

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2026-2-69-87>

УДК 551.501.777

Методы коррекции сумм осадков, полученных по данным с геостационарного спутника Himawari-9 для территории Дальневосточного региона России

М.О. Кучма^{1,2}, А.И. Андреев^{1,2}, С.И. Мальковский¹

*¹ Вычислительный центр Дальневосточного отделения
Российской академии наук, г. Хабаровск, Россия;*

*² Дальневосточный центр ФГБУ «Научно-исследовательский центр
космической гидрометеорологии «Планета», г. Хабаровск, Россия
a.andreev@dvrp.od.ru*

В работе исследуются методы автоматической коррекции полусуточных сумм осадков, получаемых по данным геостационарного спутника Himawari-9 с использованием разработанного ранее алгоритма для оценки их мгновенной интенсивности. Коррекция осуществляется на основе предшествующих рассматриваемому периоду измерений накопленных сумм осадков на наземных метеорологических станциях в скользящем временном окне в теплый период года с мая по октябрь. Исследование проведено на территории Дальневосточного региона России с учетом данных 136 метеорологических станций Росгидромета. Наилучшие результаты достигнуты при использовании метода с отбором корректирующей модели по минимальной среднеквадратичной ошибке. Оценка качества проведена на декадных и месячных суммах осадков. Применение алгоритма коррекции позволяет в среднем уменьшить среднеквадратичную ошибку определения суммы осадков на 30–50 %, смещение (Bias) уменьшить в 1,5–3 раза.

Ключевые слова: осадки, сумма осадков, коррекция осадков, Himawari, осадкомеры

Methods for correcting total precipitation retrieved from Himawari-9 geostationary satellite data over the territory of the Russian Far East

M.O. Kuchma^{1,2}, A.I. Andreev^{1,2}, S.I. Malkovsky¹

*¹ Computing Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Khabarovsk, Russia;*

*² Far-Eastern Center of State Research Center for Space Hydrometeorology “Planeta”,
Khabarovsk, Russia
a.andreev@dvrp.od.ru*

In this study, methods for the automatic correction of 12-hour precipitation derived from the Himawari-9 geostationary satellite are investigated. Satellite-based precipitation is obtained using a previously developed algorithm for estimating an instantaneous precipitation intensity. The correction is performed using accumulated precipitation measurements from ground-based meteorological stations preceding the analyzed period in a moving time window during the warm season from May to October. The study is conducted over the Russian

Far East region using data from 136 Roshydromet meteorological stations. The best results were achieved with the method that selects a correction model based on the minimum root-mean-square error. The quality assessment was carried out using 10-day and monthly precipitation. Application of the correction algorithm reduces the root-mean-square error of total precipitation estimation on average by 30–50% and the bias by 1.5–3 times.

Keywords: precipitation, total precipitation, precipitation correction, Himawari, rain gauges

Введение

Осадки являются одним из важнейших элементов климата, определяющих водный баланс территории, режим стока рек, условия сельскохозяйственного производства и риск возникновения опасных гидрологических явлений. Главным источником для их мониторинга являются наземные метеорологические станции, количество которых может быть ограничено ввиду недостаточно развитой инфраструктуры в отдаленных регионах. Спутниковые измерения осадков с использованием геостационарных (г/с) космических аппаратов (КА) позволяют существенно дополнить наземные наблюдения за счет высокой частоты получения данных и большого территориального охвата.

Существенным недостатком г/с КА является невозможность методами ИК-радиометрии напрямую измерить количество осадков [26, 30]. Как правило, подобные методы полагаются на использование косвенных признаков, коррелирующих с наличием осадков, таких как температура верхней границы облака, размер облачных частиц, текстурные характеристики на спектральных изображениях и др. [2, 4], что приводит к существенным различиям между спутниковыми и наземными измерениями осадков [5, 18]. Повысить точность оценки осадков по данным г/с спутников можно путем комплексирования измерений из различных источников [7].

В качестве одного из вспомогательных источников измерений осадков рассматриваются данные микроволнового (МВ) зондирования полярно-орбитальных (п/о) КА [8, 16]. МВ измерения имеют более высокую точность в сравнении с данными ИК-радиометрии, однако они непригодны для расчета сумм осадков ввиду нерегулярности наблюдений [16, 23]: в среднем 1–2 раза в сутки для одной территории. По этой причине МВ измерения используются преимущественно для калибровки интенсивностей осадков г/с КА [14, 16]. С другой стороны, наземные метеорологические радиолокаторы МВ диапазона обеспечивают измерение осадков с частотой 1–10 минут и также могут использоваться для калибровки [24], однако на территории Дальнего Востока подобные наблюдения практически отсутствуют. Поскольку ИК-радиометрия не позволяет получить информацию о вертикальной структуре облаков, это приводит к существенным структурным различиям между МВ и ИК изображениями осадков [17, 12], что затрудняет проведение калибровки. Поэтому на практике чаще используется другой подход, где на основе г/с данных рассчитываются векторные карты

перемещений облачности, используемые в дальнейшем для временной интерполяции МВ измерений осадков. Подобный подход успешно применяется в алгоритмах SMORPH [13] и GPM IMERG [11], однако требует использования большой группировки п/о КА и разработки соответствующих алгоритмов расчета осадков для каждого МВ прибора. При этом отмечается, что результаты интерполяции не всегда в полной мере соответствуют реальным наблюдениям осадков [16].

Для калибровки спутниковых оценок осадков часто используются показания наземных метеорологических станций как наиболее достоверных источников информации [5, 16]. Из-за пространственно-временных рассогласований между наземными и спутниковыми измерениями, в том числе по причине ветрового сноса и испарения [16], калибровку осадков обычно проводят с учетом накопленной статистики за продолжительный период от нескольких дней до месяца. Наиболее часто для коррекции применяются простые методики, такие как линейное масштабирование и аддитивная коррекция [8, 23, 24], однако предлагаются и более сложные варианты, например кригинг [19], квантильная коррекция [15, 21], функции плотности вероятности [29], деревья решений [5], позволяющие более точно учесть региональные особенности рассматриваемой территории [8, 9].

В большинстве исследований коррекция осадков проводится на примере территорий с плотной сетью наземных станций [12, 27]. В то же время в рассматриваемом Дальневосточном регионе на площади 7 млн кв. км расположено 136 станций, большая часть из которых находится в его южной части (рис. 1).

Небольшое количество станций на большой территории может привести к снижению качества коррекции осадков [5, 6], в связи с чем необходимо рассматривать различные методы для ее проведения с целью достижения наилучших результатов. В работе рассматриваются наиболее распространенные методики коррекции спутниковых оценок осадков на территории Дальнего Востока. В качестве исходных спутниковых измерений осадков используется ранее разработанный авторами алгоритм [1] для японского г/с КА Himawari-9, однако полученные результаты будут справедливы и для других спутниковых алгоритмов.

