

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2026-3-41-62>

УДК 551.577

Глобальный анализ количества осадков по данным модели атмосферы ПЛАВ10 и данным синоптических наблюдений

Р.Б. Зарипов

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
radomir.zaripov@list.ru*

Представлен анализ глобальных полей 6-часовых осадков. Исходными данными являются прогнозы модели атмосферы ПЛАВ10 с заблаговременностью 0–6 часов (первое приближение) и наблюдения осадков на синоптических станциях. Анализ проводился в три этапа: 1) коррекция среднеширотных смещений; 2) анализ относительных различий наблюдаемых осадков и первого приближения для кластеров наблюдений (объединяются наблюдения в областях размером $\sim 1110 \times 1110$ км); 3) усвоение индивидуальных наблюдений. На каждом этапе первое приближение последовательно уточнялось. Использовалась процедура оптимальной интерполяции, параметры которой подбираются непосредственно в процедуре анализа методом кроссвалидации. Рассмотрено некоторое приближение сумм осадков к нормальному распределению с использованием степенного преобразования. Оценки полей анализа по данным наблюдений и по полям анализа GPCP продемонстрировали успешность методики: на каждом этапе анализа поля осадков уточняются. Планируемое применение анализа – улучшение начальных данных для счета ПЛАВ, уточнение запаса продуктивной влаги в почве.

Ключевые слова: глобальный анализ количества осадков, оптимальная интерполяция, модель атмосферы ПЛАВ

Global analysis of precipitation based on SL-AV10 atmospheric model data and synoptic observations

R.B. Zaripov

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,
Moscow, Russia
radomir.zaripov@list.ru*

A procedure for analyzing global 6-hour precipitation fields is described. The input data are 0–6-hour lead-time forecasts of the SL-AV10 atmosphere model (serving as the first guess) and precipitation observations from weather stations. The analysis includes three stages, with the first guess being successively refined at each step: 1) mid-latitude biases are corrected; 2) relative differences between observed precipitation and the first guess are analyzed for observation clusters (observations within $\sim 1110 \times 1110$ km domains are aggregated); 3) individual observations are assimilated. The optimal interpolation procedure is used, with parameters selected directly in the process of analysis. Precipitation is processed in order to get distribution closer to normal using a power transformation. A verification

of the analysis results against observational data and the GPCP and ERA5 analysis fields demonstrates the success of the developed methodology: the precipitation fields are refined at each stage of analysis. The planned application of the analysis is to improve the initial dataset for SL-AV forecasts and to refine the estimate of available soil moisture.

Keywords: global analysis of precipitation, optimal interpolation, SL-AV global atmosphere model

Введение

Для многих задач гидрологического и агрометеорологического обслуживания населения и экономики (анализ влагозапаса снега и запаса продуктивной влаги в почве, анализ и прогноз речного стока [3, 33, 38]) важен точный анализ количества выпавших осадков. Согласно отчету ВМО [48], с экстремальными осадками в течение 1970–2019 гг. связано более 22 % смертей, связанных с погодой, и 57 % вызванного погодой экономического ущерба. Также анализ осадков позволяет уточнить ряд характеристик подстилающей поверхности, полезных для среднесрочного и субсезонного прогноза [46, 47] – влажность почвы и состояние растительности, влагозапас и альбедо снежного покрова. Сведения об осадках позволяют более точно определить условия вымывания из атмосферы различных примесей [16, 41], оценить степень пожарной опасности [5, 6], рассчитать эмиссию пыльцы различных растений (проводится для предупреждения страдающих аллергией) [41].

В Гидрометцентре России доступны осадкомерные наблюдения на синоптических станциях, как текущие (см. рис. 1), так и архивные, за последние десятилетия. В рамках подготовки начальных данных для счета трех версий глобальной модели атмосферы ПЛАВ (ПЛАВ0.9×0.72, ПЛАВ20 и ПЛАВ10 [20–22]) проводится счет этих версий 6-часовыми циклами «анализ-прогноз» [25, 37]. На шаге «анализ» (в сроки 00, 06, 12 и 18 ч ВСВ) проводится коррекция модели по данным оперативного анализа Гидрометцентра России [26, 27] (ПЛАВ09×0.72, ПЛАВ10), данным реанализа ERA5 [34] (ПЛАВ0.9×0.72) или собственной процедуры анализа ансамбля состояний модели [14] (ПЛАВ20 используется для среднесрочного ансамблевого прогноза), проводится собственный анализ состояния поверхностных полей [4]. На шаге «прогноз» рассчитывается прогноз ПЛАВ на 6 часов (ПЛАВ20 – ансамблевый [13]). Таким образом, в Гидрометцентре России имеются все необходимые условия для анализа количества осадков.

В последние десятилетия активно развиваются методы дистанционных наблюдений за осадками [12, 35, 40]. Но оперативное поступление дистанционных наблюдений осадков в Гидрометцентр России в достаточном количестве может быть затруднено, кроме того, дистанционные наблюдения доступны не для всего периода, для которого требуется подготовка начальных данных для субсезонных прогнозов, а с конца 20 века и до настоящего времени. Для указанного продолжительного периода анализ

должен быть подготовлен по методике, максимально близкой к использованию при анализе текущих данных, чтобы избежать влияния изменений методики на прогностические аномалии.

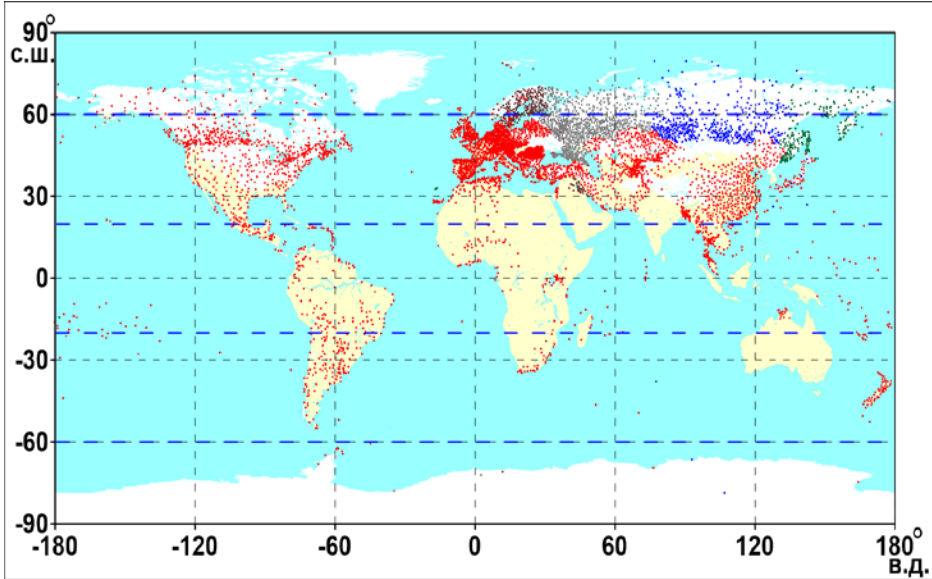


Рис. 1. Наблюдения за выпадающими осадками на синоптических станциях: красным цветом показаны станции, обеспеченные 3 или 6-часовыми наблюдениями (00, 06, 12, 18 ч ВСВ), другими цветами – 12-часовые наблюдения для разных сроков (главным образом территория России, см. текст). Белым цветом на обоих рисунках показано распространение снега для данной даты. Синим пунктиром – границы широтных кругов, используемых при расчетах смещений и выборе параметров усвоения.

Fig. 1. Precipitation observations at synoptic stations: red shows stations with 3- or 6-hour observations (00, 06, 12, 18 UTC), other colors show 12-hour observations for different times (mostly over the territory of Russia, see text). White color on both figures shows snow cover extent for the given date. Blue dashed lines show the boundaries of latitude zones used in calculating displacements and selecting assimilation parameters.

Поэтому на данном этапе работ рассматривается глобальный анализ осадков только с использованием осадкомерных наблюдений на синоптических станциях. В дальнейшем этот анализ должен стать первым приближением при усвоении дистанционных наблюдений осадков, в том числе радиолокационных («последовательное усвоение» [25]). Разработка процедуры анализа рассматривается на примере модели ПЛАВ10 с шагом расчетной сетки около 10 км, поскольку данная версия модели характеризуется наиболее точными и детальными краткосрочными прогнозами.

