и РЭП (рис. 5) за период с сентября 2021 г. по август 2022 г. (51 случай). Как видно, во всех случаях качество прогнозов, полученных на базе РЭП, превосходит качество гидродинамических прогнозов за тот же временной интервал.

Результаты визуального сравнения фактических и прогностических средних месячных полей, полученных с использованием комплексирования и без него (рис. 6), подводят к выводам о целесообразности использования предложенной методики.

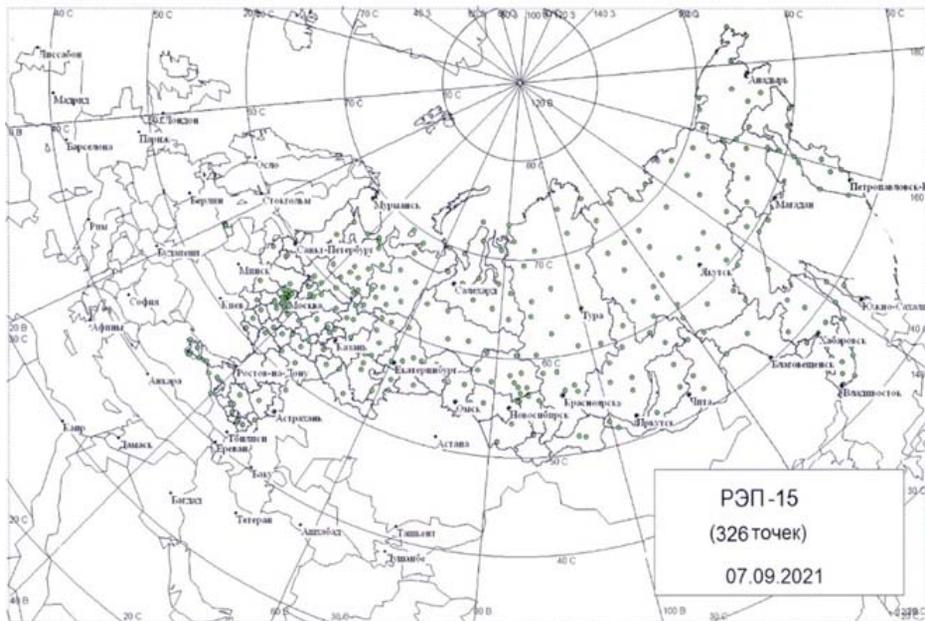


Рис. 4. Географическое расположение 326 станций, которые включены в блок верификации.

Fig. 4. Geographic location of 326 stations included in the verification block.

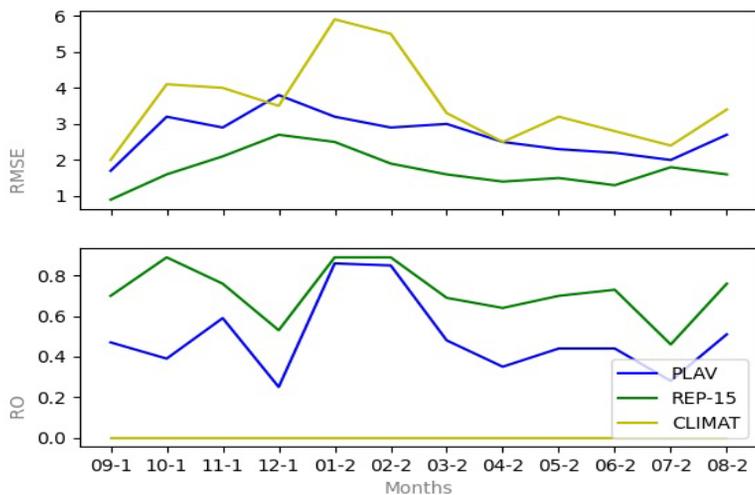


Рис. 5. Временной ход среднемесячных статистических оценок 15-суточных прогнозов аномалий приземной температуры воздуха по РЭП-15 и ПЛАВ с сентября 2021 по август 2022 г. Желтая линия – климатический прогноз.

