

УДК 551.577

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОШИБКИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ОСАДКОВ РЕАНАЛИЗОМ ERA5 НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

© 2022 г. В. Ю. Григорьев^{a, b, *}, Н. Л. Фролова^a, М. Б. Киреева^a, В. М. Степаненко^c

^aМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

^bИнститут водных проблем РАН, Москва, Россия

^cМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

*e-mail: vadim308g@mail.ru

Поступила в редакцию 20.06.2021 г.

После доработки 28.11.2021 г.

Принята к публикации 12.02.2022 г.

Редкая сеть наземных наблюдений за осадками на территории России и статистическая неоднородность рядов наблюдений на ней обуславливают в ряде исследований предпочтительность использования данных реанализа. Авторы статьи исследовали точность воспроизведения суточных сумм осадков на территории России за 1950–2020 гг. реанализом ERA5 при сравнении с данными наземных наблюдений на 526 метеостанциях, для 457 из которых привлекались также месячные суммы осадков с устраненной систематической ошибкой. Было выявлено, что наименее удовлетворительные результаты реанализ ERA5 показывает по величине систематической ошибки и доле дней с ложно обнаруженными осадками. В среднем по территории России ERA5 завышает количество осадков от 14% летом до 37% весной. При сравнении с откорректированными суммами осадков зимой ERA5 показывает систематическую ошибку близкую к нулю, а также меньшую величину ее пространственной изменчивости. ERA5 также ложно идентифицирует от 30 (зимой и осенью) до 40% (весной и летом) дней без осадков. Величина случайной ошибки в среднем на треть меньше изменчивости суточной суммы осадков (больше весной и летом и меньше осенью и зимой), а доля дней с осадками, корректно выявленная ERA5, составляет 84–89% и в среднем меньше летом, чем в другие сезоны. В целом ERA5 демонстрирует меньшую точность для районов и сезонов с относительно малым количеством дней с осадками и количеством осадков. Наиболее явно эта тенденция прослеживается для систематической ошибки и особенно — для доли дней с ложно обнаруженными осадками.

Ключевые слова: реанализ ERA5, осадки, случайные и систематические ошибки, Россия, пространственно-временная изменчивость

DOI: 10.31857/S2587556622030062

ВВЕДЕНИЕ

Доступность, качество и количество входной метеорологической информации во многом определяют точность гидрологических прогнозов и расчетов. Ее отсутствие препятствует также совершенствованию гидрологических моделей, так как недостаток информации вынуждает переходить от физически обоснованного описания процесса формирования стока к полужемпирическим зависимостям. В зависимости от сложности моделей они могут требовать различной входной информации, однако неизменно включающей в себя атмосферные осадки (P , мм).

В то время как наземные наблюдения за P являются наиболее длительными и точными, что необходимо для оценки изменения климата и ва-

лидации других источников информации, они же имеют ряд существенных недостатков: неравномерная густота сети наблюдений, не всегда достаточная частота измерений, пропуски в их рядах, инструментальная неоднородность данных. Так, стандартная программа наблюдений на метеостанциях России предусматривает измерение осадков дважды в сутки, что позволяет фиксировать количество выпавших осадков, но не интенсивность отдельных событий, что важно, к примеру, для расчета скорости бассейновой эрозии (Benavidez et al., 2018). Еще одной проблемой при использовании данных наземных наблюдений является необходимость их интерполяции и осреднения по территории, что сопряжено с дополнительными ошибками (Кислов и др., 2001).

Атмосферный реанализ предполагает использование результатов наземных и спутниковых наблюдений в процессе усвоения данных в моделях, что позволяет сочетать в итоговом продукте достоинства различных источников данных. Одними из наиболее широко используемых реанализов является продукция Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). ERA5 (ECMWF Re-Analysis 5) представляет собой продукт пятого поколения, использующий четырехмерную вариационную ассимиляцию данных наблюдений (Hersbach et al., 2020).

Возможность использования данных об осадках из ERA5 (P_{ERA5}) была оценена в ряде работ как на глобальном, так и на региональном уровнях, в том числе и для отдельных районов России. Так, (Amjad et al., 2020; Gleixner et al., 2020; Hersbach et al., 2020; Nogueira, 2020) показали уменьшение систематической и случайной ошибок P в ERA5 по сравнению с предыдущей версией реанализа (ERA-Interim), за исключением ряда регионов (Гималаи, Анды, некоторые районы Тихого океана, Турция). Также для отдельных регионов было выявлено, что ERA5 хуже воспроизводит конвективные осадки по сравнению с обложными, зимние осадки по сравнению с летними, умеренные и сильные осадки по сравнению со слабыми и осадки в районах с большим уклоном местности по сравнению с осадками в районах с относительно пологими склонами (Amjad et al., 2020; An et al., 2020; Beck et al., 2019; Singh et al., 2021). На примере Европы было показано, что степень согласованности P_{ERA5} и баз данных, основанных на наземных наблюдениях, во многом зависит от густоты сети наземных наблюдений (Rivoire et al., 2021). В целом, оценка точности сеточных архивов по данным редкой сети наземных наблюдений дает завышенную на десятки процентов (в зависимости от выбранной метрики) величину ошибки (Tang et al., 2018). На примере юга Западной Сибири было показано (Vogoray et al., 2021), что ошибки P_{ERA5} имеют выраженный сезонный ход и зависят от средней величины P и в значительной степени могут быть устранены с помощью простых линейных методов коррекции. Для территории США была показана возможность коррекции P_{ERA5} на основе данных радарных наблюдений, что позволило совместить высокое пространственное разрешение радарных наблюдений с длительным периодом покрытия ERA5 (Emmanouil et al., 2021).

Целью нашей работы является дальнейшее исследование воспроизводимости P реанализом ERA5, а именно: рассмотрение более длительно, чем в предыдущих исследованиях периода (1950–2020 гг.), выявление географических особенностей распределения ошибок в пределах

России и анализ связи ошибок P_{ERA5} с режимом выпадения осадков.

МАТЕРИАЛЫ

Данные ERA5 находятся в свободном доступе¹. Исходные данные ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 1 ч) были агрегированы до суточного разрешения. При этом, в связи с тем, что суточные данные по осадкам на метеостанциях рассчитываются не для суток по UTC, а с некоторым сдвигом, зависящем от часового пояса и кратным 3 ч, суточные величины P_{ERA5} также рассчитывались со сдвигом. Используемая версия реанализа ERA5 является предварительной, в частности в ней недостоверно воспроизводится интенсивность тропических циклонов². Однако мы верим, что полученные результаты будут релевантны и для окончательной версии ERA5.

Суточные данные по P и температуре воздуха на 526 метеостанциях в пределах Российской Федерации были предоставлены ВНИИГМИ-МЦД³ и находятся в открытом доступе. Средняя продолжительность рядов наблюдений – 66.2 года, 10% метеостанций имеют ряды продолжительностью в 55 лет или меньше, минимальная продолжительность – 33 года. Ряды P инструментально неоднородны по величине среднего (Groisman et al., 1991). За 1950–2020 гг. основным источником неоднородности является ввод поправок на смачивание осадкомерного ведра, начиная с 1966 г. Величина поправки составляет 0.1 мм для твердых осадков и 0.2 мм для жидких и смешанных. Поскольку эта работа сфокусирована на исследовании данных ERA5, перед сравнением суточные данные по осадкам с метеостанций за период до 1966 г. были откорректированы. Тип осадков определялся по среднесуточной температуре воздуха, измеренной на метеостанциях. При температуре воздуха менее 0°C осадки считались твердыми, в остальных случаях жидкими. В случае, если измеренная величина P составляла 0.1 мм, принималось, что в эти сутки поправка вводилась один раз. Для дней, когда измеренная величина $P > 0.1$ мм, принималось, что поправка вводилась 1.5 раза. Таким образом, при измеренных $P = 0.1$ мм величина поправок составляла 0.1 и 0.2 мм, а при измеренных $P > 0.1$ мм – 0.15 и 0.3 мм для твердых и жидких осадков соответственно.