Рассчитанные поля осадков позволяют уточнить параметры подстилающей поверхности при подготовке начальных условий для численного прогноза [23], точнее задать поток входной влаги при рассмотрении динамики

влажностного запаса почвы [42], в том числе при оценке запасов продуктивной влаги в почве [11] при разработке методики вероятностного прогноза аномалий влажностного запаса

Методика усвоения осадкомерных наблюдений

Начальные наборы полей для счета ПЛАВ подготавливаются для сроков 00, 06, 12 и 18 ч ВСВ. Анализ количества осадков проводится для 6-часовых периодов между этими сроками. Но для территории России и части Европы (см. рис. 1) доступны осадки только за 12-часовые периоды. Так, для Европейской территории России доступны осадки для периодов 09–21 и 21–09 ч ВСВ (серый цвет на рис. 1), для большей части Сибири – 00–12 и 12–00 ч ВСВ (синий цвет), Дальнего Востока – 03–15 и 15–03 ч ВСВ (зеленый цвет), Скандинавского полуострова – 06–18 и 18–06 ч ВСВ (коричневый цвет).

При выделении 6-часовых сумм из 12-часовых используются данные модели ПЛАВ10. Для этого в ячейке модельной сетки, в которой расположен пункт наблюдения, выбираются рассчитанные осадки для нескольких последовательных 3-часовых периодов (возможно, полученные при счете модели от разных начальных сроков). Затем наблюдавшиеся 12-часовые осадки делятся на 4 части – пропорционально осадкам ПЛАВ10 для этих 3-часовых периодов (если осадки есть) или на равные части (если согласно расчетам осадков нет). Затем из 3-часовых сумм «собираются» осадки для нужного 6-часового периода. Полученные таким образом 6-часовые суммы могут содержать дополнительные погрешности, связанные с неточностями прогнозов ПЛАВ10. Поэтому восстановленные 6-часовые осадки (если получены не из нулевой 12-часовой суммы) в процедуре усвоения помечены специальным флагом как менее точные, хотя в описываемых далее экспериментах понижение точности не учитывается. Еще одна проблема данного преобразования – 12-часовые суммы осадков поступают в конце периода наблюдения и могут прийти слишком поздно для учета в оперативном анализе.

В 2024–2026 гг. в рамках работы с моделью ПЛАВ10 были подготовлены и протестированы несколько методик уточнения полей осадков по данным осадкомерных наблюдений. Рассматривался как метод последовательных коррекций [30, 31, 37, 49], так и оптимальная интерполяция (далее ОИ, [7, 9, 31, 37]) с разным выбором радиусов влияния и способов преобразования анализируемой переменной. Проверялась целесообразность статистической коррекции прогнозов ПЛАВ по оценкам накопленных прогнозов (рассматривались периоды 20 и 30 суток, предшествующих сроку анализа). Лучшие результаты показала основанная на ОИ схема трехэтапной коррекции, рассматриваемая далее.

При анализе состояния атмосферы метод ОИ справедливо считается устаревшим и к настоящему времени вытеснен более сложными методами, позволяющими использовать сложные «операторы наблюдений», разное

время прихода наблюдений, а также предоставляющими возможность дополнительно уточнять ковариационную матрицу ошибок первого приближения [28, 36, 39]. Но применительно к рассматриваемой задаче – анализу 2-мерного поля при использовании интерполяции в качестве «оператора наблюдений» [37], отсутствию рассогласования во времени между сроками наблюдений и анализа – более сложные, чем ОИ, методы анализа не имеют видимых автором преимуществ, по крайней мере «окупающих» возрастающую сложность анализа. Отметим, что процедура ОИ за пределами гидрометеорологии называется «простой кригинг» [9] и близка к современным методам построения карт по нерегулярно распределенным данным.

Кратко рассмотрим процедуру оптимальной интерполяции.

Пусть известно значение некоторого метеорологического элемента (в нашем случае – количество осадков) или же отклонения этого элемента от поля первого приближения в точках с координатами $\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_N$ (станции, числом N). Эти значения обозначим как

$$f_i = f(\vec{r}_i), (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

и пока будем считать абсолютно точными.

Требуется найти значение этого элемента в некоторой точке $\vec{r}_A$. Обычно это какая-либо точка регулярной сетки:

$$f_A = f(\vec{r}_A). \quad (2)$$

Будем искать значение f_A в виде линейной комбинации значений в точках $\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_N$

$$f_A = \sum_{i=1}^N p_i f_i, \quad (3)$$

где p_i – весовые множители (веса), пока не определенные.

Истинное значение рассматриваемой величины в точке анализа обозначим f_{AT} . Это значение неизвестно, но можно потребовать, чтобы математическое ожидание квадрата ошибки выражения (3) (обозначим его E) было бы минимально:

$$E = \overline{(f_{AT} - f_A)^2} = \overline{\left(f_{AT} - \sum_{i=1}^N p_i f_i \right)^2}. \quad (4)$$

Получение значения анализируемой величины, используя (3), с весами, минимизирующими ошибки E (4), и называют оптимальной интерполяцией.

Не будем приводить вывод результирующей формулы (см. [7, 9, 24]), приведем лишь финальную систему уравнений, которую нужно решить:

$$\mu_{Ai} = \sum_{j=1}^N p_i \mu_{ij} . \quad (5)$$

Здесь через μ_{Ai} и μ_{ij} обозначены значения нормированной автокорреляционной функции поля f при заданных координатах пунктов наблюдений и точки анализа. Отметим, что система (5) типична при усвоении разности наблюдений и первого приближения (так называемых «векторов инновации»), в противном случае обычно вводится дополнительное требование $\sum_{i=1}^N p_i = 1$ («обычный кригинг» [9]).

Рассмотрим теперь ситуацию, когда наблюдения содержат неточности, т. е. значение наблюдения в точке i

$$f_i = f_T(\vec{r}_i) + e_i = f_{iT} + e_i , \quad (6)$$

где f_{iT} – истинное значение наблюдаемой величины, а e_i – ошибка наблюдения.

Будем считать, что ошибки наблюдений e_i в различных пунктах не зависят друг от друга, т. е.

$$\overline{e_i} = 0, \quad \overline{e_i e_j} = 0, \text{ если } i \neq j, \quad \overline{e_i e_i} = E_i .$$

Тогда требование минимизации ошибки анализа приводит к необходимости решения системы уравнений, аналогичной системе (5), за исключением добавления к главной диагонали системы дополнительного члена

$$\mu_{Ai} = \sum_{j=1}^N p_j \mu_{ij} + p_i \frac{\overline{e_i^2}}{f_{AT}^2} . \quad (7)$$

Решается (7) как и система (5), с той лишь разницей, что при тех же значениях автокорреляционных функций добавление ошибки наблюдений улучшает обусловленность системы. Отметим, что в величину $\overline{e_i^2}$ вносят вклад не только собственно неточности наблюдений, но и так называемые «ошибки репрезентативности», когда на наблюдаемое значение оказывают влияние процессы, которые не могут быть описаны на рассматриваемой вычислительной сетке. Поэтому, несмотря на имеющиеся оценки точности осадкомерных наблюдений [17], предлагается заменить в системе (7)

$$\overline{e_i^2} / f_{AT}^2 = K_{\text{err}} . \quad (8)$$

Значение K_{err} определяется по результатам расчетов.

Для расчета автокорреляционной функции выбрано достаточно распространенное выражение:

$$\mu_r = \exp\left(-\frac{r^2}{2R^2}\right), \quad (9)$$

где r – расстояние между рассматриваемыми точками; R – параметр (радиус автокорреляции), в данной работе оцениваемый методом кросс-валидации: в точку каждого наблюдения проводится анализ (ОИ) по остальным наблюдениям с различными значениями R (вычислительная экономичность ОИ это позволяет), затем по результатам сравнения результатов анализа и наблюдений выбирается лучшее значение R для каждого широтного диапазона (границы показаны на рис. 1 синими пунктирными линиями). В предварительных экспериментах рассматривалось использование анизотропной автокорреляционной функции с использованием разных радиусов автокорреляции по широте и долготе [1]. Но в этом случае выбор R методом кросс-валидации оказался затруднен.

Автокорреляционная функция (9) определена положительно: определитель систем (5) и (7) отличен от 0, если нет совпадающих точек наблюдений. При этом матрица $\|\mu_{ij}\|$ является симметричной и положительно определенной, ее диагональные элементы >1 для (7) и $=1$ для (5). Подобная система уравнений в данной работе решается разложением Холецкого [18].

В процедуре ОИ алгоритм выбора влияющих станций имеет важное значение для обусловленности системы уравнений типа (7). Особенно это важно в том случае, когда отношение нормы ошибки к норме ожидаемого изменения значения в точке в ходе анализа $\frac{e_i^2}{f_{AT}^2}$ является незначительной. Ранее, когда ОИ являлся основным методом анализа состояния атмосферы в Гидрометцентре России, при формировании систем уравнений ОИ влияющие станции определялись, как ближайшие станции по некоторым выбранным направлениям [2], с использованием «Кулоновского алгоритма» [8] или же использовался бокс-метод [24]. В более ранних работах по анализу влагозапаса снежного покрова для ПЛАВ использовалась триангуляция Делоне [19].

