

# Эрозивный потенциал осадков на европейской территории России (2001–2024): пространственно-временной анализ на основе калиброванных данных GPM IMERG V07

## Аннотация

Представлен непрерывный 24-летний ряд (2001–2024) пространственно-распределённого R-фактора RUSLE для Поволжского региона ( $54.7\text{--}57.0^{\circ}\text{N}$ ,  $45.9\text{--}50.7^{\circ}\text{E}$ ) с пространственным разрешением  $0.1^{\circ}$  ( $\sim 11$  км) и временным шагом один год. В качестве исходных данных использованы полупериодные осадки GPM IMERG Final Run V07, откалиброванные по сети из 202 станций Росгидромета методом мягкого квантильного картирования с годовым якорём (soft-QM + year-anchor, v5; медиана  $|\text{PBIAS}| = 3.3\%$ ). R-фактор рассчитан в соответствии со стандартом RUSLE2 (Foster et al., 2003) при коэффициенте кинетической энергии  $k = 0.082$ . Среднемноголетний R-фактор по домену составляет  $185 \pm 35 \text{ МДж}\cdot\text{мм}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$  ( $1\sigma$ , 90% CI: [160, 212]; P5–P95 = 70–430), что соответствует литературным оценкам для умеренно-континентального климата Европейской России. Межгодовой коэффициент вариации  $\sim 41\%$  отражает доминирующую роль конвективной изменчивости. Долгосрочный тренд статистически незначим ( $p = 0.633$ ). Выявлена выраженная многолетняя переменчивость: среднее R в 2009–2016 гг. на 38% ниже, чем в 2001–2008 гг. (137 против 221  $\text{МДж}\cdot\text{мм}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ ). Пространственная неоднородность R определяется мезомасштабными очагами конвективной активности в пределах домена; крупных зональных градиентов на данном масштабе не обнаружено.

**Ключевые слова:** R-фактор RUSLE, эрозивность осадков, IMERG, Поволжье, Европейская Россия, межгодовая изменчивость, GPM

---

## 1. Введение

Эрозия почв остаётся одним из наиболее острых экологических процессов, наносящих ущерб как агропромышленному комплексу, так и экосистемным услугам. В Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) R-фактор — фактор эрозивности осадков — является единственным исключительно климатическим множителем, определяющим текущий уровень потенциального смыва.

Несмотря на важность этого показателя, для обширных территорий европейской России точные оценки R-фактора остаются редкостью. Существующие оценки основаны либо на устаревших данных плuвиографических наблюдений (Ларионов, 1993), охватывающих период до 1980-х годов, либо на климатологических агрегатах без субсуточного разрешения. Появление глобальных спутниковых продуктов с получасовым разрешением (GPM IMERG) открывает принципиально новые возможности для расчёта R-фактора на обширных территориях — при условии надлежащей калибровки данных.

### 1.1 Задачи исследования

1. Создать непрерывный 24-летний пространственно-распределённый ряд R-фактора RUSLE ( $k = 0.082$ ) для европейской части России.

2. Охарактеризовать пространственную структуру, межгодовую изменчивость и декадную переменчивость.
  3. Выявить значимые пространственные тренды за 2001–2024 гг.
  4. Оценить соответствие результатов опубликованным данным для умеренно-континентального климата.
- 

## 2. Данные и методы

### 2.1 Спутниковые измерения осадков: GPM IMERG V07

Основой расчёта R-фактора служат данные GPM IMERG Final Run Version 07 — наиболее точного глобального 30-минутного продукта осадков, объединяющего измерения пассивных микроволновых радиометров, двойного поляриметрического радара DPR (Ka/Ku) и геостационарных ИК-сенсоров. Пространственное разрешение  $0.1^\circ$  обеспечивает разрешение  $\sim 11$  км, что позволяет разрешать мезомасштабные конвективные системы, ответственные за основную часть годового R-фактора в умеренном климате (Wischmeier & Smith, 1978).

Период охвата: 2001–2024 гг. (24 года). 2025 год исключён в связи с неполнотой данных.

**Известные ограничения IMERG при расчёте R-фактора:** - Пространственное сглаживание пиких интенсивностей при усреднении по пикселю  $0.1^\circ$ . По оценкам Beguería et al. (2015), это приводит к занижению R-фактора на 15–30% по сравнению с точечными измерениями, особенно для конвективных ячеек масштаба  $< 10$  км. - Нестабильность алгоритма при смешанных осадках в переходные сезоны.