Вместе с тем, помимо смачивания осадкомерного ведра наземные наблюдения могут не учитывать ряд других источников погрешностей, которые в целом ведут к занижению величины P .

¹ <https://cds.climate.copernicus.eu/#!/home> (дата обращения 26.03.2021).

² [https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5+back+extension+1950-1978+\(Preliminary+version\)%3A+tropical+cyclones+are+too+intense](https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5+back+extension+1950-1978+(Preliminary+version)%3A+tropical+cyclones+are+too+intense) (дата обращения 26.03.2021).

³ <http://meteo.ru/data> (дата обращения 26.03.2021).

Поэтому для расчета величины систематической ошибки также использовались месячные суммы P с устраненной систематической ошибкой (Vogdanova and Gavrilova, 2008), на 457 метеостанциях за 1950–2015 гг., доступные через сайт ВНИИГМИ-МЦД.

МЕТОДЫ

Поскольку, за редким исключением, в пределах каждой ячейки $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ мы располагали не более, чем одной метеостанцией, результаты измерений на метеостанциях (P_g) сопоставлялись с величиной P_{ERA5} из ближайшего узла сетки. На основе разности между P_g и P_{ERA5} для каждого сезона за каждый год и в целом за 1950–2020 гг. рассчитывались 4 метрики, отражающие степень совпадения между данными. Две метрики – относительная систематическая ошибка ($ubias$) и относительная случайная ошибка ($u\sigma$) – показывают, насколько совпадает величина осадков по двум наборам данных. Величина $ubias$ указывает на то, завышает ли ERA5 количество осадков ($ubias > 0$) или занижает ($ubias < 0$), в то время как $u\sigma$ указывает, насколько согласованы изменения P по двум базам данных во времени. Еще две метрики – вероятность обнаружения (POD) и вероятность ложного обнаружения (FAR) – были использованы, чтобы определить способность ERA5 выявлять случаи выпадения осадков. Эти метрики выражаются как

$$ubias = \sum_{i=1}^n (P_{ERA5i} - P_{gi}) / (\bar{P}_g n), \tag{1}$$

$$u\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_{ERA5i} - P_{gi} - ubias \bar{P}_g)^2} / \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_{gi} - \bar{P}_g)^2}, \tag{2}$$

$$POD = \frac{H}{H + M}, \tag{3}$$

$$FAR = \frac{F}{F + H}, \tag{4}$$

где n – число дней за сезон за 1950–2020 гг., P_{ERA5i} – осадки, определенные по ERA5 в i -й день, P_{gi} – осадки, измеренные на метеостанции в i -й день, \bar{P}_g – среднеголетняя величина P_g , H – число дней, в которые осадки были зафиксированы как ERA5, так и метеостанцией, M – число дней, когда осадки были зафиксированы метеостанцией, но не были зафиксированы ERA5, F – число дней, когда осадки были зафиксированы ERA5, но не были зафиксированы метеостанцией. При расчете POD и FAR учитывались P_{ERA5} и P_g более 1 мм.

Отклонения $ubias$, $u\sigma$, FAR и POD от идеальных значений (0, 0, 1 и 0 соответственно) связаны не только с наличием ошибок в рядах P_{ERA5} , но и с

тем, что P_g – это величина осадков в точке, в то время как P_{ERA5} – это усредненная величина для ячейки $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Проведенное в (Tang et al., 2018) исследование показало, что, когда используется лишь одна метеостанция в ячейке, при сравнении с осредненными по этой ячейке данными нескольких метеостанций, $u\sigma$ и FAR оказываются завышенными.

В качестве характеристик режима выпадения осадков использовались величины \bar{P}_g и WD (wet days – доля дней с P_g более 1 мм).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Закономерности распределения $ubias$, $u\sigma$, FAR и POD . В среднем для всех сезонов P_{ERA5} оказывается завышенной. Так, в зимний период для 85.7% станций $ubias > 0$, а для 72% $ubias > 0.1$, при среднем $ubias$ в 0.33 (медиане 0.23). Области с $ubias < 0.1$ занимают большую часть Азиатской территории России (АТР), помимо ее южных районов, восток Европейской территории России (ЕТР), а также черноморское побережье Кавказа (рис. 1а).

В остальной части страны $ubias$ для большинства станций более 0.1, однако распределение этой величины пространственно неоднородно – станции с $ubias < 0.1$ располагаются в пределах нескольких десятков километров от станций с $ubias > 0.55$.

Весной (рис. 1б) выявлена наибольшая величина $ubias$, в среднем составляющая 0.5. Лишь у 5.1% станций $ubias$ не превышает 0.1. Метеостанции с $ubias < 0.1$ расположены преимущественно в районе Кавказа. При этом, как и зимой, они соседствуют с метеостанциями с $ubias > 0.55$. Наибольшие величины $ubias$ характерны для Восточной Сибири, Дальнего Востока (в меньшей степени Приморья) и арктического побережья. Наименьшие величины $ubias$, преимущественно в диапазоне от 0.2 до 0.35, свойственны западу ЕТР. Летом (рис. 1в) величины $ubias$ наименьшие, в среднем составляющие 0.2, а для 38% метеостанций – не превышающие 0.1. Величины $ubias$ более 0.2 характерны лишь для арктического побережья, северо-востока России и восточной части Кавказа. Осенью (рис. 1г) $ubias$ составляет порядка 0.3, а его пространственное распределение занимает промежуточное положение между летним и зимним: наибольшие величины наблюдаются как на юге Восточной Сибири, так и в северо-восточной части Дальнего Востока. При этом проявляются области относительно небольших значений $ubias$ на севере Западной и Восточной Сибири, а также в западной части ЕТР, характерные для зимнего периода.

Использование месячных сумм осадков с устраненной систематической ошибкой при оценке $ubias$ ведет к уменьшению оценки систе-