В данной работе выбрано использование бокс-метода как достаточно простого (в особенности по сравнению с триангуляцией Делоне) и вычислительно эффективного. Вся поверхность земного шара разделяется на $\sim$ квадратные в широтно-долготных координатах ячейки (рис. 2). Размер ячеек («боксов») задается в качестве параметра расчета, в текущих экспериментах использовались ячейки размером примерно 1110×1110 км (1110 км – около 10° широты), примерно в 2 раза больше, чем в описанной в монографии [24] системе анализа.

Схема выбора влияющих станций при анализе показана на рис. 2. Сначала определяется, в какой ячейке находится пункт анализа (в рамках выбора радиуса автокорреляции или при окончательном анализе), и

выбираются все наблюдения, попавшие как в данную ячейку, так и в граничащие с ней (показано более густой синей заливкой на рис. 2), как в [24]. Затем, если количество наблюдений в этой области не превышает некоторого порогового значения (сейчас 30), то в область поиска включаются ячейки, граничащие с уже рассматриваемыми (менее густая заливка на рис. 2). Эта процедура может повторяться несколько раз, пока количество рассматриваемых наблюдений не достигнет выбранного порогового значения или расстояние до добавляемых ячеек в несколько раз не превысит R . При проведении анализа «супернаблюдений» (см. ниже), ввиду их относительно небольшого числа (первые сотни), просто выбираются 30 ближайших к точке анализа.

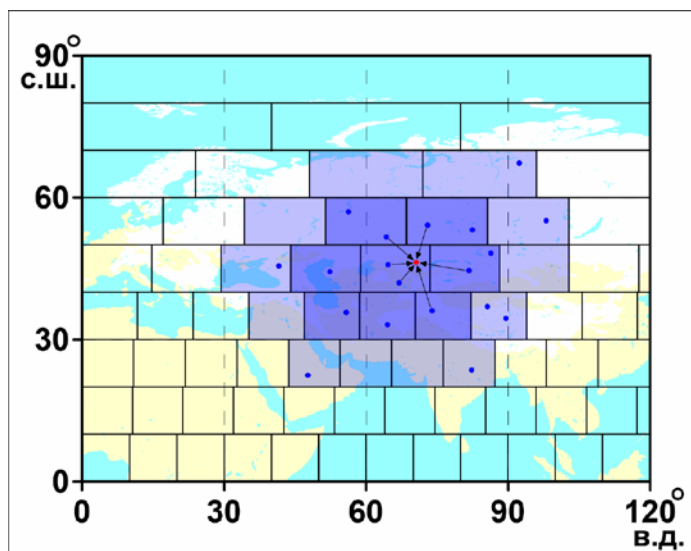


Рис. 2. Схема кластеризации и выбора влияющих станций при анализе.

Fig. 2. Scheme of clustering and selection of stations to use in analysis.

На рис. 1 можно отметить неравномерность распределения осадкомерных наблюдений. Наиболее густо ими покрыта территория Западной Европы, при этом обширные территории (к примеру, на севере России) покрыты наблюдениями гораздо реже. Можно отметить наличие областей (большая часть Австралии и Африки, Тибет, Гренландия), практически не освещенных данными. Распределение наблюдений, показанное на рис. 1, типично для 2025–2026 гг., в 2024 г. поступали наблюдения из Индии и юго-восточной части Австралии, наблюдений в тропической зоне было больше.

Неравномерность распределения наблюдений делает невозможным расчет каких-либо средних по пространству величин непосредственно по данным наблюдений, так как области с более частой наблюдательной

сетью будут вносить больший вклад. Поэтому в соответствии с [9] применяется кластеризация наблюдений: если в ячейке выделенных для поиска влияющих станций имелось ≥ 10 наблюдений (параметр, выбранный по результатам экспериментов), то по пунктам этих наблюдений рассчитывались средние наблюдавшиеся и рассчитанные осадки. Далее подобные комбинации наблюдений будем называть «супернаблюдениями», координаты супернаблюдений рассчитываются осреднением координат станций, которые их формируют. При расчете средних по пространству величин учитывается немного различающаяся площадь ячеек.

Собственно анализ проводится в 3 этапа.

I. На земном шаре выделяются широтные диапазоны, в которых по супернаблюдениям рассчитываются средние смещения. Число и границы подобных диапазонов могут меняться: сейчас используется пять с границами по широтам: -60° , -20° , 20° , 60° (см. рис. 1).

Для тех широтных диапазонов, в которых количество супернаблюдений больше некоторого порогового значения (сейчас ≥ 5 , обычно выполнено для всех широтных диапазонов, кроме $\leq -60^\circ$), находится отношение наблюдавшихся осадков к первому приближению (по супер-наблюдениям). Затем эта величина интерполируется по широте, и на нее домножается первое приближение поля осадков.

II. После коррекции среднеширотных смещений пересчитывается первое приближение для супернаблюдений, рассчитывается отношение наблюдавшихся осадков к уточненному первому приближению (ограничивается диапазоном $[-3, 3]$), находится логарифм этого отношения. Для всех супернаблюдений проводится кросс-валидация, и для каждого широтного диапазона находится оптимальный радиус R_S , который используется для анализа логарифма отношения измеренных и наблюдавшихся осадков в ячейки (см. рис. 2), где наблюдений было недостаточно (< 10). Затем по полученному полю поправок (в относительных величинах) ранее откорректированное поле первого приближения осадков корректируется еще раз. Оптимальное значение $K_{\text{эт}}^S = 0.2$ для анализа супернаблюдений было определено в ходе расчетов для четырех сроков 15 числа каждого месяца 2025 года.

III. Методом кросс-валидации выбираются оптимальные радиусы автокорреляции для анализа отдельных наблюдений для каждого широтного диапазона, затем проводится анализ в узлы модельной сетки. Но были проведены эксперименты с преобразованием переменной: ОИ дает оптимальную в смысле минимума математического ожидания квадрата ошибки и в том случае, если распределение наблюдаемых величин не является нормальным [16]. Однако в случае осадков, распределение которых далеко от нормального [16, 29], минимум математического ожидания квадрата ошибки может не приводить к хорошему анализу [9]. Естественным выглядит преобразование анализируемой переменной таким образом, чтобы приблизить ее распределение к нормальному. В ряде работ по усвоению

осадков использовалось степенное преобразование (рассматривалось количество осадков в степени <1 [16]) или же логарифм осадков (обычно с добавлением небольшой константы, чтобы избежать расчета логарифма от 0). В данной работе был рассмотрен более общий подход Бокса – Кокса [44] – преобразование с использованием параметра λ :

$$Y = \begin{cases} (x^\lambda - 1)/\lambda; & \lambda \neq 0; \\ \ln(x + \varepsilon); & \lambda = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Здесь x – исходное значение (≥ 0); Y – преобразованное; λ – параметр преобразования; ε – небольшое (по сравнению с типичными значениями x) число, чтобы избежать $\ln(0)$ при $x=0$.

По данным 2025 г. (рассматривались наблюдения осадков и первое приближение в пунктах наблюдений согласно расчетам ПЛАВ10) были проверены различные параметры λ от 0 до 1 с шагом 0.1, степень близости к нормальному закону оценивалась по критерию Колмогорова – Смирнова с поправкой Лиллиефорса [43]. Оказалось, что как само распределение осадков, так и разности наблюдаемых величин и первого приближения после преобразования наиболее близки к нормальному закону при $\lambda=0.2$. Однако простое преобразование анализируемой величины с последующим анализом методом ОИ и обратным преобразованием анализа в ряде случаев приводит к серьезным смещениям результирующего поля [9]. Применение процедуры, подобной описанной в работах [9, 32] для коррекции подобного смещения, оказалось затруднительным, так как даже после преобразования распределение осадков было достаточно далеко от нормального закона, что затрудняло коррекцию смещений при обратном преобразовании.

Поэтому для четырех сроков 15 числа каждого месяца 2025 г. была проведена оценка анализа методом кросс-валидации с различными значениями λ и различными задаваемыми отношениями $K_{\text{гг}}$. Оказалось, что наилучшие результаты обеспечивает $\lambda=0.9$ (при использовании меньших значений анализ количества осадков был смещен в сторону уменьшения), и задаваемая относительная ошибка наблюдения $K_{\text{гг}} = 0.5$.