Используемые данные и район исследования

Рассматриваемый регион исследования охватывает территорию Дальнего Востока Российской Федерации в пределах координат от 42° до 65° с. ш. и от 125° до 168° в. д. В указанные границы входят Приморский край, Хабаровский край, Еврейская автономная область, Сахалинская область, Амурская область, южная часть Республики Саха (Якутия), Магаданская область и Камчатский край. Рельеф региона крайне неоднороден: на юге и юго-востоке преобладают горные системы Сихотэ-Алиня и Восточно-Сихотэ-Алинского хребта с высотами до 2000–2500 м, на севере и северо-востоке – обширные низменности и плоскогорья, а вдоль побережья

Охотского моря и Тихого океана – вулканические массивы и прибрежные хребты [3]. Большая протяженность территории и преимущественно горный рельеф оказывают влияние на неравномерность распределения выпадающих осадков по региону исследования. Такая орографическая неоднородность обуславливает значительную пространственную изменчивость осадков.

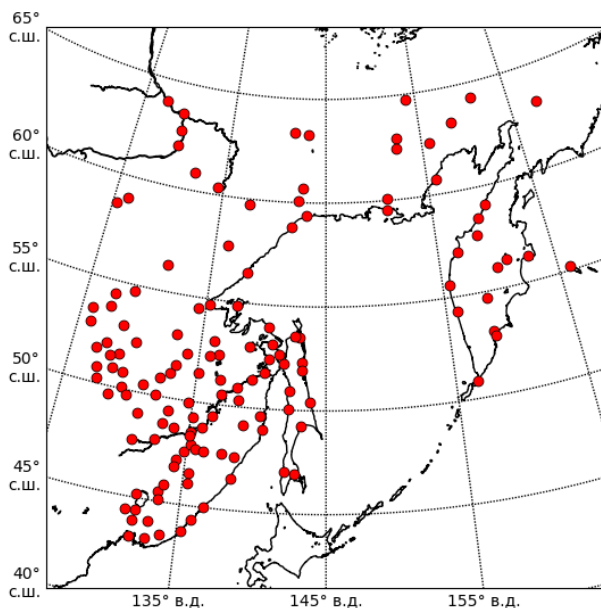


Рис. 1. Расположение используемых в работе метеостанций.

Fig. 1. Location of the rain gauges used in the work.

Климат Дальнего Востока России относится к муссонному типу с ярко выраженной сезонностью осадков. Более 70–85 % годовой суммы осадков выпадает в период с июня по сентябрь с максимальным количеством в июле и августе. Интенсивные конвективные и фронтальные осадки нередко достигают экстремальных значений, особенно в зоне влияния тропических циклонов, проникающих на материк с юго-востока. Зимний период характеризуется малым количеством осадков преимущественно в твердой фазе. Среднегодовая сумма осадков варьирует от 400–600 мм на севере и в континентальных районах до 800–1200 мм и более на юго-восточном побережье и в горных районах Приморья и юга Хабаровского края.

Контрольные измерения сумм осадков для настройки и тестирования методик коррекции получены с 136 метеорологических станций Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, расположенных в пределах исследуемой территории. В работе использовались 12-часовые суммы осадков в период с мая по октябрь 2023–2025 гг., соответствующие метеорологическим полусуткам. Для части станций смена полусуток происходит в 00:00 и в 12:00 UTC, тогда как для других

станций полусутки сменяются в 09:00 и 21:00 UTC. Общее количество 12-часовых интервалов, когда были зафиксированы осадки на станциях, составило около 15 тысяч.

Спутниковые оценки осадков получены на основе измерений прибора АНІ, установленного на геостационарном спутнике Himawari-9, эксплуатируемом Японским метеорологическим агентством. Для расчета мгновенной интенсивности осадков применяется региональный нейросетевой алгоритм, использующий спектральные и текстурные характеристики осадкообразующей облачности, а также микро- и макрофизические параметры на ее верхней границе [1]. Алгоритм позволяет строить карты осадков с пространственным разрешением 2 км каждые 10 минут. По результатам проведенной валидации [1] средняя относительная ошибка определения интенсивности для данного алгоритма составила менее 50 % для различных градаций интенсивности, а количество накопленных сумм осадков за месяц оказалось наиболее близко к измерениям наземных станций в сравнении с данными GPM IMERG и численной прогностической модели CosmoRu-6. При этом было отмечено, что алгоритм имеет склонность к завышению количества накопленных осадков.

Таким образом, указанный алгоритм использовался для расчета карт сумм осадков путем интегрирования по времени значений мгновенной интенсивности. Результаты его работы используются в качестве входной информации для алгоритма коррекции.

Методы коррекции

Для коррекции полусуточных карт сумм осадков рассматривались описанные ниже методы.

Мультипликативная коррекция по среднему

Данный метод коррекции основан на определении среднего отношения наземных и спутниковых сумм осадков, где мультипликативный коэффициент k рассчитывается следующим образом:

$$k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{P_{obs,i}}{P_{sat,i}},$$

где n – количество пар значений, $P_{obs,i}$ и $P_{sat,i}$ – 12-часовая сумма осадков со станции и со спутника соответственно. Итоговое значение суммы осадков рассчитывается по формуле $P_{corr} = k \cdot P_{sat}$.

Медианная мультипликативная коррекция

Пусть имеется набор из n пар значений сумм осадков на станции P_{obs} и соответствующих им спутниковых оценок $P_{sat} : \{(P_{obs,1}, P_{sat,1}), (P_{obs,2}, P_{sat,2}), \dots, (P_{obs,n}, P_{sat,n})\}$. На основе этих пар

рассчитываются отношения в виде: $k_i = P_{obs,i} / P_{sat,i}$, $i = 1, 2, \dots, n$. Для отсортированного по возрастанию списка значений k_i определяется медианное значение коэффициента k . Итоговое значение скорректированной суммы определяется формулой $P_{corr} = k \cdot P_{sat}$.

Аддитивная коррекция

Аддитивная коррекция систематической ошибки рассчитывается как средняя разность наземных и спутниковых сумм, где аддитивный коэффициент q рассчитывается как

$$q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{obs,i} - P_{sat,i}).$$

Корректированная сумма в данном случае рассчитывается как $q P_{corr} = P_{sat} + q$.