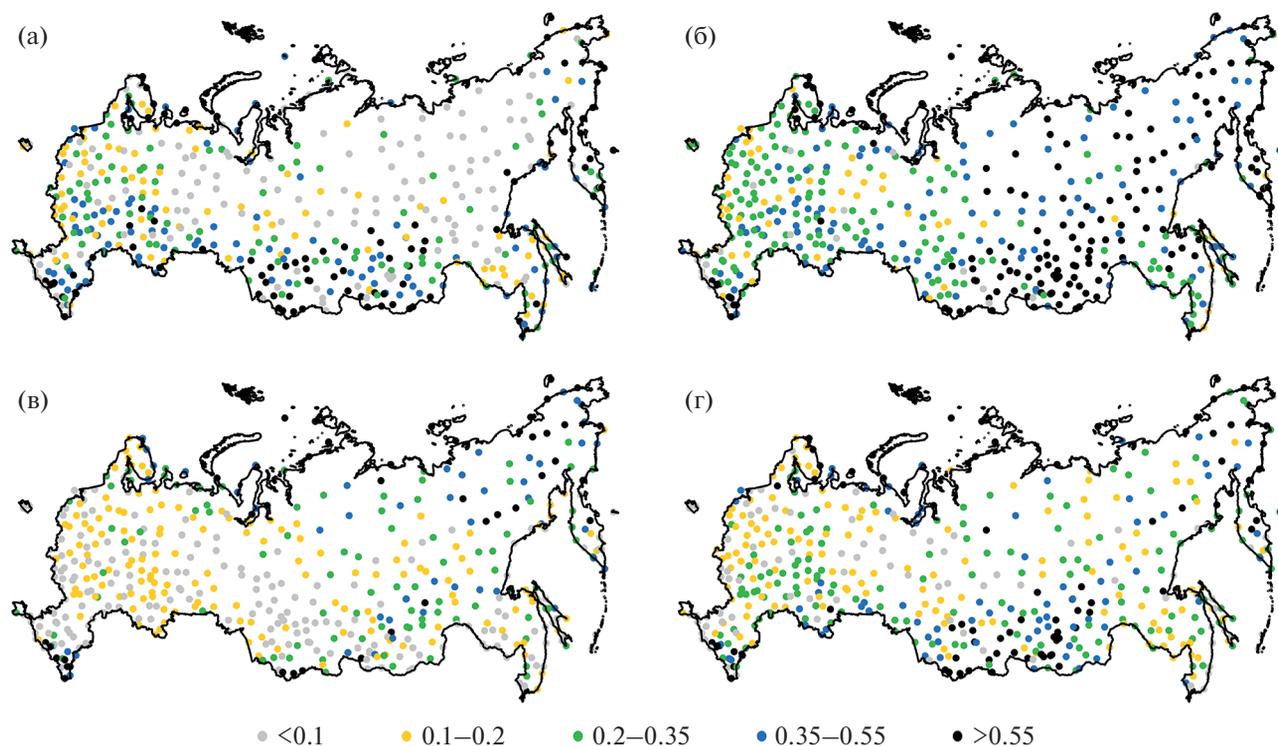


Рис. 1. Распределение величины *ubias*: (а) – зима, (б) – весна, (в) – лето, (г) – осень.

матической ошибки P_{ERA5} во все сезоны (рис. 2). В зимний период использование P_g с устраненной систематической ошибкой привело к уменьшению медианы *ubias* с 0.23 до -0.01 . Также уменьшился разброс *ubias* – разница между 75 и 25% квантилем *ubias* (соответственно верхняя и нижние границы закрашенных прямоугольников на рис. 2) уменьшилась с 0.35 до 0.28. Несмотря на уменьшение 25% квантиля *ubias*, выросла также минимальная величина *ubias* – с -0.67 до -0.58 . Максимальная величина уменьшилась с 3.40 до 2.89. Для других сезонов также произошло уменьшение *ubias*, хотя и не столь заметное. Наименее значимый рост точности был получен для лета. Медиана уменьшилась с 0.13 до 0.07, а разброс между 75 и 25% квантилем уменьшился с 0.17 до 0.15.

Особенности пространственного распределения $u\sigma$ также имеют выраженные закономерности (рис. 3). В зимний период (см. рис. 3а) величина $u\sigma$ минимальна среди всех сезонов. Для более, чем 40% метеостанций $u\sigma$ находится в диапазоне от 0.5 до 0.66. Значения $u\sigma > 0.66$ преобладают лишь на арктическом побережье, на востоке Кавказского региона, юге Восточной Сибири, на территории Чукотки и Камчатки. Весной (см. рис. 3б) медиана $u\sigma$ увеличивается с 0.62 до 0.70, однако области с большими/меньшими значениями $u\sigma$ сохраняются. Изменения в закономерностях пространственного распределения $u\sigma$ происходят летом (см. рис. 3в). Исчезает область с повышенными

величинами $u\sigma$ на арктическом побережье ЕТР, в результате чего распределение $u\sigma$ на ЕТР становится практически зональным, с направлением роста с северо-запада на юго-восток. Повышенные значения $u\sigma$ наблюдаются для юга Западной и Восточной Сибири (без района Забайкалья, где они становятся близки к таковым для юга Дальнего Востока). Медиана $u\sigma$ достигает максимума в 0.79. Осенью распределение $u\sigma$ близко к зимнему (см. рис. 3г), с несколько большими значениями $u\sigma$ на ЕТР и меньшими на юге Восточной Сибири.

Зимой максимальные значения *POD* наблюдаются на ЕТР, в Западной Сибири и на Дальнем Востоке, недалеко от Тихого океана. Для половины станций *POD* превышает 0.87 (рис. 4а), а для трети – 0.9. Весной распределение *POD* наиболее равномерно (рис. 4б). Для 57% станций *POD* находится в диапазоне от 0.825 до 0.9. Меньшие значения характерны лишь для севера Восточной Сибири и Дальнего Востока, а также для района Каспийского моря. Летом (рис. 4в) *POD* в целом по российской территории достигает минимальных величин. В пределах ЕТР *POD* уменьшается с севера на юг, достигая минимума в районе Прикаспия. На АТР величина *POD* распределена более однородно, с максимумом в прибрежных районах Тихого океана. Распределение осенью (рис. 4г) практически идентично распределению весной. Значительно более низкую точность P_{ERA5} демонстрирует по величине *FAR* (рис. 5). Зимой $FAR < 0.25$

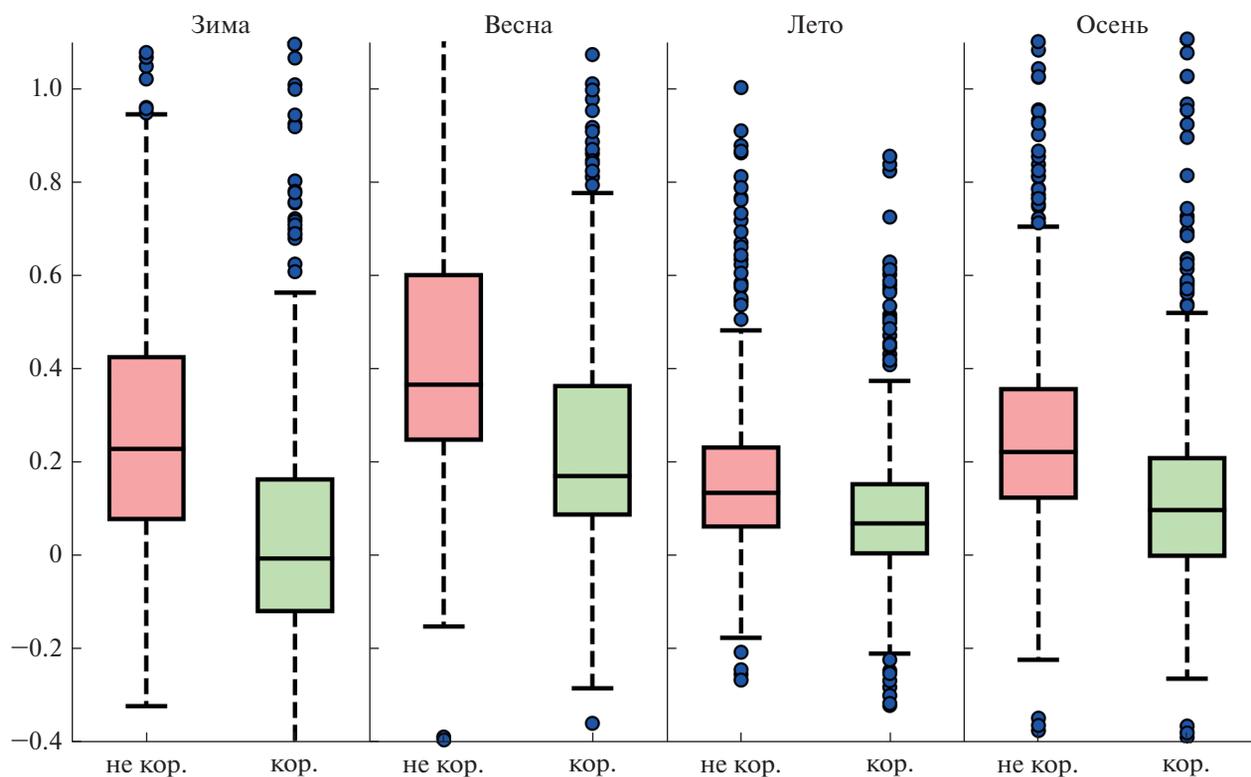


Рис. 2. Распределение *ubias* среди 457 метеостанций на территории России по данным измерений на метеостанциях без устраненной систематической ошибки (не кор. – не скорректированные) и с устраненной систематической ошибкой (кор. – скорректированные).