Fig. 5. Temporal variation of monthly statistical assessment of 15-day forecasts of surface air temperature anomalies according to REP-15 and SLAV from September 2021 to August 2022. The yellow line is the climate forecast.

Результирующий прогноз (рис. 6в), как в структурном отношении, так и с точки зрения интенсивности аномалий, оказывается ближе к фактическому распределению аномалий (рис. 6а), чем прогноз, полученный на базе модели ПЛАВ (рис. 6г).

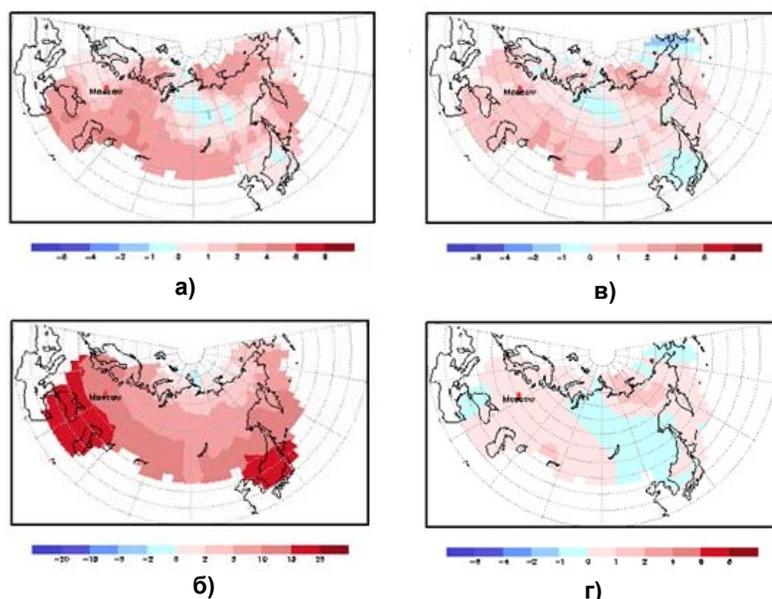


Рис. 6. Прогностические и фактические поля на 326 станциях России по исходным данным за 25 августа 2022 г.: фактические аномалии приземной температуры (trsf) за 30 дней (а); климатическая температуры (trsf) за 30 дней (б); результирующий прогноз аномалий приземной температуры (trsf) на 30 дней (в); прогноз аномалий приземной температуры (trsf) на 30 суток по модели ПЛАВ (г).

Fig. 6. Forecast and control maps at 326 stations in Russian territory according to the initial data from August 25, 2022: observed surface temperature anomalies (trsf) for 30 days (a); climatic estimates for air temperature (trsf) for 30 days (б); the integrated forecast of surface air temperature anomalies (trsf) for 30 days (в); forecast of surface air temperature anomalies (trsf) for 30 days according to the SLAV model (г).

Для проверки степени влияния первых 15 дней на месячный прогноз были проведены эксперименты по объединению прогнозов РЭП-15 и ПЛАВ, которые связаны с подбором весовых коэффициентов для двух типов прогноза аномалий приземной температуры воздуха:

$$F = (k_1 \times \text{РЭП} + k_2 \times \text{ПЛАВ}) / 2,$$

где F – результирующий прогноз; k_1 и k_2 – весовые коэффициенты для моделей РЭП и ПЛАВ.

Было выбрано пять вариантов построения результирующего 30-суточного прогноза с разными весовыми коэффициентами от 0.2 до 0.8.

Статистические оценки различных вариантов прогноза аномалий приземной температуры воздуха за исходную дату 11 августа 2022 г. приведены в табл. 1. Для сравнительного анализа вместе с 30-суточными прогнозами приведены 15-суточные прогнозы (выделены синим цветом).

Таблица 1. Статистические характеристики вариантов прогноза за 11.08.2022 г.