Квантильная коррекция

Данный вид коррекции основан на построении функции соответствия квантилей спутниковых и наземных сумм осадков [24]. Для каждого значения спутниковой суммы рассчитывается его квантиль τ в эмпирическом распределении спутниковых данных, после чего определяется обратная функция распределения наземных сумм:

$$P_{corr} = F_{obs}^{-1} (F_{sat} (P_{sat})),$$

где F_{sat} и F_{obs}^{-1} – прямая и обратная функции распределения, соответственно, для спутниковых и стационарных измерений осадков. F_{sat} рассчитывается следующим образом. Для отсортированных по возрастанию n спутниковых значений сумм осадков $P_{sat,1}, P_{sat,2}, \dots, P_{sat,n}$ определяется следующая функция:

$$F_{sat}(x) = \begin{cases} 0, & x < P_{sat,(1)}, \\ k/n, & P_{sat,(k)} \leq x < P_{sat,(k+1)}, k=1, 2, \dots, n-1, \\ 1, & x \geq P_{sat,(n)} \end{cases}$$

Для произвольного значения P_{sat} квантиль τ вычисляется как

$$\tau = F_{sat}(P_{sat}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I(P_{sat,i} \leq P_{sat}),$$

где I – индикаторная функция (равна 1, если условие выполнено, либо 0 в противном случае).

Для F_{obs}^{-1} аналогично строится набор из m наземных 12-часовых сумм за то же окно обучения: $P_{obs,1}, P_{obs,2}, \dots, P_{obs,m}$. Затем данные сортируются по возрастанию и F_{obs}^{-1} определяется как

$$F_{obs}^{-1} = P_{sat,(k)}, k = \lfloor \tau \cdot (m+1) \rfloor,$$

где k – наименьшее целое число, удовлетворяющее представленному условию; $\lfloor \cdot \rfloor$ – функция взятия целой части с округлением вниз.

Квантильная коррекция с логарифмической экстраполяцией хвоста распределения

Данный тип коррекции позволяет точнее скорректировать экстремальные значения сумм осадков [22], где для квантилей ниже порога $\tau_{tail} = 95\%$ используется классическое отображение, а для значений выше порога применяется линейная регрессия в логарифмическом масштабе:

$$\ln(P_{corr}) = a \cdot \ln(P_{sat}) + b,$$

где коэффициенты a и b вычисляются методом наименьших квадратов:

$$(a, b) = \min_{a, b} \sum_{i \in \tau_{tail}} (\ln(P_{obs,i}^{tail}) - a \cdot \ln(P_{sat,i}^{tail}) - b)^2.$$

Метод обеспечивает плавный переход от эмпирического квантильного отображения к параметрической логарифмической экстраполяции в области экстремальных осадков, что позволяет избегать недооценки высоких значений осадков.

Параметрическое отображение через гамма-распределение

Метод заключается в том, чтобы аппроксимировать распределения спутниковых и наземных 12-часовых сумм осадков с помощью гамма-распределения, а затем выполнить коррекцию путем преобразования вероятностей из одного распределения в другое [20].

Пусть имеются наборы спутниковых и наземных наблюдений $P_{sat}^{valid} = \{P_{sat,i}\}_{i=1}^n$ и $P_{obs}^{valid} = \{P_{obs,i}\}_{i=1}^n$. Функция плотности гамма распределения с параметрами $\alpha > 0$ и $\Theta > 0$ имеет вид:

$$f(x | \alpha, \Theta) = \frac{1}{\Theta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\Theta},$$

где x – величина суммы осадков в мм; $\Theta^\alpha \Gamma(\alpha)$ – нормировочная константа, определяемая из интеграла плотности во всем диапазоне значений $(0, \infty)$; Γ – гамма-функция:

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt,$$

где t – переменная интегрирования; t^{z-1} – степень, аналогичная $x^{\alpha-1}$ в функции плотности вероятности.

Для спутниковых P_{sat}^{valid} и наземных P_{obs}^{valid} сумм отдельно вычисляются выборочные характеристики.

Среднее значение:

$$\bar{P}_{sat} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{sat,i}, \quad \bar{P}_{obs} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{obs,i}.$$

Выборочная дисперсия:

$$s_{sat}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{sat,i} - \bar{P}_{sat})^2, \quad s_{obs}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{obs,i} - \bar{P}_{obs})^2.$$

Параметры гамма-распределения оцениваются методом моментов. Для спутниковых сумм:

$$\hat{\Theta}_{sat} = \frac{s_{sat}^2}{\bar{P}_{sat}}, \quad \hat{\alpha}_{sat} = \frac{\bar{P}_{sat}^2}{s_{sat}^2}.$$

Для наземных сумм:

$$\hat{\Theta}_{obs} = \frac{s_{obs}^2}{\bar{P}_{obs}}, \quad \hat{\alpha}_{obs} = \frac{\bar{P}_{obs}^2}{s_{obs}^2}.$$

Преобразование текущего значения интенсивности осадков определяется следующим образом. Для текущей спутниковой суммы P_{sat} вычисляется вероятность через гамма-распределение:

$$\tau = F_{\Gamma}(P_{sat} | \hat{\alpha}_{sat}, \hat{\Theta}_{sat}) = \frac{\gamma(\hat{\alpha}_{sat}, P_{sat,i} / \hat{Q}_{sat})}{\Gamma(\hat{\alpha}_{sat})},$$

где γ – нижняя неполная гамма-функция, определяемая как

$$\gamma(s, x) = \int_0^x t^{s-1} e^{-t} dt,$$

где s – параметр, аналогичный α ; x – верхний предел интегрирования. После этого находится обратное значение в гамма-распределении наземных сумм:

$$P_{corr} = F_{\Gamma}^{-1}(\tau | \hat{\alpha}_{obs}, \hat{\Theta}_{obs}).$$

Таким образом, метод отображает значение спутниковой суммы осадков в пространство вероятностей с помощью гамма-распределения

для спутниковых измерений, а затем преобразует его обратно в пространство значений с помощью гамма-распределения для наземных данных. Это позволяет сохранить форму распределения осадков и улучшить их согласованность, особенно в области средних и высоких значений.

Метод локальной взвешенной регрессии

Локальная взвешенная регрессия представляет собой метод для построения нелинейной зависимости между спутниковыми и наземными суммами осадков [10]. Данный метод позволяет получить плавную сглаживающую кривую без жестких предположений о форме зависимости.

Для каждого значения спутниковой суммы P_{sat} строится локальная линейная регрессия в окрестности этой точки. Весовые коэффициенты для пар из обучающей выборки $(P_{obs,i}, P_{sat,i}), i = 1, 2, \dots, n$ убывают по мере увеличения расстояния от текущего P_{sat} . Ширина окрестности определяется параметром $frac$ – долей обучающих точек, включаемых в рассмотрение (в настоящей работе принимается равным 30%). Число точек, включаемых в окрестность, округляется вверх до ближайшего целого числа k . Это означает, что в окрестность текущей точки P_{sat} будет включено k ближайших точек из обучающей выборки, включая саму точку, если она совпадает с одной из обучающих. Для заданного P_{sat} все спутниковые суммы обучающей выборки сортируются по возрастанию, после чего вычисляются абсолютные расстояния от P_{sat} до каждой точки обучающей выборки:

$$d_i = |P_{sat,i} - P_{sat}|.$$

Затем эти расстояния сортируются по возрастанию, и ширина окрестности Δ принимается равной k -му расстоянию:

$$\Delta = d_{(k)} = d_{\lceil frac \cdot n \rceil},$$

где $\lceil \cdot \rceil$ – функция взятия целой части с округлением вверх.