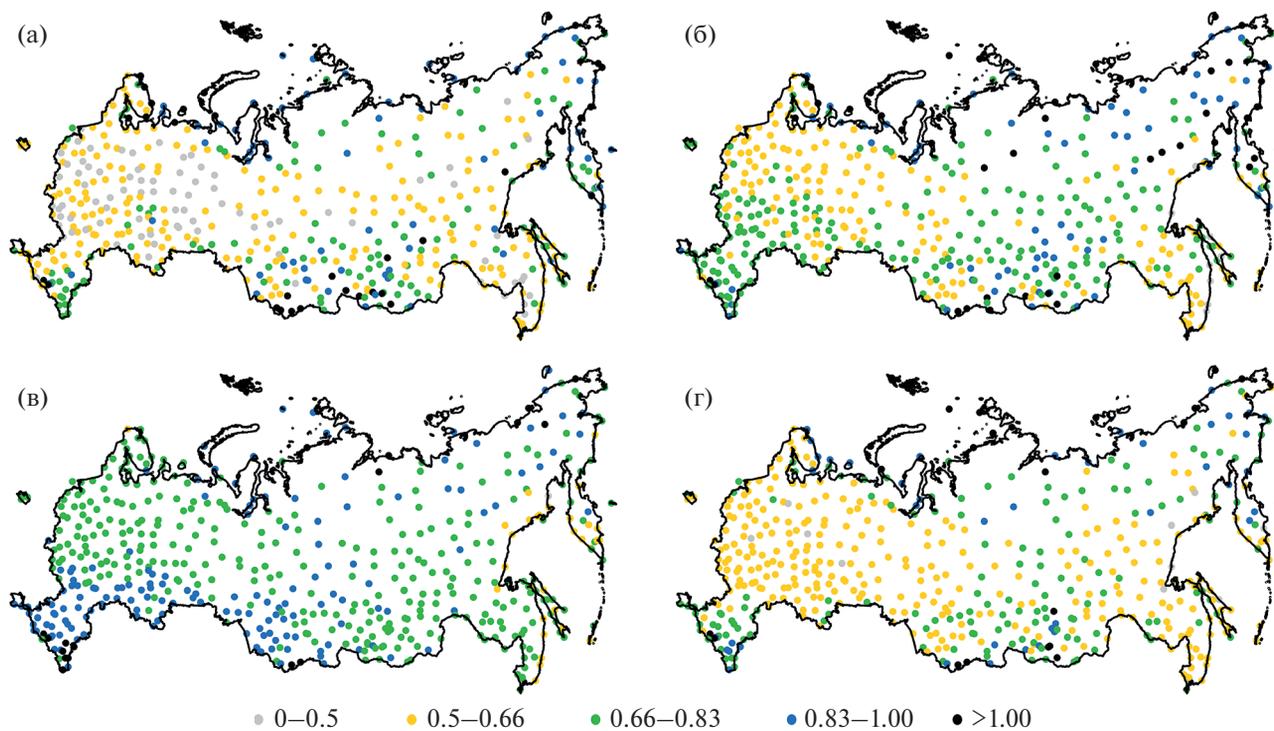


Рис. 3. Распределение величины *ис*: (а) – зима, (б) – весна, (в) – лето, (г) – осень.

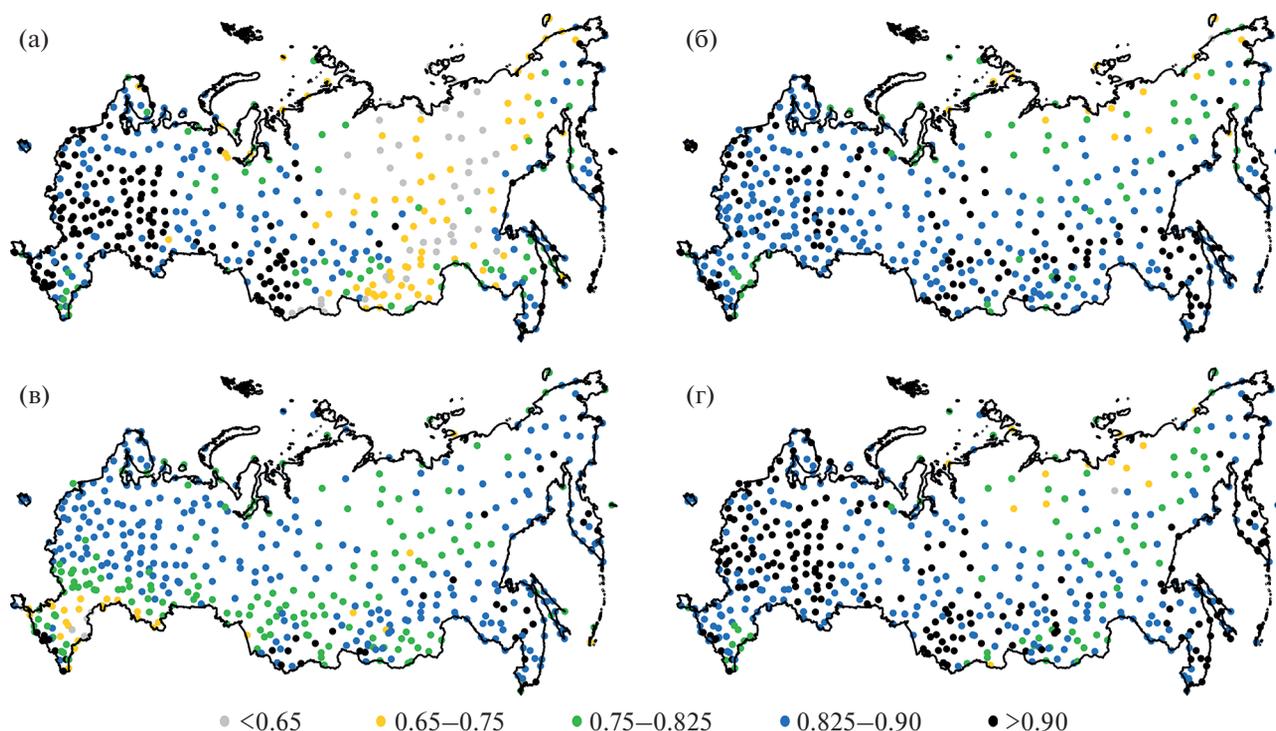


Рис. 4. Распределение *POD*: (а) – зима, (б) – весна, (в) – лето, (г) – осень.

было выявлено лишь у 21.3% всех станций (см. рис. 5а). Для остальных сезонов эта доля еще меньше. Так, летом $FAR < 0.25$ было выявлено лишь для одной станции (см. рис. 5в). Зимой минимальные значения FAR наблюдаются на севере России, не считая прибрежных районов. Максимальные величины характерны для юга ЕТР, Западной и Восточной Сибири. Весной FAR увеличивается по всей территории России (см. рис. 5б). Минимальные величины в диапазоне от 0.25 до 0.35 наблюдаются на севере ЕТР и Западной Сибири. Максимум FAR приходится на район Забайкалья и Прикаспия, где FAR в среднем превышает 0.5. Летом на ЕТР наблюдается небольшой рост FAR по сравнению с весной, однако на АТР FAR уменьшается до величин порядка 0.35–0.45. Особенностью летнего периода также является присутствие выраженной области повышенных величин FAR лишь на северо-востоке АТР и выраженный рост FAR с севера на юг на ЕТР. Ситуация осенью как по медианной величине FAR (0.32), так и по особенностям пространственного распределения близка к зимней.