Была проведена оценка использования в качестве первого приближения осадков ПЛАВ10 на период 6–12 часов (чтобы снизить влияние несогласованности начальных полей), но результаты оказались хуже, чем при использовании прогнозов на период 0–6 часов.

После подготовки анализа общих сумм 6-часовых осадков проводится их разделение по фазам и по 3-часовым периодам пропорционально распределению осадков в прогнозах ПЛАВ10, используемых в качестве первого приближения. Если в результате процедуры анализа осадки появляются в узлах модельной сетки, где согласно первому приближению их не было – 3-часовые суммы получаются делением 6-часовых сумм пополам,

разделение по фазам (что требуется для анализа снежного покрова) проводится в зависимости от температуры на высоте 2 метра.

Ввиду используемого при разработке ПЛАВ «многомасштабного» или «бесшовного» подхода [22, 45], состоящего в том, что модель в рамках единого кода способна проводить счет с различным пространственным и временным разрешением, воспроизводя атмосферные явления различного масштаба, разные версии модели имеют похожие форматы начальных данных и прогностической продукции. Поэтому подготовленная технология без существенных модификаций способна использоваться при работе со всеми современными версиями ПЛАВ.

Рассмотрение результатов усвоения

Для рассмотрения результатов анализа был выбран период с 00 ч ВСВ 1 января 2025 г. по 00 ч ВСВ 1 января 2026 г. Выбор периода определялся доступностью данных анализа GPCP [35] на момент подготовки статьи – на сайте <https://www.ncei.noaa.gov/products/global-precipitation-climatology-project> анализ осадков выкладывается с задержкой на несколько месяцев. Данные GPCP доступны для 24-часовых периодов на сетке $1 \times 1^\circ$. Также рассматривались 6-часовые суммы осадков по данным реанализа ERA5 [34], доступные с горизонтальным разрешением $0.25 \times 0.25^\circ$. Эти две версии анализа существенно различались, для использования в качестве основного внешнего анализа для оценки был выбран GPCP (несмотря на меньшее пространственное и временное разрешение) ввиду его большего согласования с осадкомерными наблюдениями (которые и усваивались в данной работе). При подготовке GPCP усваиваются данные с микроволновых приборов низкоорбитальных спутников, данные в инфракрасном диапазоне с геостационарных спутников, данные радиозондирования и поверхностные осадкомерные наблюдения, проводится взаимная калибровка различных сенсоров, в том числе калибровка спутниковой информации по осадкомерным наблюдениям.

Далее приводятся оценки для пяти регионов (см. рис. 1): умеренные широты Южного ($20-60^\circ$ ю. ш.) и Северного полушарий ($20-60^\circ$ с. ш.), тропики (20° ю. ш. – 20° с. ш.), Арктика ($>60^\circ$ с. ш.) и весь земной шар. Приводятся оценки для пяти полей: 1) первое приближение; 2) результат коррекции среднеширотных смещений; 3) результат коррекции по супернаблюдениям; 4) коррекция по наблюдениям; 5) реанализ ERA5 (для сравнения). Информация о пяти оцениваемых полях в ячейках табл. 1–3 идет сверху вниз, оценки приводятся для всего 2025 года.

В табл. 1 приводятся оценки 6-часовых осадков по данным осадкомерных наблюдений, при этом оценка для результатов коррекции по наблюдениям для анализа получена методом кросс-валидации (т. е. наблюдения, в пункты которых проводится анализ, сами в анализе не участвуют). В табл. 2 и 3 приводятся оценки 24-часовых осадков относительно данных GPCP.

Таблица 1. Оценка по данным наблюдений различных этапов уточнения первого приближения при анализе: 6-часовые суммы осадков с 00 ч ВСВ 1 января 2025 г. по 00 ч ВСВ 1 января 2026 г.

Table 1. Verification scores on observational data of the successive stages of refining the first guess by analysis procedure: 6-hour precipitation sums from 00 UTC January 1, 2025 till 00 UTC January 2026

Средние осадки, мм/6 ч	Отн. смещ.	MAE, мм/6 ч	HSS/ETS превышения значения, мм/6 ч			
			≥0.1	≥1	≥3	≥5
Умеренные широты Южного полушария						
0.65	1.08	0.72	0.462/0.301	0.446/0.287	0.462/0.300	0.454/0.294
	1.02	0.68	0.468/0.306	0.463/0.301	0.475/0.312	0.455/0.294
	0.96	0.64	0.479/0.315	0.497/0.331	0.504/0.337	0.476/0.312
	0.99	0.57	0.513/0.345	0.552/0.382	0.570/0.399	0.552/0.381
	1.09	0.67	0.181/0.100	0.550/0.379	0.507/0.399	0.460/0.299
Тропики						
1.55	0.91	1.95	0.290/0.169	0.286/0.167	0.296/0.174	0.264/0.152
	0.92	1.95	0.292/0.171	0.293/0.171	0.300/0.177	0.271/0.157
	0.87	1.85	0.301/0.177	0.323/0.193	0.337/0.203	0.299/0.176
	0.99	1.74	0.346/0.209	0.375/0.231	0.386/0.240	0.354/0.215
	0.90	1.90	0.290/0.170	0.416/0.262	0.348/0.210	0.289/0.169
Умеренные широты Северного полушария						
0.52	1.28	0.59	0.487/0.322	0.476/0.312	0.468/0.305	0.450/0.291
	1.00	0.52	0.501/0.334	0.499/0.333	0.478/0.314	0.430/0.274
	0.91	0.48	0.519/0.351	0.537/0.367	0.498/0.332	0.439/0.281
	0.97	0.42	0.577/0.405	0.609/0.438	0.589/0.417	0.551/0.380
	1.14	0.54	0.289/0.169	0.545/0.374	0.494/0.328	0.447/0.287
Арктика						
0.45	1.56	0.52	0.523/0.354	0.506/0.338	0.458/0.297	0.430/0.274
	1.05	0.40	0.548/0.378	0.549/0.378	0.479/0.315	0.417/0.263
	0.95	0.37	0.566/0.395	0.575/0.403	0.488/0.322	0.421/0.267
	0.97	0.32	0.608/0.437	0.637/0.468	0.576/0.405	0.529/0.359
	1.31	0.47	0.529/0.360	0.529/0.360	0.462/0.300	0.414/0.261
Земной шар						
0.60	1.21	0.70	0.473/0.310	0.455/0.295	0.442/0.284	0.419/0.265
	0.99	0.63	0.486/0.321	0.476/0.312	0.449/0.290	0.402/0.251
	0.91	0.59	0.502/0.335	0.510/0.342	0.472/0.309	0.415/0.262
	0.95	0.53	0.555/0.384	0.577/0.406	0.553/0.382	0.512/0.344
	1.10	0.65	0.518/0.350	0.529/0.360	0.472/0.309	0.418/0.265

В табл. 2 при оценке используются как области, обеспеченные наблюдениями, так и не обеспеченные (для оценки глобального эффекта анализа). В табл. 3 для оценки используются только те ячейки (размером около 1110×1110 км, использовались при формировании супернаблюдений и поиске влияющих станций), в которых имелось ≥10 наблюдений.

Во всех таблицах приводятся средние значения осадков (по наблюдениям – в табл. 1 и по площади оцениваемой территории – в табл. 2 и 3).

Таблица 2. Оценка по данным анализа GPCP различных этапов уточнения первого приближения при анализе: 24-часовые суммы осадков с 00 ч ВСВ 1 января 2025 г. по 00 ч ВСВ 1 января 2026 г.