Table 1. Statistical characteristics of different versions of forecast, issued on August 11, 2022

Варианты построения прогноза	RMSE	RO	ABS
ПЛАВ 1-15	3.16	0.43	2.76
ПЛАВ 16-30	1.97	0.52	1.
ПЛАВ 1-30	2.33	0.45	2.07
РЭП-15 (оригинальный)	1.86	0.67	1.49
(РЭП –15) & (ПЛАВ16-30) k1=1, k2=0.	1.26	0.59	1.03
(РЭП-15) & (ПЛАВ16-30) k1=0.5, k2=0.5	1.56	0.65	1.35
Климат-30	2.71	0.00	2.37
Климат-15	3.71	0.00	3.05
k1=0.8, k2=0.2	1.27	0.60	1.07
k1=0.9, k2=0.1	1.25	0.59	1.04
k1=0.3, k2=0.7	1.88	0.72	1.62

Прогнозы аномалий приземной температуры воздуха на 30 суток с нулевой заблаговременностью по вышеописанной методике оперативно рассчитываются один раз в неделю по четвергам, что связано с графиком счета гидродинамической модели ПЛАВ, таким образом за месяц считается четыре или пять прогнозов. Для более наглядного представления оценок полученных прогнозов было проведено осреднение прогнозов внутри месяца с пятью наборами весовых коэффициентов:

Анализ временного хода оценок 30-суточных прогнозов ПЛАВ, климатических и различных схем комплексации с РЭП-15 в основном показывает лучшие оценки по комплексированному варианту с равновесными коэффициентами объединения (рис. 7–9).

На рис. 7–9 синяя линия – модель ПЛАВ, зеленая линия – РЭП-15, желтая линия – климатический прогноз, синяя линия – модель ПЛАВ, зеленая линия – РЭП-15, желтая линия – климатический прогноз, красная линия – комплексация с коэффициентами $k_1=1$ и $k_2=0$, зеленая пунктирная линия – комплексация с коэффициентами $k_1=0.8$ и $k_2=0.2$, зеленая пунктирная с точкой линия – комплексация с коэффициентами $k_1=0.9$ и $k_2=0.1$, красная пунктирная линия – комплексация с коэффициентами $k_1=0.3$ и $k_2=0.7$.

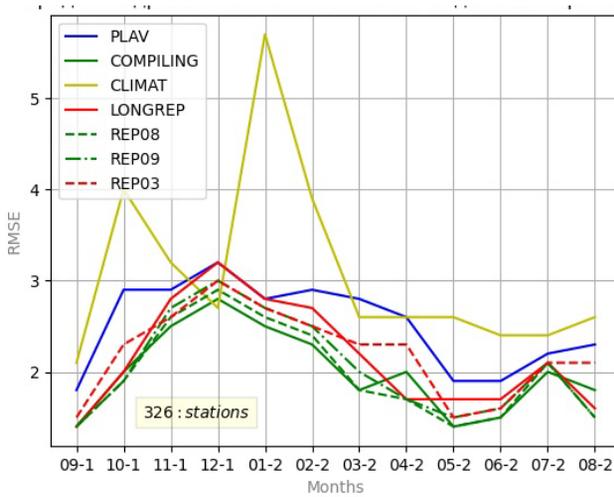


Рис. 7. Временной ход среднеквадратического отклонения среднемесячных 30-суточных прогнозов аномалий приземной температуры воздуха: комплексированный, ПЛАВ и пять вариантов комплексации за 12 месяцев 2021-2022 гг.

Fig. 7. Temporal variability of the root-mean-square deviation of the monthly average 30-day forecasts of surface air temperature anomalies: integrated forecast, SLAV forecast and five versions of the integration for 12 months of 2021-2022.