Влияние режима выпадения осадков на пространственное распределение $ubias$, $u\sigma$, FAR и POD . Изменчивость метрик ошибок P_{ERA5} как в пространстве, так и во времени связана с особенностями выпадения режима осадков. Величина $ubias$ не демонстрирует тесной связи с \bar{P}_g , однако максимальная величина $ubias$ лимитируется и об-

ратно пропорциональна \bar{P}_g (рис. 6). При этом $bias$ ($\bar{P}_g ubias$) практически независима от \bar{P}_g , так, коэффициент детерминации R^2 не превышает 0.07 для всех сезонов. Схожая ситуация характерна и для зависимости $u\sigma$ от WD – величина WD лимитирует лишь максимальную величину $u\sigma$, но столь явной, как для \bar{P}_g и $ubias$, зависимости нет. Наиболее явно прослеживаются зависимости POD и FAR от WD . POD показывает явную положительную связь с WD , однако эта связь не линейна. В значительной степени WD определяет не среднюю, а минимальную величину POD . FAR демонстрирует наиболее однозначную связь с величиной WD , в меньшей степени характерную для зимы.

Характер зависимости $ubias$, $u\sigma$, POD и FAR от изменения \bar{P}_g и WD во времени схож с изменением в пространстве. Для количественной характеристики тесноты этой связи они были аппроксимированы полиномом второй степени. Распределение полученных коэффициентов R^2 представлено на рис. 7.

Для более чем половины метеостанций прослеживается зависимость между количеством осадков в году за какой-либо сезон и $ubias$. Чем больше отрицательная аномалия P_g , тем больше $ubias$. При этом наиболее заметна эта тенденция весной. Практически не показали зависимости $u\sigma$ и

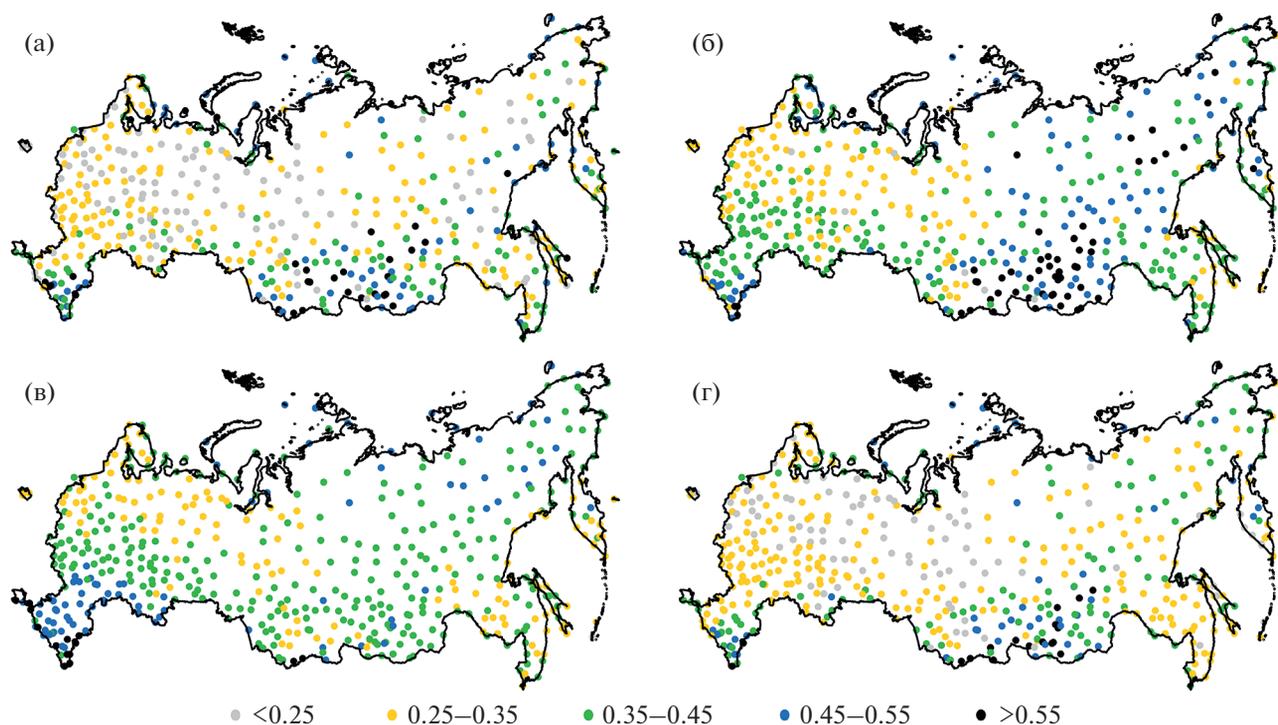


Рис. 5. Распределение FAR: (а) – зима, (б) – весна, (в) – лето, (г) – осень.

POD от WD. Тесную связь с WD демонстрирует FAR. По мере роста числа дней с осадками снижается вероятность ложного обнаружения осадков ERA5. Так же, как и для P_g и $ubias$, эта связь наиболее четко прослеживается весной.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выявленная нами зависимость между $ubias$ и \bar{P}_g связана с тем, что $bias$ практически не зависит от \bar{P}_g . Это при достаточно малых \bar{P}_g приводит к тому, что ERA5 может завышать среднюю за сезон сумму осадков в несколько раз (до 6.3 раза весной на станции Мугур-Аксý). Факт завышения суммы осадков ERA5, как и его предшественниками, был выявлен в ряде исследований (Hersbach et al., 2020; Nogueira, 2020). Так, согласно (Nogueira, 2020), ERA5 в среднем для мира завышает P на 0.22 мм/сут. Среди 526 рассмотренных в работе метеостанций средняя величина $bias$ ERA5 составила 0.27 мм/сут. Однако, использование месячных сумм осадков с устраненной систематической ошибкой в качестве эталонных уменьшает эту величину до 0.12 мм/сут. Одной из особенностей изменчивости $ubias$ в пределах России является максимум весной, а не зимой, как в Китае (Jiang et al., 2020) или на значительной части Европы (Rivoire et al., 2021). При этом, если при оценке $ubias$ использовать сумму осадков с уstra-

ненной систематической ошибкой (см. рис. 2), то минимума величина $ubias$ достигает зимой. Вместе с тем, это хорошо согласуется с оценками, полученными для Канадских Прерий (Betts et al., 2019). Справедливость введения ряда поправок для оценки сумм осадков за длительный (месяц и более) период была подтверждена как для территории России (Bogdanova and Gavrilova, 2008), так и мира (Sun et al., 2020), в том числе на основе данных спутниковой гравиметрии (Behrangi et al., 2019). В среднем зимой на территории России выпадает наименьшее количество осадков, что скорее способствует завышению их суммы ERA5 именно в зимний сезон. Поэтому вероятно, что меньшая величина $ubias$ зимой связана с тем, что ERA5 лучше описывает процесс формирования осадков именно в этот сезон, когда минимальна доля конвективных осадков (Chernokulsky et al., 2019), а атмосферная циркуляция во многом обусловлена состоянием центров действия атмосферы над Атлантикой и Азией (Жаков, 1982). Косвенно это подтверждается тем фактом, что случайная ошибка P_{ERA5} также минимальна зимой (средние 0.67, медиана 0.62) и максимальна летом (0.80 и 0.79 соответственно), что характерно и для территории США (Beck et al., 2019). Вместе с тем, зимой на территории России также наблюдается минимум средней интенсивности осадков, а как показано в (Rivoire et al., 2021), ERA5, как правило, хуже согласуется с данными наземных изме-