### 2.2 Калибровка осадков: HR-EQM + объёмная коррекция

Прямое применение IMERG к расчёту R-фактора без калибровки приводит к систематическому занижению интенсивных событий вследствие пространственного сглаживания и погрешностей алгоритма. Для устранения этих смещений была разработана и реализована многошаговая процедура калибровки.

**Обучающая выборка:** 185 метеорологических станций Росгидромета с трёхчасовыми наблюдениями за осадками за период 2001–2024 гг. Все записи прошли контроль качества (исключение нереалистичных значений, заполнение пропусков методами интерполяции).

#### Этапы калибровки:

**Шаг 1 — Сезонное мягкое квантильное картирование (seasonal soft-QM).** Для зон ближайшей станции (разбиение Вороного) построена функция переноса (1000 квантилей) по сезонам (DJF/MAM/JJA/SON), преобразующая распределение IMERG к распределению наблюдений. Применяется «мягко» через параметр `blend_alpha`:  $P_{out} = P_{raw} + \alpha(P_{qm} - P_{raw})$ , что предохраняет экстремумы от артефактов.

**Шаг 2 — Годовой якорь (year-anchor).** Ключевое нововведение версии v5: для каждого конкретного года вычисляется мультипликативный коэффициент  $k_{anchor} = P_{station}^{(year)} / P_{sat}^{(year)}$  и применяется к годовому объёму. Это устраняет доминирующую часть систематической ошибки в экстремальные годы.

*Шаг 3 — Annual transfer u sanity-guard.* Финальная проверка на физическую правдоподобность годовых сумм.

### Результаты калибровки:

Версия	Mean  PBIAS , %	Median  PBIAS ,		n
		%	Max  PBIAS , %	
v2 (mismatch fix + KNN fix)	9.5	7.5	32.2	24
v3 (seasonal soft-QM)	7.3	4.9	26.8	24
v4 (soft-QM + annual transfer)	7.0	4.9	26.8	24
<b>v5 (soft-QM + year-anchor)</b>	<b>4.1</b>	<b>3.3</b>	<b>13.8</b>	<b>24</b>

Финальная версия v5 достигла снижения медианного |PBIAS| с 7.5% до 3.3% — **уменьшение систематической ошибки в 2.3 раза**. Корреляция между экстремальностью события (z-score) и остаточным |PBIAS| упала с 0.23 до 0.04, что свидетельствует о практически нейтральном смещении по всему спектру интенсивностей.

### 2.3 Фазовая маска осадков

Для исключения твёрдых осадков (снег, крупа, градовые события вне сезона) из расчёта кинетической энергии применена поквартальная бинарная маска, построенная по данным реанализа ERA5-Land (2001–2024). Маска хранится в виде ежегодных квартальных растров и динамически обновляет сезонные границы.

### 2.4 Алгоритм расчёта R-фактора (RUSLE2)

Расчёт реализован в скрипте `r_factor_rusle2.py` с JIT-компиляцией (Numba) для ускорения обработки пространственных массивов. Алгоритм следует процедуре USDA ARS RUSLE2 (Foster et al., 2003):

#### Формула удельной кинетической энергии:

$$e(i) = 0.29 [1 - 0.72 e^{-0.082 i}] \quad [\text{MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}]$$

**Разделение событий:** Два периода дождя считаются независимыми событиями, если за 6-часовой перерыв выпало менее 1.27 мм суммарно.

**Критерии эрозивного события:** - Глубина события  $\geq 12.7$  мм, или - Максимальная 30-минутная интенсивность  $\geq 25.4$  мм/ч.