Table 2. Verification scores on GPCP analysis data of the successive stages of refining the first guess by analysis procedure: 24-hour precipitation sums from 00 UTC January 1, 2025 till 00 UTC January 2026

Средние осадки, мм/6 ч	Отн. смещ.	MAE, мм/24 ч	HSS/ETS превышение значения, мм/24 ч			
			≥0.1	≥1	≥3	≥5
Умеренные широты Южного полушария						
2.51	1.30	2.81	0.215/0.120	0.291/0.170	0.370/0.227	0.398/0.248
	1.25	2.77	0.220/0.124	0.300/0.176	0.372/0.229	0.393/0.244
	1.24	2.76	0.221/0.124	0.302/0.178	0.373/0.229	0.393/0.244
	1.24	2.76	0.221/0.124	0.304/0.179	0.375/0.231	0.394/0.246
	1.07	3.24	0.181/0.100	0.234/0.133	0.285/0.166	0.224/0.126
Тропики						
3.52	1.22	3.49	0.250/0.143	0.338/0.203	0.417/0.263	0.443/0.285
	1.25	3.55	0.252/0.144	0.341/0.206	0.418/0.264	0.441/0.283
	1.22	3.53	0.254/0.145	0.346/0.209	0.422/0.267	0.441/0.283
	1.22	3.52	0.255/0.146	0.350/0.212	0.427/0.272	0.448/0.288
	1.06	3.61	0.290/0.170	0.441/0.283	0.266/0.153	0.267/0.154
Умеренные широты Северного полушария						
2.27	1.34	2.61	0.315/0.187	0.366/0.224	0.404/0.253	0.418/0.264
	1.08	2.30	0.323/0.192	0.376/0.232	0.417/0.263	0.430/0.274
	1.04	2.26	0.330/0.197	0.385/0.238	0.421/0.267	0.428/0.272
	1.05	2.26	0.334/0.200	0.389/0.241	0.425/0.270	0.433/0.276
	1.05	2.89	0.289/0.169	0.319/0.190	0.332/0.199	0.323/0.193
Арктика						
1.41	1.38	1.55	0.354/0.215	0.442/0.284	0.424/0.269	0.387/0.240
	0.92	1.21	0.385/0.239	0.465/0.303	0.431/0.275	0.381/0.236
	0.88	1.20	0.385/0.238	0.462/0.301	0.418/0.265	0.366/0.224
	0.88	1.21	0.383/0.237	0.459/0.298	0.416/0.263	0.369/0.226
	1.08	1.74	0.235/0.133	0.310/0.184	0.292/0.171	0.259/0.149
Земной шар						
2.64	1.28	2.71	0.285/0.166	0.355/0.216	0.414/0.261	0.433/0.277
	1.20	2.62	0.291/0.170	0.363/0.222	0.420/0.266	0.437/0.279
	1.17	2.60	0.294/0.172	0.367/0.225	0.423/0.268	0.436/0.279
	1.18	2.59	0.295/0.173	0.370/0.227	0.426/0.271	0.440/0.282
	1.06	2.95	0.271/0.157	0.347/0.210	0.381/0.236	0.377/0.233

Приводятся относительные смещения – отношение средних осадков по данным анализа или ERA5 к средним по наблюдениям (табл. 1) или средним данным GPCP по площади (табл. 2 и 3). Также приводится средняя абсолютная ошибка (MAE). Высокие значения средней абсолютной ошибки (MAE) относительно средних значений объясняются тем, что значительная часть осадков связана с относительно немногочисленными случаями сильных осадков.

Таблица 3. Оценка по данным анализа GPCP различных этапов уточнения первого приближения при анализе: 24-часовые суммы осадков с 00 ч ВСВ 1 января 2025 г. по 00 ч ВСВ 1 января 2026 г. – только для регионов, обеспеченных осадкомерными наблюдениями

Table 3. Verification scores on GPCP analysis data of the successive stages of refining the first guess by analysis procedure: 24-hour precipitation sums from 00 UTC January 1, 2025 till 00 UTC January 2026 – only for regions with sufficient precipitation observations

Средние осадки, мм/6 ч	Отн. смещ.	MAE, мм/24 ч	HSS/ETS превышения значения, мм/24 ч			
			≥0.1	≥1	≥3	≥5
Умеренные широты Южного полушария						
2.31	1.19	2.71	0.276/0.160	0.332/0.199	0.382/0.236	0.401/0.251
	1.12	2.65	0.282/0.164	0.343/0.207	0.390/0.242	0.404/0.253
	1.10	2.61	0.287/0.167	0.354/0.215	0.399/0.249	0.409/0.257
	1.11	2.58	0.292/0.171	0.365/0.223	0.407/0.256	0.418/0.265
	1.01	3.00	0.261/0.150	0.289/0.169	0.315/0.187	0.314/0.186
Тропики						
5.24	1.06	4.41	0.309/0.183	0.394/0.245	0.457/0.296	0.477/0.313
	1.08	4.42	0.315/0.187	0.407/0.256	0.473/0.310	0.491/0.326
	1.03	4.29	0.329/0.197	0.440/0.282	0.504/0.337	0.509/0.341
	1.06	4.25	0.341/0.205	0.464/0.302	0.524/0.355	0.524/0.355
	1.04	5.15	0.482/0.318	0.510/0.343	0.508/0.340	0.484/0.319
Умеренные широты Северного полушария						
2.11	1.20	2.31	0.351/0.213	0.414/0.261	0.428/0.272	0.423/0.268
	0.96	2.04	0.362/0.221	0.424/0.269	0.435/0.278	0.428/0.272
	0.89	1.98	0.373/0.229	0.439/0.281	0.442/0.284	0.426/0.271
	0.91	1.98	0.380/0.235	0.447/0.287	0.449/0.289	0.436/0.279
	1.00	2.66	0.327/0.195	0.325/0.194	0.315/0.187	0.304/0.179
Арктика						
1.76	2.21	1.80	0.357/0.218	0.435/0.278	0.416/0.263	0.378/0.233
	1.48	1.46	0.384/0.237	0.449/0.289	0.410/0.258	0.354/0.215
	1.38	1.44	0.382/0.236	0.451/0.291	0.403/0.252	0.339/0.204
	1.40	1.45	0.381/0.236	0.447/0.288	0.400/0.250	0.346/0.209
	1.03	2.05	0.251/0.143	0.302/0.178	0.288/0.168	0.258/0.148
Земной шар						
2.40	1.18	2.50	0.351/0.213	0.418/0.264	0.441/0.283	0.440/0.282
	0.99	2.27	0.362/0.221	0.428/0.273	0.450/0.290	0.449/0.290
	0.94	2.22	0.371/0.228	0.443/0.284	0.459/0.297	0.450/0.290
	0.96	2.21	0.378/0.233	0.451/0.291	0.465/0.303	0.459/0.298
	1.01	2.91	0.345/0.209	0.360/0.219	0.361/0.221	0.355/0.215

Для превышения осадками некоторых пороговых значений рассчитываются:

1) коэффициент надежности Багрова – Хайдке [10, 15] (HSS, используется для оценки превосходства прогноза относительно «климатической нормы», чувствителен к смещению в числе прогнозируемых явлений

относительно наблюдаемых), $HSS=1$ – абсолютно точный прогноз, 0 – прогноз не лучше случайного, смещением частоты прогноза события можно добиться отрицательных значений HSS . Отметим, что относительно высокие значения часто используемого критерия оценки Пирси – Обухова можно получить путем существенного завышения частоты редкого явления [10], поэтому в данной работе он не рассматривается.

2) Equitable Threat Score (ETS), дающий взвешенную оценку (с некоторыми оговорками [15]) и в том случае, когда прогнозируемое событие происходит редко (к примеру, сильные осадки), так и когда оно происходит достаточно часто. ETS абсолютно точного прогноза 1, полностью бесполезный прогноз 0.

В табл. 1 приводятся оценки факта расчета осадков ≥ 0.1 , ≥ 1 , ≥ 3 и ≥ 5 мм/6 ч (по наблюдениям), в таб. 2 и 3 – ≥ 0.1 , ≥ 1 , ≥ 3 и ≥ 5 мм/24 ч (данные сглажены при пересчете средних осадков в ячейках $1 \times 1^\circ$).

Отметим, что в целом первое приближение (прогноз ПЛАВ10 на 0–6 ч) существенно завышает количество осадков. На каждом этапе усвоения точность поля осадков повышается (см. табл. 1–3), что свидетельствует об успешности процедуры анализа. Данные ERA5 по осадкомерным станциям в целом соизмеримы по качеству с анализом после второй стадии анализа (учет супернаблюдений), но уступают анализу с использованием индивидуальных станций, реанализ ERA5 также характеризуется некоторым завышением осадков, но в меньшей степени, чем первое приближение ПЛАВ10.

Наибольшие затруднения при анализе количества осадков, как для текущей технологии, так и для ERA5 в тропической зоне (Антарктика ввиду малого количества осадкомерных наблюдений не рассматривается).

Данные ERA5 заметно отличаются от данных GPCP. При этом в районах, обеспеченных данными осадкомерными наблюдениями, это различие меньше (сравнение табл. 2 и 3).

Отметим, что годовой ход оптимальных радиусов автокорреляции R (преобразование (9)) оказался не выражен. В различных регионах R , по-видимому, определялся густотой наблюдательной сети. В 2025 г. средний R для тропической зоны, умеренных широт Северного полушария и Арктики составлял около 105, 65 и 80 км соответственно. Сам автор ожидал, что в умеренных широтах в теплый сезон при увеличении доли конвективных осадков R будет уменьшаться.

Выводы

Подготовлена процедура уточнения 6-часовых сумм осадков ПЛАВ по данным осадкомерных наблюдений с использованием метода ОИ с выбором влияющих станций по ячейкам («боксам»).