Таким образом, область окрестности автоматически сужается в областях с высокой плотностью данных и расширяется в областях с редкими значениями. Веса каждой обучающей точки вычисляются с помощью трикубической функции

$$w_i = \begin{cases} \left(1 - \left| \frac{P_{sat,i} - P_{sat}}{\Delta} \right|^3 \right), & \text{если } |P_{sat,i} - P_{sat}| < \Delta. \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

Такая весовая функция обеспечивает максимальный вес в точке P_{sat} и плавное убывание до нуля на границе окна и нулевой вес за ее пределами.

На основе полученных весов решается задача взвешенной линейной регрессии:

$$\min_{a_0, a_1} \sum_{i=1}^n w_i (P_{obs,i} - (a_0 + a_1 P_{sat,i}))^2.$$

Решение дает локальные коэффициенты a_0 и a_1 , а скорректированное значение суммы осадков вычисляется как $P_{corr} = a_0 + a_1 \cdot P_{sat}$.

Для получения скорректированных значений спутниковых осадков применяется процедура интерполяции. Сглаженные значения, полученные методом локально взвешенной регрессии на подмножестве пар с положительными спутниковыми и наземными суммами осадков, рассматриваются как опорные точки функции коррекции. Эти точки упорядочиваются по возрастанию спутниковой суммы P_{sat} . Далее строится кусочно-линейная интерполирующая функция, которая аппроксимирует зависимость скорректированной суммы осадков от спутниковой суммы на всём диапазоне наблюдаемых значений P_{sat} . Применение кусочно-линейной интерполяции обеспечивает непрерывность и монотонность корректирующей зависимости в областях между опорными точками, сохраняя при этом вычислительную простоту и устойчивость к локальным особенностям данных.

Мультипликативно-аддитивный метод для малых и больших сумм

Данный метод сочетает в себе аддитивную коррекцию для малых сумм осадков и мультипликативную для больших [28], что особенно важно при выраженной нелинейности систематических ошибок спутниковых оценок: слабые суммы чаще завышаются на постоянную величину, а сильные на относительную. Выбор того или иного метода коррекции основан на пороговом значении T , принятом в настоящей работе равным 7 мм. При значении суммы ниже этого порога применяется аддитивная коррекция, а выше – мультипликативная.

Алгоритм коррекции

С использованием перечисленных методов был разработан программный алгоритм коррекции спутниковых сумм осадков, работающий по следующему принципу. На вход алгоритма подаются значения полусуточных сумм осадков за предшествующие текущей дате 8 суток. Затем независимо друг от друга применяются описанные методы коррекции для всех измерений в данном периоде по всем станциям в рассматриваемой области. Далее каждый метод оценивается с учетом среднеквадратичной ошибки до и после коррекции, и на основе этой информации выбирается наилучший метод, который в свою очередь применяется для коррекции суммы осадков текущего срока наблюдений. Период предшествующих измерений в количестве 8 суток был подобран эмпирически как наиболее оптимальный

между объемом вычислений, количеством измерений на станциях и влиянием сезонности. Алгоритм предназначен для применения в оперативном режиме к спутниковым измерениям на текущий день наблюдений.

Валидация

Реализованный алгоритм был протестирован на измерениях в период с мая по октябрь 2023–2025 гг. Итоговая статистика для оценки качества строилась на сопоставлении двух наборов данных по всем станциям и всем периодам: исходных спутниковых 12-часовых сумм и сумм после проведения процедуры коррекции. Анализ качества коррекции спутниковых оценок осадков проводился с использованием трех основных статистических показателей [28]: среднеквадратичной ошибки RMSE, систематического смещения Bias и коэффициента корреляции Пирсона (R). RMSE характеризует общую точность оценок и чувствительна как к систематическим, так и к случайным отклонениям. Bias отражает среднюю направленную разницу между спутниковыми и наземными значениями, позволяя оценить наличие постоянного завышения или занижения. R показывает степень линейной связи между спутниковыми и наземными суммами осадков и используется для оценки сохранения структуры пространственно-временной изменчивости. Анализ результатов проводился для декадных и месячных сумм осадков.

Декадные суммы осадков

На уровне декадных сумм коррекция в среднем обеспечила устойчивое улучшение качества данных: в среднем RMSE уменьшилась с 41.6 до 29.7 мм, Bias изменился с +10.1 до -4.8 мм, а корреляция незначительно снизилась с 0.79 до 0.77. В табл. 1 представлены ошибки, полученные для каждой декады до и после процедуры коррекции. Жирным шрифтом выделены наилучшие значения для каждого рассматриваемого временного периода. Для удобства анализа результатов в таблице дополнительно рассчитана относительная ошибка RE между значением RMSE и измеренным значением на станции.

Наиболее выраженное снижение RMSE зафиксировано в декадах с июня по август, где снижение RMSE составило до 44 %. Улучшение также наблюдалось в сентябрьских и октябрьских декадах, хотя и в меньшей степени. RMSE в данном случае уменьшилась на 41–46 %, Bias сократился на 21–33 %, корреляция увеличилась на 40–62 %. Наихудший результат был достигнут в мае, когда коррекция оказалась неэффективной.

Общий вывод по всем периодам подтверждает, что коррекция существенно повышает точность спутниковых оценок осадков в теплый период года и в осенние месяцы. В то же время в весенний период алгоритм не показал улучшений.

Таблица 1. Ошибка до и после коррекции, усредненная по декадным суммам осадков**Table 1.** Error before and after correction, averaged over ten-day precipitation amounts