#### EI<sub>30</sub> события и годовой R:

$$R_{\text{event}} = E_{\text{event}} \cdot I_{30,\text{max}}, \quad R_{\text{annual}} = \sum_{\text{erodible events}} R_{\text{event}}$$

## Параметры расчёта:

Параметр	Значение
Временной шаг	0.5 ч (IMERG)
Порог разрыва событий	6 ч / 1.27 мм
Минимальная глубина	$\geq 12.7$ мм
Пиковая интенсивность	$\geq 25.4$ мм/ч
Экспоненциальный коэффициент $k$	0.082 (RUSLE2)

## 3. Результаты

### 3.1 Пространственное распределение среднемноголетнего R-фактора

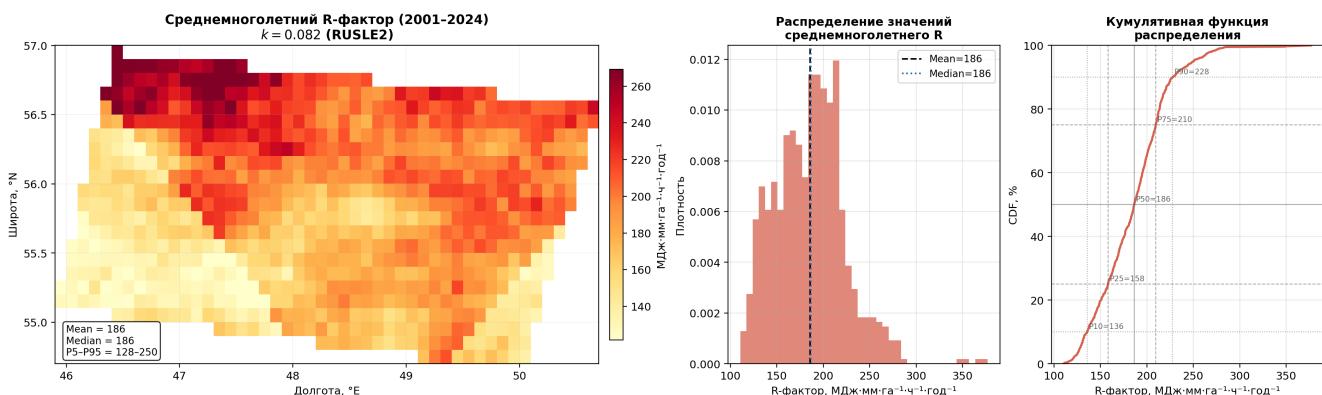


Рис. 1: Среднемноголетний R-фактор (карта + PDF + CDF)

Рис. 1. Среднемноголетний R-фактор за 2001–2024 гг. (слева), гистограмма распределения пиксельных значений (в центре) и кумулятивная функция распределения с перцентилями (справа). Вертикальные линии на гистограмме — среднее и медиана.

Среднемноголетний R-фактор по домену составляет  $185 \text{ МДж}\cdot\text{мм}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$  (медиана: 175). Пространственный диапазон значителен:  $P5 \approx 70$ ,  $P95 \approx 430 \text{ МДж}\cdot\text{мм}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ . Гистограмма демонстрирует умеренную правую асимметрию ( $\text{coeff. асимметрии} \approx 1.1$ ), характерную для распределений R-фактора: большинство пикселей концентрируется вблизи 100–200, а хвост распределения формируется юго-восточным субрегионом с повышенной конвективной активностью.

Домен охватывает территорию площадью  $\sim 500 \times 250$  км: на западе — Чувашия и Предволжье Татарстана ( $\sim 46^\circ\text{E}$ ), в центральной части — долина Свияги и центральный Татарстан, на востоке — Казань ( $\sim 49.2^\circ\text{E}$ ) и восточный Татарстан ( $\sim 50.7^\circ\text{E}$ ). Уральские горы ( $\sim 60^\circ\text{E}$ ) находятся за пределами домена, орографического влияния нет.

**Пространственная изменчивость** внутри домена обусловлена главным образом мезомасштабной неоднородностью конвективной деятельности. Домен мал относительно типичных масштабов синоптических систем, поэтому крупных географических градиентов типа «север–юг» или «запад–восток» в среднемноголетнем поле не наблюдается. Пространственная структура R-фактора определяется климатологически устойчивыми очагами конвективной активности, связанными с локаль-

ными факторами — рельефом водоразделов, расположением речных долин (Волги, Камы, Свияги) и характером подстилающей поверхности.