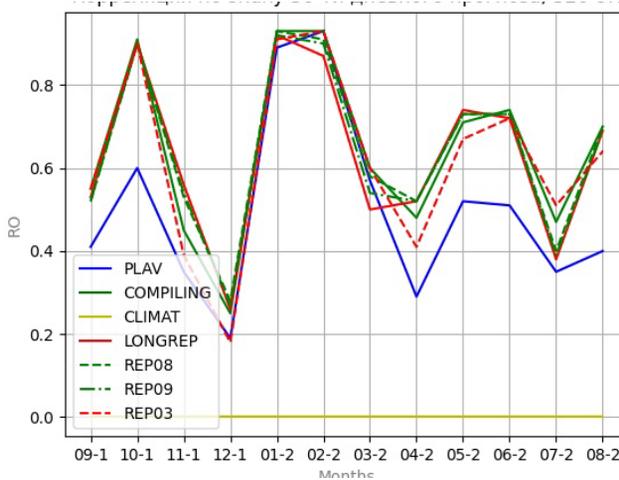


Рис. 8. Временной ход коэффициента корреляции среднемесячных 30-суточных прогнозов аномалий приземной температуры воздуха: комплексированный, ПЛАВ и пять вариантов комплексации за 12 месяцев 2021-2022 гг.

Fig. 8. Temporal variability of the correlation coefficients of the monthly average 30-day forecasts of surface air temperature anomalies: integrated forecast, SLAV forecast and five versions of the integration for 12 months of 2021-2022.

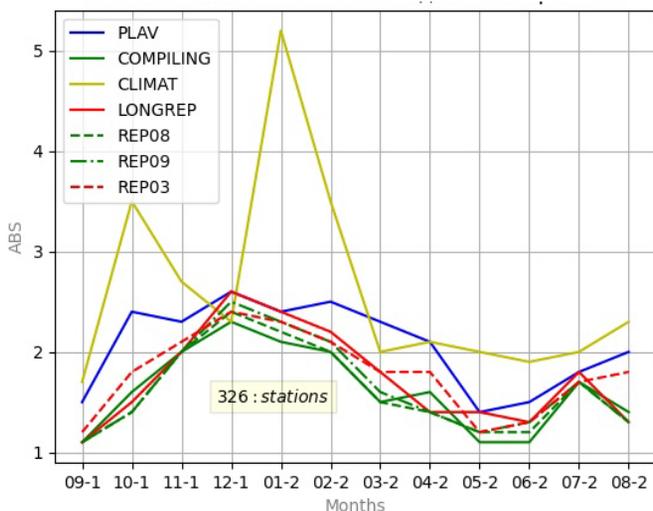


Рис. 9. Временной ход абсолютного отклонения среднемесячных 30-суточных прогнозов аномалий приземной температуры воздуха: комплексированный прогноз, ПЛАВ и пять вариантов комплексации за 12 месяцев 2021-2022 гг.

Fig. 9. Temporal variability of the absolute deviation of the monthly average 30-day forecasts of surface air temperature anomalies: integrated forecast, SLAV forecast and five versions of the integration for 12 months of 2021-2022.

На рис. 7 и 9 выделяется большие значения оценок RMS и ABS в климатических прогнозах, поэтому было решено проанализировать синоптические условия января 2022 года (рис. 10).

Как видно на рис. 10, в январе 2022 г. большую область России занимают положительные аномалии приземной температуры воздуха, достигающие до 6° . Такая аномалия связана с тем, что на протяжении всего января в умеренных широтах Атлантического океана находились мощные среднетропосферные антициклоны, блокируя смещение циклонов на восток и вынуждая их смещаться южнее или севернее своих стандартных траекторий.

Особенно глубокой оказалась ложбина, связанная с околполярным циклоном над ЕТР. В первых двух декадах смещающиеся по северу Атлантики, на Скандинавию и далее на ЕТР и на север Урала циклоны сформировали самостоятельный циклон с центром над Новой Землей. Дальнейшее смещение циклонов на восток блокировали мощные антициклоны над Сибирью. Такие атмосферные процессы приводят к существенному повышению приземной температуры.