Для получения положительного результата, помимо собственно формирования и решения систем уравнений ОИ, потребовалось применить формирование супернаблюдений, коррекцию среднеширотных смещений

по супернаблюдениям, отдельные анализы супернаблюдений и индивидуальных наблюдений. При этом супернаблюдения усваивались как логарифм отношения наблюдавшихся осадков к первому приближению (уточненному), при усвоении индивидуальных наблюдений использовалось преобразование $Y = x^{0.9}$ как частный случай преобразования Бокса – Кокса. Использование степеней <0.9 (преобразование (10)) приводило к большему приближению преобразованного распределения к нормальному, с максимальным приближением согласно критерию Колмогорова – Смирнова с поправкой Лиллиефорса при $\lambda=0.2$. Но при этом процедура преобразования, анализа и обратного преобразования приводила к смещениям полученного поля осадков. При расчетах проводилось определение радиусов автокорреляции для индивидуальных наблюдений и супернаблюдений методом кросс-валидации. Оценка отношения ошибки наблюдений к изменчивости анализируемого поля была рассчитана по данным за выбранные дни (0.2 для супернаблюдений и 0.5 для индивидуальных наблюдений).

Результаты тестирования с использованием первого приближения ПЛАВ10 показали успешность предлагаемой процедуры – качество полей осадков последовательно улучшается с каждым ее этапом. Это показывают как оценки по наблюдениям (кросс-валидация), так и сравнение с анализом GPCP. Разработанная процедура анализа позволит уточнить параметры подстилающей поверхности при подготовке начальных условий для численного прогноза, улучшить оценку запаса продуктивной влаги в почве для применения в разрабатываемой методике вероятностного субсезонного прогноза аномалий влагозапаса.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда №25-17-00314, <https://rscf.ru/project/25-17-00314>.

Список литературы

1. Алдухов О.А., Гордин В.А. Оценки анизотропной корреляционной структуры полей метеорологических величин по наблюдениям глобальной аэрологической сети // Известия российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41, № 3. С. 399-409.
2. Багров А.Н., Гордин В.А., Цырульников М.Д. Оперативная схема объективного анализа в тропосфере и стратосфере // Метеорология и гидрология. 1990. № 8. С. 37-45.
3. Блинов Д.В., Борщ С.В., Вильфанд Р.М., Колий В.М., Ривин Г.С., Семенова Н.К., Сибиных Ю.А., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Возможности использования системы COSMO-Ru при краткосрочном прогнозировании стока рек России // Метеорология и гидрология. 2023. № 2. С. 5-14. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-2-5-14
4. 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, № S3. С. 111-116.
5. Вильфанд Р.М., Мищенко С.Л., Васильева Е.Л., Хан В.М., Васильев П.П. Анализ пожарной опасности в лесах России на фоне сложившихся метеорологических условий в теплый сезон 2021 г. // Метеорология и гидрология. 2022. № 7. С. 133-137.
6. Вильфанд Р.М., Мищенко С.Л., Васильева Е.Л., Хан В.М., Васильев П.П. Анализ пожарной опасности в лесах России на фоне сложившихся метеорологических условий в теплый сезон 2023 г. // Метеорология и гидрология. 2024. № 10. С. 139-144.

7. Гандин Л.С. Объективный анализ метеорологических полей. Л.: Гидрометеиздат, 1963. 288 с.
8. Гордин В.А. «Кулоновский» алгоритм выбора влияющих станций // Метеорология и гидрология. 2003. № 12. С. 100-105.
9. Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геоestatистика: Теория и практика. М.: Наука, 2010, 327 с.
10. Зарипов Р.Б., Павлюков Ю.Б., Шумилин А.А., Травов А.В. Использование радиолокационной информации при оценке прогноза погоды с высоким разрешением // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2 (368). С. 60-86.
11. Кланг П.С., Тарасова Л.Л., Черкасова А.В. Особенности пространственно-временной изменчивости влагозапасов в почве в европейской части России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2025. № 4 (398), pp. 60-86. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-4-153-171>
12. Кучма М.О., Андреев М.О., Мальковский С.И. Методы коррекции сумм осадков, полученных по данным с геостационарного спутника HIMAWARI-9 для территории Дальневосточного региона России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2026. № 2 (400). С. 69-87.
13. Мизяк В.Г., Алипова К.А., Толстых М.А., Розутов В.С. Результаты оперативных испытаний глобальной системы ансамблевого среднесрочного прогноза погоды на основе модели ПЛАВ // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2023. Информационный сборник № 50. С. 44-65.
14. Мизяк В.Г., Шляева А.В., Толстых М.А. Учет скоррелированности ошибок спутниковых данных наблюдений AMW в ансамблевой системе усвоения данных // Метеорология и гидрология. 2023. № 3. С. 20-31. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-3-20-31
15. Муравьев А.В., Киктев Д.Б., Смирнов А.В., Павлюков Ю.Б., Серебряник Н.И. Верификация детерминистского и вероятностного наукастинга осадков в теплый и холодный периоды года на Европейской территории России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. № 1 (387). С. 21-66.
16. Рубинштейн К.Г., Цырульников М.Д., Багров А.Н., Алферов Ю.В. Коррекция по данным наблюдений трехмерных прогностических полей осадков для обеспечения моделей переноса примеси в атмосфере // Метеорология и гидрология. 2002. № 10. С. 34-50.
17. Р 52.08.657–2004. Атмосферные осадки. Методика выполнения измерений осадкомером О-1. 32 с.
18. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы: Учебное пособие для вузов. М.: Наука, 1989. 432 с.
19. Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и ее применение. Томск: Изд-во Томского университета, 2002. 128 с.
20. Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Гойман Г.С., Травова С.В., Зарипов Р.Б., Алипова К.А., Розутов В.С., Мизяк В.Г., Багров А.Н., Трубина М.А. Технология среднесрочного прогноза на основе модели ПЛАВ10 с горизонтальным разрешением около 10 км // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2024. Информационный сборник № 51. С. 3-11.
21. 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. № 7. С. 25-39. DOI: 10.52002/0130-2906-2024-7-25-39
22. Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Гойман Г.С., Зарипов Р.Б., Мизяк В.Г., Розутов В.С., Алипова К.А., Бирючева Е.О. Глобальная модель ПЛАВ10 для среднесрочного прогноза погоды // Метеорология и гидрология. 2025. № 6. С. 56-66. DOI: 10.52002/0130-2906-2025-6-56-66
23. 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. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-8-80-100

24. Фролов А.В., Важник А.И., Свиренко П.И., Цветков В.И. Глобальная система усвоения данных наблюдений о состоянии атмосферы. СПб.: Гидрометеониздат, 2000. 187 с.
25. Цырульников М.Д., Багров А.Н., Зарипов Р.Б., Толстых М.А. Развитие глобальной системы усвоения данных с переменным разрешением // Метеорология и гидрология. 2003. № 4. С. 5-24.
26. Цырульников М.Д., Свиренко П.И., Гайфулин Д.Р., Горбунов М.Е., Успенский А.Б. Развитие системы оперативного усвоения данных метеорологических наблюдений в Гидрометцентре // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 112-126.
27. Цырульников М.Д., Гайфулин Д.Р., Свиренко П.И., Сотский А.Е., Гаврилова С.А., Успенский А.Б. Развитие методов и технологий оперативного усвоения данных метеорологических наблюдений в Гидрометцентре России // Метеорология и гидрология. 2024. № 7. С. 108-121. DOI: 10.52002/0130-2906-2024-7-108-121
28. Chambon P., Mahfouf J.-F., Audouin O., Birman C., Fourrie N., Loo C., Martet M., Moli P., Payan C., Pourret V., Raspaud D. Global Observing System Experiments within the Meteo-France 4D-Var data assimilation system // Monthly Weather Review. 2023. Vol. 151. P. 127-143. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-22-0087.1>
29. Cho H.-K., Bowman K.P., North G.R. A comparison of gamma and lognormal distribution for characterizing satellite rain rates from the Tropical Rainfall Measuring Mission. J. Appl. Meteorol. Climatol. 2004. Vol. 43, no. 11. P. 1586-1597. DOI: 10.1175/JAM2165.1
30. Cressman G.P. An operational objective analysis system // Mon. Wea. Rev. 1959. Vol. 87. P. 367-374. DOI: 10.1175/1520-0493(1959)087<0367:AOOAS>2.0.CO;2
31. Daley R. Atmospheric data analysis. Cambridge Atmospheric and Space Science Series, Cambridge University Press, Cambridge, 1991. 472 p.
32. Dowd P.A. Lognormal kriging – the general case // Mathematical Geology. 1982. Vol. 14, no. 5. P. 475-499.
33. Hammoudeh S., Goergen K., Belleflamme A., Giles J.A., Teomel S., Kollet S. Evaluating precipitation products for water resources hydrologic modeling over Germany // Front. Earth Sci. 2025. Vol. 13. DOI: 10.3389/feart.20251548557
34. Hersbach H., Bell, B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S. et. al. The ERA5 global reanalysis // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2020. Vol. 146. P. 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
35. Huffman G.J., Adler R.F., Behrangi A., Bolvin D.T., Nelkin E.J., Gu G., Ehsani M.R. The new version 3.2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly and daily precipitation products // J. Climate. 2023. Vol. 36, no 21. P. 7635-7655. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-23-0123.1>
36. IFS Documentation – Cy50r1/ Part II: Data Assimilation. Operational implementation 12 May 2026. 112 p.
37. Kalnay E. Atmospheric modeling, data assimilation and predictability. Cambridge University Press, 2002. 341 p.
38. Koster R.D., Guo Z., Yang R., Dirmeyer K.M., Puma M.J. On the nature of soil moisture in land surface models // J. Climate. 2009. Vol. 22. P. 4322-4335. DOI: <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2832.1>
39. GFS/GDAS CHANGES SINCE 1991. https://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/STATS/html/model_changes.html
40. Levizzani V., Cattani E. Satellite remote sensing of precipitation and terrestrial water cycle in a changing climate // Remote Sens. 2019. Vol. 11, no. 19. P. 2301. DOI: 10.3390/rs11192301
41. Menut L., Cholakian A., Pennel R., Siour G., Mailler S., Valari M., Lugon L., Meurdesoif Y. The CHIMERE chemistry-transport model v20023r1 // Geoscientific Model Development. 2024. Vol. 17, no. 14, P. 5431-5457. <https://doi.org/10.5194/gmd-17-5431-2024>
42. Ran B., Xing Z., Fang J., Yang Y., He Y., Li X., Liu X., Liu G. Analysis of soil moisture dynamics and its response to rainfall in the Mu Us sandy land // Water. 2025. Vol. 17, no 1. P. 105. <https://doi.org/10.3390/w17010105>