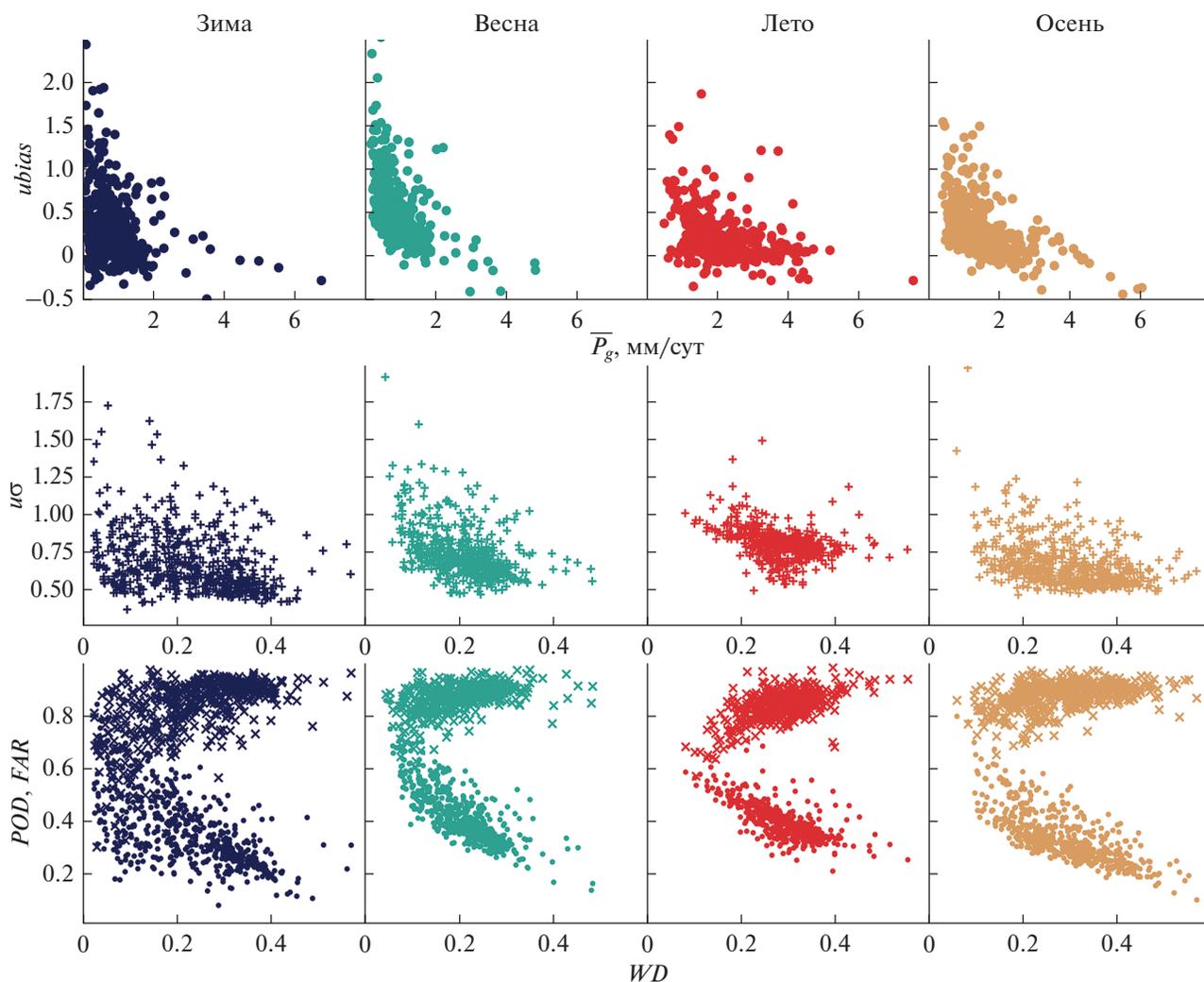


Рис. 6. Зависимость среднегогодовой величины $ubias$ от $\overline{P_g}$ и среднегогодовых величин $u\sigma$, FAR (точки) и POD (крестики) — от WD .

рений при высокой интенсивности осадков, по крайней мере для территории Европы.

Летом, в среднем по показателям POD и FAR , ERA5 показывает наименьшую способность фиксировать выпадение осадков, хотя наименьшая величина POD была выявлена зимой, а максимальная величина FAR — весной. Оба POD и FAR показали наличие тесной связи с WD , как в пространстве (см. рис. 6), так и во времени (см. рис. 7). Однако, в связи с несимметричным распределением отклонений FAR и, особенно, POD вблизи 0 и 1, ее оценка по величине R^2 указывает на отсутствие таковой. При этом независимо от сезона ERA5 завышает количество дней с осадками, в результате чего более трети фиксируемых случаев выпадения осадков по ERA5 оказываются ложными. Для территории Европы было показано,

что ERA5 наиболее существенно завышает WD в весенне-летний период и в более аридных, южных районах (Rivoire et al., 2021). Схожий характер пространственно-временной изменчивости на ЕТР имеет и FAR . Наиболее заметно эта тенденция проявляется для аридных регионов (см. рис. 4–5), где ERA5 может завышать число дней с осадками в несколько раз. При этом ERA5 в значительно меньшей степени завышает сумму осадков по сравнению с количеством дней с осадками. Отметим, однако, что оценка точности сеточных архивов по данным точечных наблюдений за осадками может приводить к завышению величины FAR на десятки процентов (Tang et al., 2018). Несмотря на то, что WD влияет на величину POD и FAR , его связь с $u\sigma$ практически не прослеживается (см. рис. 6, 7). Вероятно, это связано с тем,