Рисунки со среднемесячными оценками показывают преимущества прогноза 30-суточных аномалий приземной температуры воздуха с включением данных статистической модели РЭП-15, а вариант построения с равновесными коэффициентами влияния в большинстве месяцев

сопоставим или превосходит другие варианты. Во временном ходе оценок наглядно видно годовое влияние: в холодное время года качество прогнозов ниже, что связано, как правило, с резким изменением свойств подстилающей поверхности, а также более высокой (по сравнению с летним сезоном) изменчивостью метеорологических элементов.

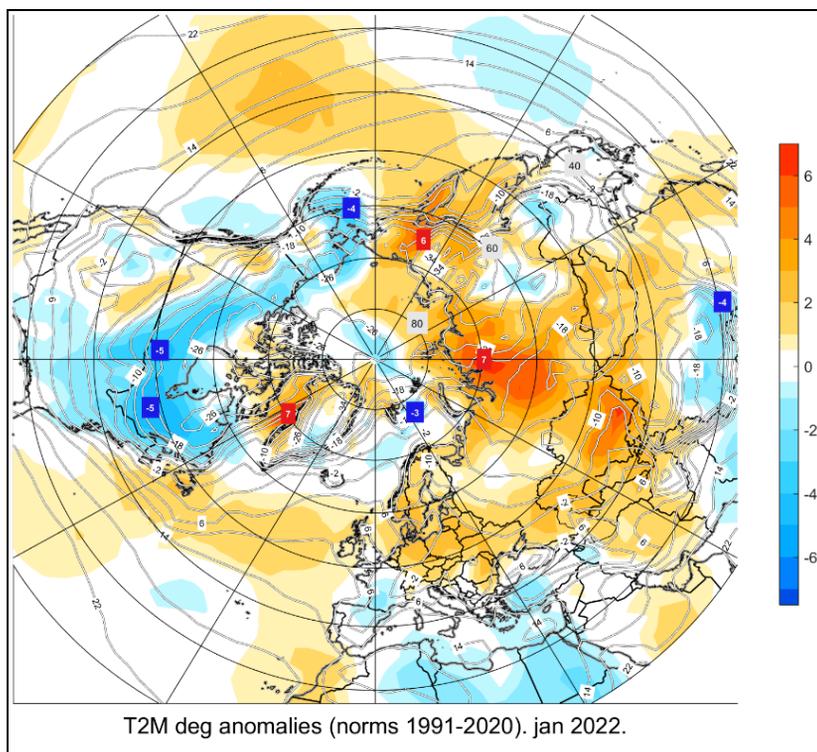


Рис. 10. Средние за январь 2022 года глобальные аномалии приземной температуры воздуха.

Fig 10. Distribution of monthly surface air temperature anomalies for January 2022.

В табл. 2 приведены среднегодовые (51 случай) статистические оценки успешности прогнозов с использованием норм с 1961 по 1991 год.

Таким образом, реализованный метод расчета субсезонного прогноза аномалий приземной температуры воздуха на временном интервале 30 дней на базе гидродинамико-статистического подхода является перспективным. Продолжение работы с динамико-статистическим методом коррекции прогностических аномалий связано с изменением временного интервала для привязки прогноза к календарному месяцу, что позволит провести сравнение с официальными ежемесячными прогнозами ФГБУ «Гидрометцентр России».

Таблица 2. Среднегодовые статистические характеристики с использованием норм с 1961 по 1991 г. (51 случай)

Table 2. Average annual statistical characteristics with base period from 1961 to 1991 (51 cases)

Варианты построения прогноза	RMSE	RO	ABS
ПЛАВ 1-15	2.7	0.49	2.2
ПЛАВ 16-30	3.3	0.34	2.7
ПЛАВ 1-30	2.5	0.49	2.1
РЭП-15 (оригинальный)	1.7	0.71	1.4
(РЭП –15) & (ПЛАВ16-30) k1=1, k2=0.	2.2	0.62	1.7
(РЭП-15) & (ПЛАВ16-30) k1=0.5, k2=0.5	2.0	0.63	1.6
Климат-30	3.0	0.00	2.6
Климат-15	3.5	0.00	2.9
k1=0.8, k2=0.2	2.0	0.63	1.6
k1=0.9, k2=0.1	2.1	0.62	1.7
k1=0.3, k2=0.7	2.2	0.60	1.8

Авторы работы выражают благодарность П.П. Васильеву и К.А. Сумеровой за помощь в подготовке статьи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение №075-15-2021-577 с ИФА им. А.М. Обухова РАН).