Месяц	Декада	Кол-во точек	RMSE, мм	RE _{RMSE} , %	Bias, мм	RE _{Bias} , %	R
До коррекции							
Май	1	40	11,995	78,0	-6,307	-41,0	0,582
	2	109	24,933	69,7	-4,222	-11,8	0,641
	3	97	15,842	57,8	-6,224	-22,7	0,631
Июнь	1	98	22,401	51,7	-0,890	-2,1	0,907
	2	107	53,204	92,1	+11,464	+19,8	0,646
	3	117	33,674	70,6	+8,102	+17,0	0,793
Июль	1	121	25,935	66,9	-10,808	-27,9	0,588
	2	104	40,129	73,7	+13,859	+25,4	0,760
	3	102	66,784	94,2	+28,763	+40,6	0,712
Август	1	104	66,864	102,5	+34,263	+52,5	0,832
	2	100	40,866	74,3	+11,555	+21,0	0,714
	3	99	66,461	83,5	+34,908	+43,8	0,865
Сентябрь	1	105	64,180	128,7	+32,121	+64,4	0,412
	2	102	20,439	85,4	+3,201	+13,4	0,572
	3	82	45,710	140,4	+17,433	+53,5	0,819
Октябрь	1	67	26,803	162,5	+7,728	+46,9	0,652
	2	75	17,384	119,3	-1,668	-11,4	0,118
	3	58	14,458	73,9	-0,730	-3,7	0,550
После коррекции							
Май	1	40	13,781	89,6	-8,199	-53,3	0,477
	2	109	27,887	78,0	-8,802	-24,6	0,577
	3	97	18,980	69,3	-13,145	-48,0	0,628
Июнь	1	98	20,790	48,0	-12,325	-28,5	0,901
	2	107	32,750	56,7	-20,885	-36,1	0,704
	3	117	28,269	59,3	-10,744	-22,5	0,749
Июль	1	121	26,432	68,2	-14,400	-37,1	0,601
	2	104	31,258	57,4	-5,590	-10,3	0,750
	3	102	58,214	82,1	+12,225	+17,2	0,692
Август	1	104	37,709	57,8	+7,683	+11,8	0,811
	2	100	27,965	50,8	-8,457	-15,4	0,775
	3	99	39,472	49,6	-6,819	-8,6	0,849
Сентябрь	1	105	37,018	74,2	+7,196	+14,4	0,479
	2	102	19,955	83,4	+1,510	+6,3	0,493
	3	82	20,973	64,4	+4,373	+13,4	0,859
Октябрь	1	67	18,412	111,6	+0,511	+3,1	0,450
	2	75	15,220	104,4	-7,668	-52,6	0,098
	3	58	14,033	71,8	-6,322	-32,3	0,563

Из результатов работы алгоритма также можно отметить сезонную специфику.

1. В период с июня по август наиболее часто для коррекции осадков применяется метод локальной взвешенной регрессии, что связано с наибольшим количеством осадков в этом периоде. Немного реже применялся мультипликативно-аддитивный метод.

2. В более холодные периоды (май, сентябрь, октябрь) чаще применялись методы на основе квантильной коррекции.

3. В мае были достигнуты наихудшие результаты коррекции, что вызвано меньшим количеством осадков и их слабой интенсивностью в этом периоде.

Месячные суммы осадков

На уровне месячных сумм коррекция в среднем обеспечила умеренное улучшение качества данных: RMSE уменьшилась с 82.8 до 55.5 мм, Bias сократился с +24.7 до -11.7 мм, R при этом остался на уровне 0.87. Наилучшие результаты были достигнуты в августе в период наиболее интенсивных осадков, когда ошибка RMSE уменьшилась на 52 %. В табл. 2 представлена ошибка RMSE по месяцам, а на рис. 2 – диаграмма распределения значений до и после коррекции.

Таблица 2. Ошибка до и после коррекции, усредненная по месячным суммам осадков

Table 2. Error before and after correction, averaged over monthly precipitation amounts

Месяц	Кол-во точек	RMSE, мм	RE _{RMSE} , %	Bias, мм	RE _{Bias} , %	R
До коррекции						
Май	114	35,424	56,3	-11,546	-18,4	0,729
Июнь	127	76,874	61,0	+16,436	+13,0	0,907
Июль	126	89,147	63,9	+24,344	+17,4	0,863
Август	109	133,146	72,0	+74,998	+40,5	0,900
Сентябрь	110	97,514	103,7	+46,625	+49,6	0,658
Октябрь	96	36,534	105,3	+3,649	+10,5	0,616
После коррекции						
Май	114	40,400	64,3	-22,478	-35,7	0,681
Июнь	127	53,903	42,8	-37,005	-29,4	0,909
Июль	126	78,728	56,4	-8,545	-6,1	0,831
Август	109	64,459	34,8	-6,622	-3,6	0,884
Сентябрь	110	56,635	60,2	+11,529	+12,3	0,677
Октябрь	96	28,689	82,7	-9,454	-27,2	0,548

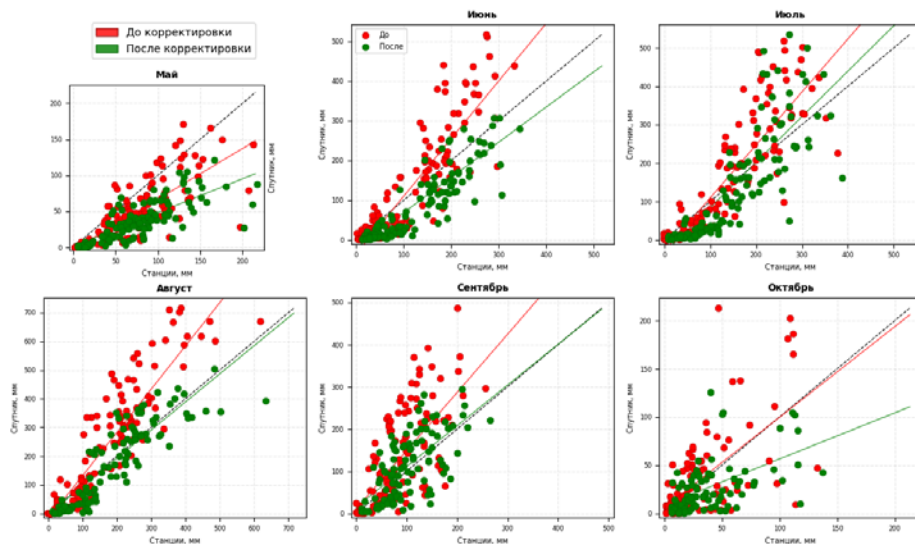


Рис. 2. Распределение сумм осадков по месяцам.
Fig. 2. Distribution of precipitation amounts by month.

Обсуждение результатов

Полученные результаты демонстрируют, что разработанный оперативный метод коррекции спутниковых оценок осадков Himawari-9 позволяет существенно повысить качество 12-часовых сумм осадков на территории Дальнего Востока России в теплый период года. В частности, удалось снизить среднеквадратичную ошибку RMSE на 25 % для декадных сумм и на 30 % для месячных значений, что сопоставимо с результатами, полученными в других регионах с использованием более плотных сетей наблюдений [23, 25]. При этом используемый алгоритм адаптирован к условиям ограниченного количества наземных измерений и предназначен для работы в оперативном режиме.

Наиболее важным результатом является выраженная сезонная зависимость эффективности коррекции. В летний период, а также ранней осенью метод стабильно снижает RMSE до 45 % как на месячных, так и на декадных суммах осадков и уменьшает по модулю ошибку Bias. Это объясняется высокой интенсивностью и конвективным характером осадков в теплый период, когда спутниковые алгоритмы чаще завышают интенсивность осадков. Коррекция в этих условиях эффективно компенсирует систематические ошибки и улучшает воспроизведение как средних, так и экстремальных значений.