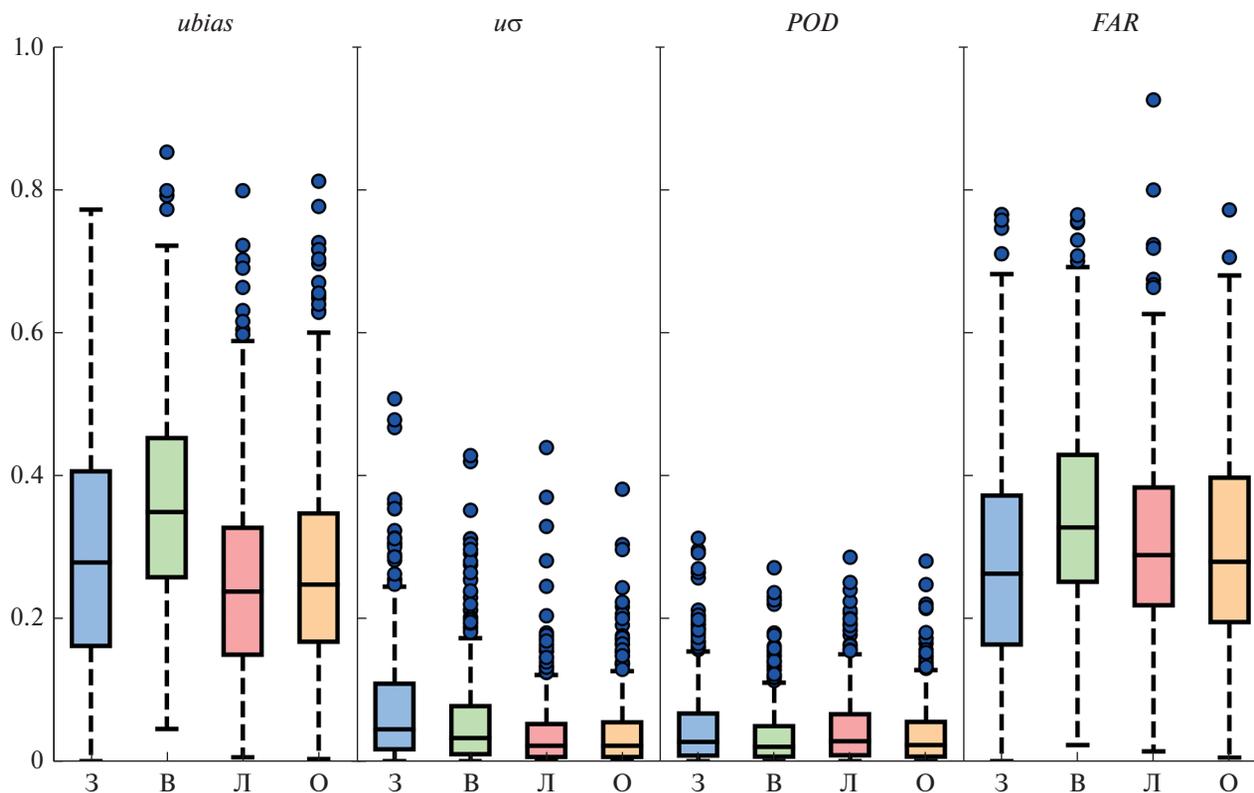


Рис. 7. Распределение R^2 среди 526 метеостанций при аппроксимации зависимости ежегодных величин *ubias* от P_g и ежегодных величин $u\sigma$, *FAR* и *POD* от *WD* полиномом второй степени.

что при уменьшении *WD* увеличивается и изменчивость P_g .

ВЫВОДЫ

ERA5 является первым реанализом, имеющим высокое пространственно-временное разрешение, при этом покрывающим достаточно длительный период, сопоставимый с продолжительностью наблюдений на многих метеостанциях, и не имеющий нарушений однородности рядов в связи со сменой методов расчета или измерений (Hersbach et al., 2020). Низкая густота метеостанций и неоднородность рядов наблюдений делают реанализ одним из предпочтительных источников информации о величине осадков.

Сравнение осадков по данным наблюдений на метеостанциях и ERA5 показало, что ERA5 в большинстве случаев завышает количество осадков и количество дней с осадками, что наиболее заметно в аридных районах и в относительно сухие сезоны. Вместе с тем, ERA5 фиксирует большинство случаев выпадения осадков, а величина случайной ошибки не превышает изменчивости суточного количества осадков. В целом по четырем рассмотренным метрикам минимальная ве-

личина ошибок характерна для северо-запада ЕТР, а максимальная — для Прикаспия и горных районов. В среднем для территории России систематическая ошибка демонстрирует минимум зимой и максимум весной. Для случайной ошибки характерен минимум зимой и осенью, а максимум летом. Минимальная доля дней с ложно идентифицированными случаями выпадения осадков наблюдается осенью.

Количество осадков и количество дней с осадками в значительной степени определяют максимально возможную величину систематических и случайных ошибок, доли дней с верно идентифицированным отсутствием/наличием осадков. Однако, однозначная связь была выявлена лишь для доли ложно идентифицированных дней без осадков и количества дней с осадками (как в пространстве, так и во времени) и между количеством осадков за сезон и величиной систематической ошибки.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 20-05-00773 в части оценки точности данных реанализа и грантов РНФ № 21-47-00008 в части анализа данных

осадков в весенний период и № 19-77-10032 в части методов расчетов и использования данных сеточных архивов.

FUNDING

The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 20-05-00773; reanalysis accuracy estimate) and by the Russian Science Foundation grants nos. 21-47-00008 (spring precipitation variability analysis) and 19-77-10032 (calculation methods and use of grid archives data).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Жаков И.С.* Общие закономерности режима тепла и увлажнения на территории СССР. Л.: Гидрометеопиздат, 1982. 231 с.
- Кислов А.В., Китаев Л.М., Константинов И.С.* Статистическая структура крупномасштабных особенностей поля снежного покрова // Метеорология и гидрология. 2001. № 8. С. 98–104.
- Amjad M., Yilmaz M.T., Yucel I., Yilmaz K.K.* Performance evaluation of satellite- and model-based precipitation products over varying climate and complex topography // *J. Hydrol.* 2020. V. 584. P. 124707. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124707>
- An Y., Zhao W., Li C., Liu Y.* Evaluation of Six Satellite and Reanalysis Precipitation Products Using Gauge Observations over the Yellow River Basin, China // *Atmosphere.* 2020. V. 11. № 11. P. 1223. <https://doi.org/10.3390/atmos11111223>
- Beck H.E., Pan M., Roy T., Weedon G.P., Pappenberger F., Dijk A.I.J.M. Van, Huffman G.J., Adler R.F., Wood E.F.* Daily evaluation of 26 precipitation datasets using Stage-IV gauge-radar data for the CONUS // *Hydrol. and Earth Sys. Sci.* 2019. V. 23. № 1. P. 207–224. <https://doi.org/10.5194/hess-23-207-2019>
- Behrangi A., Singh A., Song Y., Panahi M.* Assessing Gauge Undercatch Correction in Arctic Basins in Light of GRACE Observations // *Geophys. Res. Lett.* 2019. V. 46. № 20. P. 11358–11366. <https://doi.org/10.1029/2019GL084221>
- Benavidez R., Jackson B., Maxwell D., Norton K.* A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): With a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates // *Hydrol. and Earth Sys. Sci.* 2018. V. 22. № 11. P. 6059–6086. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6059-2018>
- Betts A.K., Chan D.Z., Desjardins R.L.* Near-Surface Biases in ERA5 Over the Canadian Prairies // *Frontiers in Environ. Sci.* 2019. V. 7. P. 129. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00129>
- Bogdanova E.G., Gavrilova S.Y.* Correction of the precipitation time series nonhomogeneity caused by replacement of the Nipher shielded rain gauge by a Tretyakov precipitation gauge // *Russian Meteorol. and Hydrol.* 2008. V. 33. № 8. P. 525–536. <https://doi.org/10.3103/S1068373908080074>
- Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., Bulygina O., Mokhov I.I., Semenov V.A.* Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // *Environ. Res. Lett.* 2019. V. 14. № 4. P. 045001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafb82>
- Emmanouil S., Langousis A., Nikolopoulos E.I., Anagnostou E.N.* An ERA-5 Derived CONUS-Wide High-Resolution Precipitation Dataset Based on a Refined Parametric Statistical Downscaling Framework // *Wat. Res. Res.* 2021. V. 57. № 6. P. e2020WR029548. <https://doi.org/10.1029/2020WR029548>
- Gleixner S., Demissie T., Diro G.T.* Did ERA5 improve temperature and precipitation reanalysis over East Africa? // *Atmosphere.* 2020. V. 11. № 9. P. 996. <https://doi.org/10.3390/atmos11090996>
- Groisman P.Y., Koknaeva V.V., Belokrylova T.A., Karl T.R.* Overcoming biases of precipitation measurement: a history of the USSR experience // *Bulletin of the American Meteorol. Soc.* 1991. V. 72. № 11. P. 1725–1733. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1991\)072<1725:OBOPMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1991)072<1725:OBOPMA>2.0.CO;2)
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al.* The ERA5 global reanalysis // *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.* 2020. V. 146. № 730. P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Jiang Q., Li W., Fan Z., He X., Sun W., Chen S., Wen J., Gao J., Wang J.* Evaluation of the ERA5 reanalysis precipitation dataset over Chinese Mainland // *J. Hydrol.* 2021. V. 595. P. 125660. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125660>
- Nogueira M.* Inter-comparison of ERA-5, ERA-interim and GPCP rainfall over the last 40 years: Process-based analysis of systematic and random differences // *J. Hydrol.* 2020. V. 583. P. 124632. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124632>
- Rivoire P., Martius O., Naveau P.A.* Comparison of Moderate and Extreme ERA-5 Daily Precipitation With Two Observational Data Sets // *Earth and Space Sci.* 2021. V. 8. № 4. P. e2020EA001633. <https://doi.org/10.1029/2020EA001633>
- Singh T., Saha U., Prasad V.S., Gupta M.D.* Assessment of newly-developed high resolution reanalyses (IMDAA, NGFS and ERA5) against rainfall observations for Indian region // *Atmospher. Res.* 2021. V. 259. P. 105679. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105679>
- Sun S., Shi W., Zhou S., Chai R., Chen H., Wang G., Zhou Y., Shen H.* Capacity of satellite-based and reanalysis precipitation products in detecting long-term trends across Mainland China // *Remote Sens.* 2020. V. 12. № 18. P. 2902. <https://doi.org/10.3390/RS12182902>
- Tang G., Behrangi A., Long D., Li C., Hong Y.* Accounting for spatiotemporal errors of gauges: A critical step to evaluate gridded precipitation products // *J. Hydrol.* 2018. V. 559. P. 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.057>
- Voropay N., Ryazanova A., Dyukarev E.* High-resolution bias-corrected precipitation data over South Siberia, Russia // *Atmospher. Res.* 2021. V. 254. P. 105528. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105528>