Список литературы

1. Вильфанд Р.М., Васильев П.П., Васильева Е.Л. Развитие методов прогноза погоды на основе статистической интерпретации гидродинамических моделей по технологии Гидрометцентра // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада, лтд, 2010. 36 с.
2. Витар Ф., Браунт Э. Субсезонное-сезонное прогнозирование (ССП): на пути к бесшовному прогнозированию ВМО // Бюллетень. ВМО в XXI веке. 2019. Том 68 (1). С. 70-74.
3. Козельцева В.Ф., Педь Д.А., Садоков В.П. О составлении прогноза аномалии температуры воздуха на месяц с нулевой заблаговременностью // Труды Гидрометцентра СССР. 1991. Вып. 311. С. 1-14.
4. Муравьев А.В., Казначеева В.Д., Круглова Е.Н., Куликова И.А. Долгосрочное прогнозирование аномальных синоптических ситуаций. I. Основные конструктивные и технические характеристики динамико-статистической схемы долгосрочного прогноза погоды // Метеорология и гидрология. 1999. № 3. С. 28-36.
5. Муравьев А.В., Казначеева В.Д., Круглова Е.Н., Куликова И.А. Долгосрочное прогнозирование аномальных синоптических ситуаций. II. Условия эксперимента и результаты прогноза // Метеорология и гидрология. 1999. № 4. С. 5-15.

6. *Mirvis V.M., Meleshko V.P.* Современное состояние и перспективы развития метеорологических прогнозов на месяц и сезон // Труды ГГО. 2008. Вып. 558. С. 3-40.

7. *Mirvis V.M., Meleshko V.P., Gavrilina V.M., Matyugin V.A., Lybova T.Yu.* Прогноз метеорологических величин на предстоящий месяц гидродинамико-статистическим методом ГГО. I. Категорические прогнозы – результаты 26-летних серий испытаний // Метеорология и гидрология. 2006. № 2. С. 5-16.

8. *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. М.: Триада, лтд, 2017. 166 с.

9. *Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Травова (Махнорылова) С.В., Гойман Г.С., Мизяк В.Г., Рогутов В.С., Шляева А.В., Юрова А.Ю.* Развитие глобальной полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ в 2009–2019 гг. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 77-91.

10. *Hazeleger W., Wang X., Severij ns C., Stefanescu S., Yang S., Wang X., Wyser K., Dutra E., Baldasano J.M., Bintanja R., Bougeault P., Caballero R., Ekman A.M.L., Christensen J.H., van den Hurk B., Jimenez P., Jones C., Kallberg P., Koenigk T., McGrath R., Miranda P., van Noij e T., Palmer T., Parodi J.A., Schmith T., Selten F., Storelmo T., Sterl A., Tapano H., Vancoppenolle M., Viterbo P., Willen U.* EC-Earth: A seamless Earth system prediction approach in action // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2010. Vol. 91. P. 1357-1363.

11. *Vitart F., Bonet A., Brookshaw A. et. al.* The subseasonal to seasonal (S2S) prediction project database // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2017. Vol. 98, no. 1. P. 163-173.

References

1. *Vil'fand R.M., Vasil'ev P.P., Vasil'eva E.L.* Razvitie metodov prognoza pogody na osnove statisticheskoy interpretacii gidrodinamicheskikh modeley po tekhnologii Gidrometcentra. *80 let Gidrometcentru Rossii*, Moscow, Triada LTD publ., 2010, 36 p. [in Russ.].