Стоит отметить, несмотря на значительное снижение среднеквадратичной ошибки, коэффициент корреляции после проведения процедуры коррекции остается приблизительно на том же уровне, что и до нее. Это говорит о том, что сама процедура коррекции носит усредняющий характер, занижая значения больших осадков и увеличивая их для малых

сумм. Причины подобного поведения связаны с неидеальным соответствием осадков у Земли и на верхней границе облаков. Поскольку алгоритмы оценки осадков по спутниковым ИК-измерениям позволяют измерить количество осадков по косвенным признакам (яркостной температуре в ИК-канале, текстурной информации и др.), это может приводить к несоответствиям между предполагаемой и фактической величиной осадков. Кроме того, на координаты выпадения осадков у Земли может влиять ветровой снос, учесть который достаточно проблематично. Зачастую это приводит к пространственному рассогласованию между спутниковыми и наземными измерениями и является дополнительным источником ошибок.

В весенний период ни один из рассмотренных методов не позволил улучшить результат. Основные причины связаны с низкой репрезентативностью сети наземных станций в условиях сложного рельефа и температурных инверсий [15]. В весенний период переходные процессы, такие как таяние снега и смешанные фазы осадков, также являются одними из факторов снижения качества коррекции осадков. Кроме того, на данный результат также оказывают влияние ограничения самого алгоритма расчета осадков. Измерения малых интенсивностей по спутниковым данным носят в большей степени случайный характер, чем сильных осадков, поскольку в данном случае достаточно сложно оценить их количество без учета внутренней структуры облака, недоступной в ИК-диапазоне. В таких условиях применение нелинейных методов коррекции приводит к переоценке слабых осадков и подавлению более интенсивных событий, что ухудшает общее качество данных [24].

Заключение

В работе были рассмотрены методы коррекции полусуточных сумм осадков, получаемых по данным спутника Himawari-9, с использованием наземных измерений осадков по данным 136 метеорологических станций на территории Дальневосточного региона России. Подбор параметров для каждого метода осуществляется на основе предшествующих измерений осадков на протяжении 8 суток. Результирующая коррекция применяется с использованием метода, показавшего наименьшее значение среднеквадратичной ошибки RMSE.

Результаты оценки качества коррекции на декадных и месячных суммах осадков показали среднее снижение RMSE на 35 %. Наиболее значимое улучшение достигнуто в августе, когда RMSE снизилась на 52 мм. В то же время в весенний период коррекция оказалась неэффективной. Основные причины связаны с меньшим количеством фактических измерений осадков, их слабой интенсивностью и трудностями в их определении с использованием спутниковой ИК-радиометрии. Автоматический выбор наиболее подходящего метода коррекции позволяет частично компенсировать ошибку количественного определения осадков по спутниковым данным в теплый период года.

Таким образом, разработанный алгоритм коррекции может быть использован в оперативной работе в регионах с невысокой плотностью наземной сети метеорологических станций в теплый период наиболее интенсивных осадков. Помимо вспомогательного инструмента для мониторинга и прогнозирования гидрологических явлений, алгоритм может использоваться и в климатических исследованиях.

Благодарность: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-77-00011, <https://rscf.ru/project/23-77-00011/>. В работе использовались ресурсы Центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа данных спутниковых наблюдений Института космических исследований Российской академии наук для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды (ЦКП «ИКИ-Мониторинг»).

Acknowledgments: This study supported by the Russian Science Foundation (grant 23-77-00011, <https://rscf.ru/en/project/23-77-00011/>). In this work the resources of the “the IKI Center for Collective Use of Satellite Data Archiving, Processing and Analysis Systems Aimed at Solving the Problems of Environmental Study and Monitoring” (СКР “ИКИ-Monitoring”) were used.

Список литературы

1. Андреев А.И., Филей А.А., Мальковский С.И. Метод количественной оценки осадков на основе измерений Himawari-8/9 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21, № 5. С. 20-35. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-20-35
2. Волкова Е.В. Определение сумм осадков по данным радиометров SEVIRI/Meteosat-9, 10 и AVHRR/NOAA для Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Vol. 11, № 4. P. 163.
3. Гаврилов А.А. Эндогенная геоморфология в Тихоокеанском институте географии: история исследований // Тихоокеанская география. 2021. № 3 (7). P. 31-42. DOI: 10.35735/26870509_2021_7_31
4. Arkin P., Meisner B.N. The Relationship between Large-Scale Convective Rainfall and Cold Cloud over the Western Hemisphere during 1982–1984 // Mon. Weather. Rev. 1987. Vol. 115. P. 51-74. DOI: 10.1175/1520-0493(1987)115<0051:TRBLSC>2.0.CO;2
5. Baez-Villanueva O.M., Zambrano-Bigiarini M., Beck H.E., McNamara I., Ribbe L., Nauditt A., Birkel C., Verbist K., Giraldo-Osorio J.D., Thinh N.X. RF-MEP: A novel Random Forest method for merging gridded precipitation products and ground-based measurements // Remote Sensing of Environment. 2020. Vol. 239. P. 111606. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111606
6. Bessho K., Date K., Hayashi M., Ikeda A., Imai T., Inoue H., Kumagai Y., Miyakawa T., Murata H., Ohno T., Okuyama A., Oyama R., Sasaki Y., Shimazu Y., Shimoji K., Sumida Y., Suzuki M., Taniguchi H., Tsuchiyama H., Uesawa D., Yokota H., Yoshida R. An introduction to Himawari-8/9 — Japan's new-generation geostationary meteorological satellites // J. Meteorological Society of Japan. Ser. II. 2016. Vol. 94, is. 2. P. 151-183. DOI: 10.2151/jmsj.2016-009
7. Boushaki F.I., Hsu K.L., Sorooshian S., Park G.H., Mahani S., Shi W. Bias adjustment of satellite precipitation estimation using ground-based measurement: A case study evaluation over the southwestern United States // Journal of Hydrometeorology. 2009. Vol. 10, no. 5. P. 1231-1242. DOI: 10.1175/2009JHM1099.1
8. Chao L., Zhang K., Li Z., Zhu Y., Wang J., Yu Z. Geographically weighted regression based methods for merging satellite and gauge precipitation // Journal of Hydrology. 2018. Vol. 558. P. 275-289. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.01.042
9. Chen S., Xiong L., Ma Q., Kim J.S., Chen J., Xu C.Y. Improving daily spatial precipitation estimates by merging gauge observation with multiple satellite-based precipitation products based on the geographically weighted ridge regression method // Journal of Hydrology. 2020. Vol. 589. P. 125156. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125156