43. Razali N.M., Wah Y.B. Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests // *Journal of Statistical Modeling and Analytics*. 2011. Vol. 2, no 1. P. 21-33.
44. Sakia R.M. The Box-Cox transformation technique: a review // *Journal of the Royal Statistical Society. Series D (The Statistician)*. 1992. Vol. 41, no. 2. P. 169-178. <https://doi.org/10.2307/2348250>
45. Unified Model. <https://www.metoffice.gov.uk/research/approach/modelling-systems/unified-model> (дата обращения 28.11.2024).
46. Vitart, F., Robertson A. and the S2S steering group. Sub-seasonal to seasonal prediction: linking weather and climate. Seamless prediction of the earth system: from minutes to months // WMO-No. 1156. Geneva, Switzerland, 2015. P. 385-405.
47. Vitart F., Bonet A., Brookshaw A., Codorean C., Ferranti L., Fucile E., Fuentes M., Mallas I., Manoussakis M., Mladek R., Najm S., Venuti F., Ardilouze C., Déqué M., MacLachlan C., McLean P., Chen M., Kumar A., Hendon H., Liu G. et al. The subseasonal to seasonal (S2S) prediction project // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2017. Vol. 98, no. 1. P. 163-173. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0017.1>
48. WMO Atlas of mortality and economic losses from weather, climate, and water extremes (1970–2019) // WMO-No. 1267. Geneva, Switzerland, 2021. 90 p. <https://library.wmo.int/records/item/57564-wmo-atlas-of-mortality-and-economic-losses-from-weather-climate-and-water-extremes-1970-2019>.
49. WRF-ARW 4.5 Users Guide documentation. https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrf_users_guide/build/html/index.html

References

1. Aldukhov O.A., Gordin V.A. Estimation of anisotropy of correlation function of meteorological fields from global upper-air observations. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2005, vol. 41, no. 3, pp. 361-370.
2. Bagrov A.N. Gordin V.A., Tsyrlunikov M.D. Operativnaya skhema ob'ektivnogo analiza v troposfere i stratosfere [The operational scheme of objective analysis in the troposphere and stratosphere]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Russ. *Meteorol. Hydrol.*], 1990, no. 8, pp. 37-46 [in Russ].
3. Blinov D.V., Borshch S.V., Vil'fand R.M., Kolii V.M., Rivin G.S., Semenova N.K., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V., Yumina N.M. Possibilities of using the COSMO-Ru system for short-term forecasting of runoff of Russian rivers. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2023, vol. 48, no. 2, pp. 89-96. DOI: 10.3103/s1068373923020012
4. Bogoslovskii N.N., Shlyaeve A.V., Tolstykh M.A. Usvoenie pochvennykh i prizemnykh peremennykh v global'noy polulagranzhevoj modeli prognoza pogody [The assimilation scheme for soil and screen-level variables in the global semi-lagrangian model of weather forecast]. *Vychislitelnye Tekhnologii* [Computational Technologies], 2008, vol. 13, no. S3, pp. 111-116 [in Russ].
5. Vil'fand R.M., Mishchenko S.L., Vasileva E.L., Khan V.M., Vasilev P.P. Analysis of fire danger in Russian forests against a background of weather conditions in the 2021 warm season. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2022, no. 7, pp. 133-137 [in Russ].
6. Vil'fand R.M., Mishchenko S.L., Vasileva E.L., Khan V.M., Vasilev P.P. Analiz pozharnoy opasnosti v lesah Rossii na fone slozhivshihsya meteorologicheskikh usloviy v teplyy sezon 2021 g. [Analysis of forest fire danger in Russia forests against meteorological conditions in the warm season of 2023]. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2024, no. 10, pp. 139-144 [in Russ].
7. Gandin L.S. Objective analysis of meteorological fields. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1963, 287 p. [in Russ].
8. Gordin V.A. Coulomb-type algorithm for a choice of influencing stations. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2004, no. 12, pp. 69-73.
9. Dem'yanov V.V., Savel'eva Ye.A. Geostatistica: teoria i praktika, Moscow, Nauka publ., 2010, 327 p. [in Russ].
10. Zaripov R.B., Pavlyukov Yu.B., Shumilin A.A., Trasov A.V. Ispol'zovanie radiolokacionoj informacii pri ocenke prognoza pogody s vysokim razresheniem [Application of radar infor-

mation for verification of the high-resolution numerical weather prediction]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2018, no. 2 (368), pp. 60-86 [in Russ].

11. Klang P.S., Tarasova L.L., Cherkasova A.V. Osobennosti prostranstvenno-vremennoy izmenchivosti vlagozapasov v pochve v evropejskoj chasti Rossii [Peculiarities of spatiotemporal variability of soil moisture in the European part of Russia]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2025, no. 4 (398), pp. 60-86. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-4-153-171> [in Russ].

12. Kuchma M.O., Andreev A.I., Malkovsky S.I. Metody korrektsii summ osadkov, poluchennyh po dannym s geostacionarnogo sputnika HIMAWARI-9 dlya territorii Dal'nevostochnogo regiona Rossii [Methods for correcting total precipitation retrieved from Himawari-9 geostationary satellite data over the territory of the Russian Far East]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2026, no. 2 (400), pp. 69-87. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2026-2-69-87> [in Russ].

13. Mizyak V.G., Alipova K.A., Tolstykh M.A., Rogutov V.S. Rezul'taty operativnyh ispytaniy global'noj sistemy ansamblevogo srednesrochnogo prognoza pogody na osnove modeli PLAV [Results of operational verification of a global ensemble medium-range weather forecasting system based on the model SL-AV]. *Rezul'taty ispytaniya novyh i usovershenstvovannyh tekhnologij, modelej i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*, 2023, Informacionnyj sbornik no. 50, pp. 44-65 [in Russ].

14. Mizyak V.G., Shlyueva A.V., Tolstykh M.A. Accounting for correlated AMV satellite observation errors in the ensemble data assimilation system. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2023, vol. 48, no. 3, pp. 201-209. DOI: 10.3103/s1068373923030020

15. Muravev A.V., Kiktev D.B., Smirnov A.V., Pavljukov Ju.B., Serebrjannik N.I. Verifikatsiya deterministskogo i veroyatnostnogo naukastinga osadkov v teplyj i holodnyj periody koda na Evropejskoj territorii Rossii [Verification of deterministic and probabilistic radar precipitation nowcasting in warm and cold seasons in the European part of Russia]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2023, no. 1 (387), pp. 6-88. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-1-21-66> [in Russ].