2. *Vitart F., Brown A.* S2S Forecasting: Towards Seamless Prediction. *WMO Bulletin*, 2019, Vol 68, no. 1, pp. 70-74.

3. *Kozel'ceva V.F., Ped' D.A., Sadokov V.P.* O sostavlenii prognoza anomalii temperatury vozduha na mesyac s nulevoy zablagovremennost'yu. *Trudy Gidromettsentra SSSR [Proceedings of the Hydrometcentre of the USSR]*, 1991. vol. 311, pp. 1-14. [in Russ.].

4. *Murav'ev A.V., Kaznacheeva V.D., Kругlova E.N., Kulikova I.A.* Dolgosrochnoe prognozirovanie anomal'nyh sinopticheskikh situaciy. I. Osnovnye konstruktivnye i tekhnicheskie harakteristiki dinamiko-statisticheskoy skhemy dolgosrochnogo prognoza pogody. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 1999, no. 3, pp. 28-36 [in Russ.].

5. *Murav'ev A.V., Kaznacheeva V.D., Kругlova E.N., Kulikova I.A.* Dolgosrochnoe prognozirovanie anomal'nyh sinopticheskikh situaciy. II. Usloviya eksperimanta i rezul'taty prognoza. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 1999, no. 4, pp. 5-15 [in Russ.].

6. *Mirvis V. M., Meleshko V. P.* Current status and further development of monthly and seasonal weather prediction. *Trudy GGO [Proceedings of Voeikov Geophysical Observatory]*, 2008, vol. 558, pp. 3-40 [in Russ.].

7. Mirvis V. M., Meleshko V. P., Gavrilina V. M., Matyugin V. A., L'vova T. Yu. Monthly Meteorological Forecasting with the MGO Hydrodynamic-statistical Method. II. Probabilistic Forecast: Analysis and Interpretation of Ensemble Distribution, Methods, and Skill of the Forecasts.

Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.], 2006, no. 2, pp. 5-16 [in Russ.].

8. Tolstykh M.A., Shashkin V.V., Fadeev R.YU., Shlyayeva A.V., Mizyak V.G., Rogutov V.S. Bogoslovskiy N.N., Goyman G.S., Mahnorylova S.V., Yurova A.Yu. Sistema modelirovaniya atmosfery dlya besshovnogo prognoza. Moscow, Triada LTD publ., 2017, 166 p. [in Russ.].

9. Tolstykh M.A., Fadeev R.Yu., Shashkin V.V., Travova (Makhnorylova) S.V., Goyman G.S., Mizyak V.G., Rogutov V.S., Shlyayeva A.V., Yurova A.Yu. Development of SL-AV global semi-Lagrangian atmosphere model in 2009–2019. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2019, vol. 374, no. 4, pp. 77-91 [in Russ.].

10. Hazeleger W., Wang X., Severijns C., Stefanescu S., Yang S., Wang X., Wyser K., Dutra E., Baldasano J.M., Bintanja R., Bougeault P., Caballero R., Ekman A.M.L., Christensen J.H., van den Hurk B., Jimenez P., Jones C., Kallberg P., Koenigk T., McGrath R., Miranda P., van Noije T., Palmer T., Parodi J.A., Schmith T., Selten F., Storelvmo T., Sterl A., Tápamo H., Vancoppenolle M., Viterbo P., Willen U. EC-Earth: A seamless Earth system prediction approach in action. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2010, Vol. 91, pp. 1357-1363.

11. Vitart F., Bonet A., Brookshaw A. et al. The subseasonal to seasonal (S2S) prediction project database. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 2017, Vol. 98, no. 1, pp. 163-173.

Поступила 10.03.2022; одобрена после рецензирования 16.03.2023;
принята в печать 31.03.2023.

Submitted 10.03.2022; approved after reviewing 16.03.2022;
accepted for publication 31.03.2023.