10. Cleveland W.S. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots // Journal of the American statistical association. 1979. Vol. 74, no. 368. P. 829-836. DOI: 10.1080/01621459.1979.10481038
11. Huffman G.J., Bolvin D.T., Braithwaite D., Hsu K., Joyce R., Kidd C., Nelkin E.J., Sorooshian S., Tan J., Xie P. NASA global precipitation measurement (GPM) integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG) // Algorithm theoretical basis document (ATBD) version. 2015. Vol. 4, no. 26. P. 30
12. Jiang D., Hu D., Tian Z., Lang X. Differences between CMIP6 and CMIP5 models in simulating climate over China and the East Asian monsoon // Advances in Atmospheric Sciences. 2020. Vol. 37, no. 10. P. 1102-1118. DOI: 10.1007/s00376-020-2034-y
13. Joyce R.J., Janowiak J.E., Arkin P.A., Xie P. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution // Journal of Hydrometeorology. 2004. Vol. 5, no. 3. P. 487-503. DOI: 10.1175/1525-7541(2004)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2
14. Karbalaee N., Hsu K., Sorooshian S., Braithwaite D. Bias adjustment of infrared-based rainfall estimation using passive microwave satellite rainfall data // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2017. Vol. 122, no. 7. P. 3859-3876. DOI: 10.1002/2016JD026037
15. Kattirai-Boroujerdy P.S., Naeini M.R., Asanjan A.A., Chavoshian A., Hsu K., Sorooshian S. Bias correction of satellite-based precipitation estimations using quantile mapping approach in different climate regions of Iran // Remote Sensing. 2020. Vol. 12, no. 13. P. 2102. DOI: 10.3390/rs12132102
16. Kidd C., Huffman G. Global precipitation measurement // Meteorological Applications. 2011. Vol. 18, no. 3. P. 334-353. DOI: 10.1002/met.284
17. Krajewski W.F., Villarini G., Smith J.A. Radar-rainfall uncertainties: Where are we after thirty years of effort? // Bulletin of the American Meteorological Society. 2010. Vol. 91, no. 1. P. 87-94. DOI: 10.1175/2009BAMS2747.1
18. Maggioni V., Massari C. On the performance of satellite precipitation products in riverine flood modeling: A review // Journal of hydrology. 2018. Vol. 558. P. 214-224. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.01.039
19. Park N.W., Kyriakidis P.C., Hong S. Geostatistical integration of coarse resolution satellite precipitation products and rain gauge data to map precipitation at fine spatial resolutions // Remote Sensing. 2017. Vol. 9, no. 3. P. 255. DOI: 10.3390/rs9030255
20. Piani C., Haerter J.O., Coppola E. Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe // Theoretical and applied climatology. 2010. Vol. 99, no. 1. P. 187-192. DOI: 10.1007/s00704-009-0134-9
21. Ringard J., Seyler F., Linguet L. A quantile mapping bias correction method based on hydroclimatic classification of the Guiana shield // Sensors. 2017. Vol. 17, no. 6. P. 1413. DOI: 10.3390/s17061413
22. Roldin M., Fryd O., Jeppesen J., Mark O., Binning P.J., Mikkelsen P.S., Jensen M.B. Modelling the impact of soakaway retrofits on combined sewage overflows in a 3 km² urban catchment in Copenhagen, Denmark // Journal of Hydrology. 2012. Vol. 452. P. 64-75. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.05.027
23. Tesfagiorgis K., Mahani S.E., Krakauer N.Y., Khanbilvardi R. Bias correction of satellite rainfall estimates using a radar-gauge product—a case study in Oklahoma (USA) // Hydrology and Earth System Sciences. 2011. Vol. 15, no. 8. P. 2631-2647. DOI: 10.5194/hess-15-2631-2011
24. Themeßl M.J., Gobiet A., Leuprecht A. Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models // International Journal of Climatology. 2011. Vol. 31, no. 10. P. 1530-1544. DOI: 0.1002/joc.2168
25. Tian Y., Peters-Lidard C.D., Eylander J.B. Real-time bias reduction for satellite-based precipitation estimates // Journal of Hydrometeorology. 2010. Vol. 11, no. 6. P. 1275-1285. DOI: 10.1175/2010JHM1246.1
26. Upadhyaya S.A., Kirstetter P.E., Gourley J.J., Kuligowski R.J. On the propagation of satellite precipitation estimation errors: From passive microwave to infrared estimates // Journal of hydrometeorology. 2020. Vol. 21, no. 6. P. 1367-1381. DOI: 10.1175/JHM-D-19-0293.1
27. Velasquez P., Messmer M., Raible C.C. A new bias-correction method for precipitation over complex terrain suitable for different climate states: a case study using WRF (version 3.8.1) // Geoscientific Model Development. 2020. Vol. 13, no. 10. P. 5007-5027. DOI: 10.5194/gmd-13-5007-2020

28. Wilks D.S. Statistical methods in the atmospheric sciences // International Geophysics Series. 2011. Vol. 100. 649 с.

29. Xie P., Joyce R., Wu S., Yoo S.-H., Yarosh Y., Sun F., Lin R. Reprocessed, bias-corrected CMORPH global high-resolution precipitation estimates from 1998 // Journal of Hydrometeorology. 2017. Vol. 18, no. 6. P. 1617-1641. DOI: 10.1175/JHM-D-16-0168.1

30. Zambrano-Bigiarini M., Nauditt A., Birkel C., Verbist K., Ribbe L. Temporal and spatial evaluation of satellite-based rainfall estimates across the complex topographical and climatic gradients of Chile // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2017. Vol. 21. P. 1295-1320. DOI: 10.5194/hess-21-1295-2017

References

1. Andreev A.I., Filey A.A., Malkovsky S.I. A Method of Quantitative Rainfall Estimation Based on Himawari-8/9 Measurements. *Cosmic Research*, 2025, vol. 63, suppl. 1, pp. S1-S11. DOI: 10.1134/S0010952525601847

2. Volkova E.V. Estimation of precipitation amount using SEVIRI/Meteosat-9 and AVHRR/NOAA data for the European territory of Russia. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space]*, 2014, vol. 11, no. 4, P. 163 [in Russ.].

3. Gavrilov A.A. Endogennaya geomorfologiya v Tihookeanskom institute geografii: istoriya issledovaniy [Endogenous Geomorphology at the Pacific Institute of Geography: A History of Research]. *Tihookeanskaya geografiya [Pacific geography]*, 2021, no. 3(7), pp. 31-42. DOI 10.35735/26870509_2021_7_31 [in Russ.].