Spatial and Temporal Variability of ERA5 Precipitation Accuracy over Russia

V. Yu. Grigorev^{1, 2, *}, N. L. Frolova¹, M. B. Kireeva¹, and V. M. Stepanenko³

¹ *Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

² *Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³ *Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia*

*e-mail: vadim308g@mail.ru

Sparse rain gauge grid over Russia and instrumental heterogeneity of the measurements make use of reanalysis data more suitable for some researches. We examined the accuracy of daily precipitation by ERA5 over Russia in 1950–2020 against the gauge observations over 526 locations, including 457 locations with bias-corrected observations. The main flaws of ERA5 precipitations are overestimation of their amount and too high number of days with false detected precipitations. On average, ERA5 overestimate precipitation amount from 14% in summer to 37% in spring. Comparison with bias-corrected observations for ERA5 shows the least systematic error in winter and more even spatial distribution of the error. ERA5 false detected from 30% (winter and fall) to 40% (spring and summer) days without precipitation. However, the random error in general is less than 2/3 of daily precipitation variability. The error is more in spring and summer and less in winter and fall. The share of days with precipitation identified by ERA5 is about 84–89%. The share in general less in summer than in other seasons. Overall, ERA5 shows less accuracy in dry area with few days with precipitation. The tendency is most pronounce for systematic error and for share of days with false identified precipitations.

Keywords: ERA5, precipitations, systematic and random error, Russia, spatio-temporal variability

REFERENCES

- Amjad M., Yilmaz M.T., Yucel I., Yilmaz K.K. Performance evaluation of satellite- and model-based precipitation products over varying climate and complex topography. *J. Hydrology*, 2020, vol. 584, 124707. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124707>
- An Y., Zhao W., Li C., Liu Y. Evaluation of six satellite and reanalysis precipitation products using gauge observations over the Yellow River Basin, China. *Atmosphere*, 2020, vol. 11, no. 11, 1223. <https://doi.org/10.3390/atmos11111223>
- Beck H.E., Pan M., Roy T., Weedon G.P., Pappenberger F., Dijk A.I.J.M. Van, Huffman G.J., Adler R.F., Wood E.F. Daily evaluation of 26 precipitation datasets using Stage-IV gauge-radar data for the CONUS. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2019, vol. 23, no. 1, pp. 207–224. <https://doi.org/10.5194/hess-23-207-2019>
- Behrangi A., Singh A., Song Y., Panahi M. Assessing gauge undercatch correction in Arctic basins in light of GRACE observations. *Geophys. Res. Lett.*, 2019, vol. 46, no. 20, pp. 11358–11366. <https://doi.org/10.1029/2019GL084221>
- Benavidez R., Jackson B., Maxwell D., Norton K. A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): With a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2018, vol. 22, no. 11, pp. 6059–6086. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6059-2018>
- Betts A.K., Chan D.Z., Desjardins R.L. Near-surface biases in ERA5 over the Canadian Prairies. *Front. Environ. Sci.*, 2019, vol. 7, pp. 129. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00129>
- Bogdanova E.G., Gavrilova S.Yu. Correction of the precipitation time series nonhomogeneity caused by replacement of the Nipher shielded rain gauge by a Tretyakov precipitation gauge. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2008, vol. 33, no. 8, pp. 525–536. <https://doi.org/10.3103/S1068373908080074>
- Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., Bulygina O., Mokhov I.I., Semenov V.A. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades. *Environ. Res. Lett.*, 2019, vol. 14, no. 4, 045001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafb82>
- Emmanouil S., Langousis A., Nikolopoulos E.I., Anagnostou E.N. An ERA-5 derived CONUS-wide high-resolution precipitation dataset based on a refined parametric statistical downscaling framework. *Water Resour. Res.*, 2021, vol. 57, no. 6, e2020WR029548. <https://doi.org/10.1029/2020WR029548>
- Gleixner S., Demissie T., Diro G.T. Did ERA5 improve temperature and precipitation reanalysis over East Africa? *Atmosphere*, 2020, vol. 11, no. 9, 996. <https://doi.org/10.3390/atmos11090996>
- Groisman P.Y., Koknaeva V.V., Belokrylova T.A., Karl T.R. Overcoming biases of precipitation measurement: a history of the USSR experience. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1991, vol. 72, no. 11, pp. 1725–1733. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1991\)072<1725:OBOPMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1991)072<1725:OBOPMA>2.0.CO;2)
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2020, vol. 146, no. 730, pp. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Jiang Q., Li W., Fan Z., He X., Sun W., Chen S., Wen J., Gao J., Wang J. Evaluation of the ERA5 reanalysis precipitation dataset over Chinese Mainland. *J. Hydrol.*, 2021, vol. 595, 125660. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125660>
- Kislov A.V., Kitaev L.M., Konstantinov I.S. A statistical structure of large-scale snow cover field. *Meteorologiya i Gidrologiya*, 2001, no. 8, pp. 98–104. (In Russ.).

- Nogueira M. Inter-comparison of ERA-5, ERA-interim and GPCP rainfall over the last 40 years: Process-based analysis of systematic and random differences. *J. Hydrol.*, 2020, vol. 583, 124632.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124632>
- Rivoire P., Martius O., Naveau P.A. Comparison of moderate and extreme ERA-5 daily precipitation with two observational data sets. *Earth Space Sci.*, 2021, vol. 8, no. 4, e2020EA001633.
<https://doi.org/10.1029/2020EA001633>
- Singh T., Saha U., Prasad V.S., Gupta M.D. Assessment of newly-developed high resolution reanalyses (IMDAA, NGFS and ERA5) against rainfall observations for Indian region. *Atmos. Res.*, 2021, vol. 259, 105679.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105679>
- Sun S., Shi W., Zhou S., Chai R., Chen H., Wang G., Zhou Y., Shen H. Capacity of satellite-based and reanalysis precipitation products in detecting long-term trends across Mainland China. *Remote Sens.*, 2020, vol. 12, no. 18, 2902.
<https://doi.org/10.3390/RS12182902>
- Tang G., Behrangi A., Long D., Li C., Hong Y. Accounting for spatiotemporal errors of gauges: A critical step to evaluate gridded precipitation products. *J. Hydrol.*, 2018, vol. 559, pp. 294–306.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.057>
- Voropay N., Ryazanova A., Dyukarev E. High-resolution bias-corrected precipitation data over South Siberia, Russia. *Atmos. Res.*, 2021, vol. 254, 105528.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105528>
- Zhakov I.S. *Obshchie zakonomernosti rezhima tepla i uvlazhneniya na territorii SSSR* [General Regularities of the Heat and Moisture Regime on the Territory of the USSR]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1982. 231 p.