16. Rubinshtein K.G., Tsyrlunikov M.D., Bagrov A.N., Alferov Yu.V. Correction of three-dimensional prognostic precipitation fields using observational data to supply air pollution transport models with meteorological information. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2002, no. 10, pp. 26-38.

17. R 52.08.657–2004. Atmosfernye osadki. Metodika vypolneniya izmerenij osadkomerom O-1. 32 s.

18. Samarskij A.A., Gulin A.V. Chislennyye metody: Uchebnoe posobie dlya vuzov [Numerical methods]. Moscow: Nauka publ., 1989. 432 s. [in Russ].

19. Skvortsov A.V. Triangulyatsiya Delone i ee primenenie [Delaunay triangulation and its applications]. Tomsk, Izd-vo Tomskogo universiteta, 2002. 128 s. [in Russ].

20. Tolstykh M.A., Fadeev R. Yu., Shashkin V.V., Goyman G.S., Travova S.V., Zaripov R.B., Alipova K.A., Rogutov V.S., Mizyak V.G., Bagrov A.N., Trubina M.A. Tekhnologiya srednesrochnogo prognoza na osnove modeli PLAV10 s gorizontaln'ym razresheniem okolo 10 km [Medium-range forecasting technology based on the SL-AV10 model with a horizontal resolution about 10 km]. *Rezul'taty ispytaniya novyh i usovershenstvovannyh tekhnologij, modelej i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*, 2024, Informacionnyj sbornik no. 51, pp. 3-11 [in Russ].

21. Tolstykh M.A., Fadeev R.Yu., Shashkin V.V., Zaripov R.B., Travova S.V., Goyman G.S., Alipova K.A., Mizyak V.G., Tischenko V.A., Kruglova E.N. The SLAV072L96 model for long-range meteorological forecasts. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2024, vol. 49, no. 7, pp. 576-586. DOI: 10.3103/S1068373924070021

22. Tolstykh M.A., Fadeev R.Yu., Shashkin V.V., Goyman G.S., Zaripov R.B., Mizyak V.G., Rogutov V.S., Alipova K.A., Biryucheva E.O. Global SLAV10 Model for Medium-range Weather Prediction. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2025, vol. 50, no. 6, pp. 473-481. DOI: 10.3103/S1068373925060032

23. Travova S.V., Tolstykh M.A. Assimilation of Screen-level Observations for Soil Moisture Analysis in the INM RAS-MSU Multilayer Soil Model Included in the SL-AV Global Atmospheric Modeling System. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2025, vol. 47, no. 8, pp. 561-575. DOI: 10.3103/s1068373922080015
24. Frolov A.V., Vazhnik A.I., Svirenko P.I., Cvetkov V.I. Global'naya sistema usvoeniya dannyh nablyudenij o sostoyanii atmosfery [Global system for the assimilation of atmospheric observational data]. Sankt-Petersburg, Gidrometeoizdat publ., 2000, 187 p. [in Russ].
25. Tsyrlunikov M.D., Bagrov A.N., Zaripov R.B., Tolstykh M.A. Development of a variable-resolution global data assimilation system. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2003, no. 4, pp. 1-14.
26. Tsyrlunikov M.D., Svirenko P.I., Gayfulin D.R., Gorbunov M.E., Uspensky A.B. Razvitie sistemy operativnogo usvoeniya dannyh meteorologicheskikh nablyudenij v [Gidrometcentre Development of the data assimilation scheme of the Hydrometcentre of Russia]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, no. 4 (374), pp. 112-126 [in Russ].
27. Tsyrlunikov M.D., Gayfulin D.R., Svirenko P.I., Sotskiy A.E., Gavrilova S.A., Uspensky A.B. Development of methods and technologies for operational assimilation of meteorological observations at the Hydrometcenter of Russia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2024, vol. 49, no. 7, pp. 638-648. DOI: 10.3103/S1068373924070082
28. Chambon P., Mahfouf J.-F., Audouin O., Birman C., Fourrie N., Loo C., Martet M., Moli P., Payan C., Pourret V., Raspaud D. Global Observing System Experiments within the Meteo-France 4D-Var data assimilation system. *Monthly Weather Review*, 2023, vol. 151, pp. 127-143. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-22-0087.1>
29. Cho H.-K., Bowman K.P., North G.R. A comparison of gamma and lognormal distribution for characterizing satellite rain rates from the Tropical Rainfall Measuring Mission. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2004, vol. 43, no. 11, pp. 1586-1597. DOI: 10.1175/JAM2165.1
30. Cressman P. An operational objective analysis system. *Mon. Wea. Rev.* 1959. Vol. 87. P. 367-374. DOI: 10.1175/1520-0493(1959)087<0367:AOOAS>2.0.CO;2
31. Daley R. Atmospheric data analysis. Cambridge Atmospheric and Space Science Series, Cambridge University Press, Cambridge, 1991. 472 p.
32. Dowd P.A. Lognormal kriging – the general case. *Mathematical Geology*, 1982, vol. 14, no. 5, pp. 475-499.
33. Hammoudeh S., Goergen K., Belleflamme A., Giles J.A., Teomel S., Kollet S. Evaluating precipitation products for water resources hydrologic modeling over German. *Front. Earth Sci.* 2025, vol. 13. DOI: 10.3389/feart.20251548557
34. Hersbach H., Bell, B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S. et. al. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2020, vol. 146, pp. 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
35. Huffman G.J., Adler R.F., Behrangi A., Bolvin D.T., Nelkin E.J., Gu G., Ehsani M.R. The new version 3.2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly and daily precipitation products. *J. Climate*, 2023, vol. 36, no 21, pp. 7635-7655. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-23-0123.1>
36. IFS Documentation – Cy50r1/ Part II: Data Assimilation. Operational implementation 12 May 2026. 112 p.
37. Kalnay E. Atmospheric modeling, data assimilation and predictability. Cambridge University Press, 2002. 341 p.
38. Koster R.D., Guo Z., Yang R., Dirmeyer K.M., Puma M.J. On the nature of soil moisture in land surface models. *J. Climate.* 2009. Vol. 22. P. 4322-4335. DOI: <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2832.1>
39. GFS/GDAS CHANGES SINCE 1991. https://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/STATS/html/model_changes.html
40. Levizzani V., Cattani E. Satellite remote sensing of precipitation and terrestrial water cycle in a changing climate. *Remote Sens.*, 2019, vol. 11, no. 19, pp. 2301. DOI: 10.3390/rs11192301

41. Menut L., Cholakian A., Pennel R., Siour G., Mailler S., Valari M., Lugon L., Meurdesoif Y. The CHIMERE chemistry-transport model v20023r1. *Geoscientific Model Development*, 2024, vol. 17, no. 14, pp. 5431-5457. <https://doi.org/10.5194/gmd-17-5431-2024>
42. Razali N.M., Wah Y.B. Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2011, vol. 2, no 1, pp. 21-33. <https://doi.org/10.3390/w17010105>
43. Razali N.M., Wah Y.B. Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2011, vol. 2, no 1, pp. 21-33.
44. Sakia R.M. The Box-Cox transformation technique: a review // *Journal of the Royal Statistical Society. Series D (The Statistician)*, 1992, vol. 41, no. 2, pp. 169-178. <https://doi.org/10.2307/2348250>
45. Unified Model. <https://www.metoffice.gov.uk/research/approach/modelling-systems/unified-model> (дата обращения 28.11.2024).
46. Vitart, F., Robertson A. and the S2S steering group. Sub-seasonal to seasonal prediction: linking weather and climate. Seamless prediction of the earth system: from minutes to months. WMO-No. 1156. Geneva, Switzerland, 2015. P. 385-405.
47. Vitart F., Bonet A., Brookshaw A., Codorean C., Ferranti L., Fucile E., Fuentes M., Mallas I., Manoussakis M., Mladek R., Najm S., Venuti F., Ardilouze C., Déqué M., MacLachlan C., McLean P., Chen M., Kumar A., Hendon H., Liu G. et al. The subseasonal to seasonal (S2S) prediction project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, vol. 98, no. 1, pp. 163-173. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0017.1>
48. WMO Atlas of mortality and economic losses from weather, climate, and water extremes (1970–2019). WMO-No. 1267. Geneva, Switzerland, 2021. 90 p. <https://library.wmo.int/records/item/57564-wmo-atlas-of-mortality-and-economic-losses-from-weather-climate-and-water-extremes-1970-2019>.
49. WRF-ARW 4.5 Users Guide documentation. https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrf_users_guide/build/html/index.html

Поступила 09.07.2026; принята в печать 22.10.2026.
Submitted 09.07.2026; accepted for publication 22.10.2026.