4. Arkin P., Meisner B.N. The Relationship between Large-Scale Convective Rainfall and Cold Cloud over the Western Hemisphere during 1982–1984. *Mon. Weather. Rev.*, 1987, vol. 115, pp. 51-74. DOI: 10.1175/1520-0493(1987)115<0051:TRBLSC>2.0.CO;2

5. Baez-Villanueva O.M., Zambrano-Bigiarini M., Beck H.E., McNamara I., Ribbe L., Nauditt A., Birkel C., Verbist K., Giraldo-Osorio J.D., Thin N.X. RF-MEP: A novel Random Forest method for merging gridded precipitation products and ground-based measurements. *Remote Sensing of Environment*, 2020, vol. 239, p. 111606. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111606

6. Bessho K., Date K., Hayashi M., Ikeda A., Imai T., Inoue H., Kumagai Y., Miyakawa T., Murata H., Ohno T., Okuyama A., Oyama R., Sasaki Y., Shimazu Y., Shimoji K., Sumida Y., Suzuki M., Taniguchi H., Tsuchiyama H., Uesawa D., Yokota H., Yoshida R. An introduction to Himawari-8/9 — Japan's new-generation geostationary meteorological satellites. *J. Meteorological Society of Japan*, ser. II, 2016, vol. 94, is. 2, pp. 151-183. DOI: 10.2151/jmsj.2016-009

7. Boushaki F.I., Hsu K.L., Sorooshian S., Park G.H., Mahani S., Shi W. Bias adjustment of satellite precipitation estimation using ground-based measurement: A case study evaluation over the southwestern United States. *Journal of Hydrometeorology*, 2009, vol. 10, no 5, pp. 1231-1242. DOI: 10.1175/2009JHM1099.1.

8. Chao L., Zhang K., Li Z., Zhu Y., Wang J., Yu Z. Geographically weighted regression based methods for merging satellite and gauge precipitation. *Journal of Hydrology*, 2018, vol. 558, pp. 275-289. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.01.042

9. Chen S., Xiong L., Ma Q., Kim J.S., Chen J., Xu C.Y. Improving daily spatial precipitation estimates by merging gauge observation with multiple satellite-based precipitation products based on the geographically weighted ridge regression method. *Journal of Hydrology*, 2020, vol. 589, pp. 125156. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125156

10. Cleveland W.S. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American statistical association*, 1979, vol. 74, no. 368, pp. 829-836. DOI: 10.1080/01621459.1979.10481038

11. Huffman G.J., Bolvin D.T., Braithwaite D., Hsu K., Joyce R., Kidd C., Nelkin E.J., Sorooshian S., Tan J., Xie P. NASA global precipitation measurement (GPM) integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG). *Algorithm theoretical basis document (ATBD) version*, 2015, vol. 4, no. 26, pp. 30.

12. Jiang D., Hu D., Tian Z., Lang X. Differences between CMIP6 and CMIP5 models in simulating climate over China and the East Asian monsoon. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2020, vol. 37, no. 10, pp. 1102-1118. DOI: 10.1007/s00376-020-2034-y

13. Joyce R.J., Janowiak J.E., Arkin P.A., Xie P. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of hydrometeorology*, 2004, vol. 5, no. 3, pp. 487-503. DOI: 10.1175/1525-7541(2004)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2

14. Karbalaee N., Hsu K., Sorooshian S., Braithwaite D. Bias adjustment of infrared-based rainfall estimation using passive microwave satellite rainfall data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, vol. 122, no. 7, pp. 3859-3876. DOI: 10.1002/2016JD026037
15. Katiraie-Boroujerdy P.S., Naeini M.R., Asanjan A.A., Chavoshian A., Hsu K., Sorooshian S. Bias correction of satellite-based precipitation estimations using quantile mapping approach in different climate regions of Iran. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 13, p. 2102. DOI: 10.3390/rs12132102
16. Kidd C., Huffman G. Global precipitation measurement. *Meteorological Applications*, 2011, vol. 18, no. 3, pp. 334-353. DOI: 10.1002/met.284
17. Krajewski W.F., Villarini G., Smith J.A. Radar-rainfall uncertainties: Where are we after thirty years of effort?. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010, vol. 91, no. 1, pp. 87-94. DOI: 10.1175/2009BAMS2747.1
18. Maggioni V., Massari C. On the performance of satellite precipitation products in riverine flood modeling: A review. *Journal of hydrology*, 2018, vol. 558, pp. 214-224. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.01.039
19. Park N.W., Kyriakidis P.C., Hong S. Geostatistical integration of coarse resolution satellite precipitation products and rain gauge data to map precipitation at fine spatial resolutions. *Remote Sensing*, 2017, vol. 9, no. 3, p. 255. DOI: 10.3390/rs9030255
20. Piani C., Haerter J.O., Coppola E. Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theoretical and applied climatology*, 2010, vol. 99, no. 1, pp. 187-192. DOI: 10.1007/s00704-009-0134-9
21. Ringard J., Seyler F., Linguet L. A quantile mapping bias correction method based on hydroclimatic classification of the Guiana shield. *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 6, p. 1413. DOI: 10.3390/s17061413
22. Roldin M., Fryd O., Jeppesen J., Mark O., Binning P.J., Mikkelsen P.S., Jensen M.B. Modelling the impact of soakaway retrofits on combined sewage overflows in a 3 km² urban catchment in Copenhagen, Denmark. *Journal of Hydrology*, 2012, vol. 452, pp. 64-75. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.05.027
23. Tesfagiorgis K., Mahani S.E., Krakauer N.Y., Khanbilvardi R. Bias correction of satellite rainfall estimates using a radar-gauge product—a case study in Oklahoma (USA). *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, vol. 15, no. 8, pp. 2631-2647. DOI: 10.5194/hess-15-2631-2011
24. Themeßl M. J., Gobiet A., Leuprecht A. Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *International Journal of Climatology*, 2011, vol. 31, no. 10, pp. 1530-1544. DOI: 0.1002/joc.2168
25. Tian Y., Peters-Lidard C.D., Eylander J.B. Real-time bias reduction for satellite-based precipitation estimates. *Journal of Hydrometeorology*, 2010, vol. 11, no. 6, pp. 1275-1285. DOI: 10.1175/2010JHM1246.1
26. Upadhyaya S.A., Kirstetter P.E., Gourley J.J., Kuligowski, R.J. On the propagation of satellite precipitation estimation errors: From passive microwave to infrared estimates. *Journal of hydrometeorology*, 2020, vol. 21, no. 6, pp. 1367-1381. DOI: 10.1175/JHM-D-19-0293.1
27. Velasquez P., Messmer M., Raible C.C. A new bias-correction method for precipitation over complex terrain suitable for different climate states: a case study using WRF (version 3.8. 1). *Geoscientific Model Development*, 2020, vol. 13, no. 10, pp. 5007-5027. DOI: 10.5194/gmd-13-5007-2020
28. Wilks D.S. Statistical methods in the atmospheric sciences. Oxford: Academic press, 3rd ed., 2011, vol. 100.
29. Xie P., Joyce R., Wu S., Yoo S.-H., Yarosh Y., Sun F., Lin R. Reprocessed, bias-corrected CMORPH global high-resolution precipitation estimates from 1998. *Journal of Hydrometeorology*, 2017, vol. 18, no. 6, p. 1617-1641. DOI: 10.1175/JHM-D-16-0168.1
30. Zambrano-Bigiarini M., Nauditt A., Birkel C., Verbist K., Ribb L. Temporal and spatial evaluation of satellite-based rainfall estimates across the complex topographical and climatic gradients of Chile. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2017, vol. 21, pp. 1295-1320. DOI: 10.5194/hess-21-1295-2017