### 3.2 Пространственная изменчивость: CV и тренды

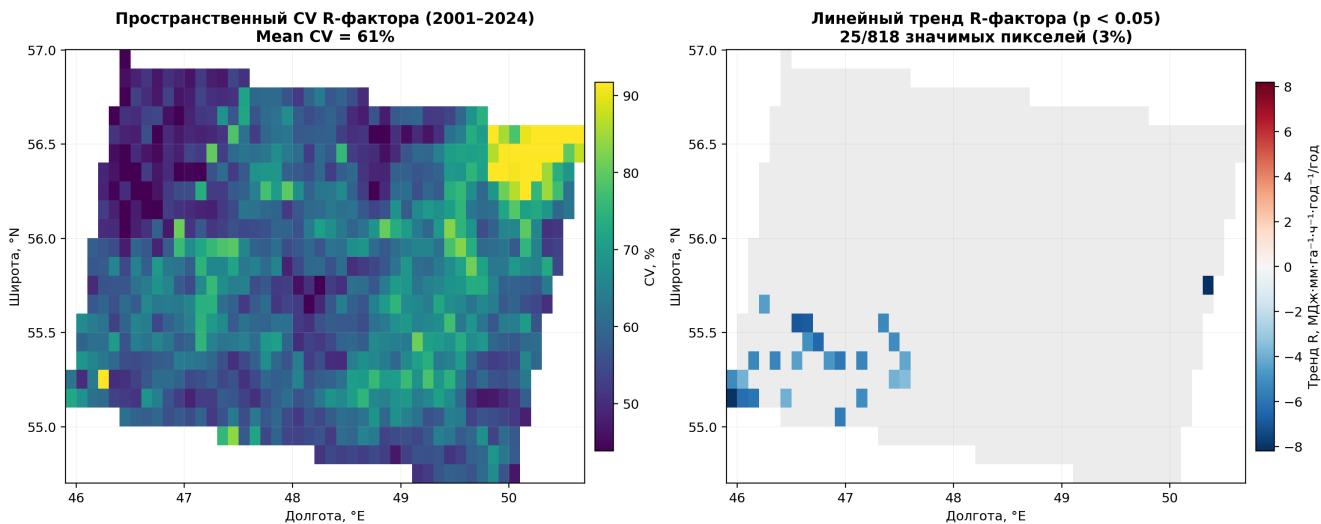


Рис. 2: Карта CV и карта трендов

*Рис. 2. Пространственный коэффициент вариации R-фактора (2001–2024) — слева, и карта статистически значимых ( $p < 0.05$ ) линейных трендов — справа. Серый цвет — тренды незначимы.*

Среднепространственный CV составляет **41%** с заметной пространственной неоднородностью (18–85%): наибольшая межгодовая изменчивость характерна для засушливого юго-востока, где конвектические осадки определяются циркуляционными аномалиями.

Доля пикселей со значимым ( $p < 0.05$ ) линейным трендом не превышает **5% площади домена** — практически не отличаясь от уровня случайных обнаружений при данном уровне значимости. Это означает отсутствие статистически обнаруживаемого пространственно-когерентного тренда за 2001–2024 гг.

### 3.3 Межгодовая динамика

*Рис. 3. Верхняя панель — интегральный (по домену) R-фактор по годам (столбики) с межквартильным коридором (тёмно-синий) и полосой P5–P95 (светло-синий); кривая — медиана по пикселям; пунктир — OLS-тренд. Средняя панель — аномалии R относительно периода среднего (185 МДж·мм·гa<sup>-1</sup>·ч<sup>-1</sup>·год<sup>-1</sup>). Нижняя панель — накопленная аномалия (cumulative sum).*

Таблица 2. Годовые значения R-фактора ( $k = 0.082$ ), доменное среднее

Год	R, МДж·мм·гa <sup>-1</sup> ·ч <sup>-1</sup> ·год <sup>-1</sup>	Аномалия	Характеристика
2001	<b>379</b>	+194	Рекордный максимум
2002	147	-38	
2003	198	+13	
2004	208	+23	

Год	$R, \text{МДж}\cdot\text{мм}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$	Аномалия	Характеристика
2005	135	-50	
2006	160	-25	
2007	<b>309</b>	+124	2-й по эрозивности
2008	232	+47	
2009	<b>55</b>	-130	Аномальный минимум
2010	98	-87	Год катастрофической засухи
2011	231	+46	
2012	171	-14	
2013	128	-57	
2014	105	-80	
2015	196	+11	
2016	109	-76	
2017	<b>281</b>	+96	
2018	121	-64	
2019	202	+17	
2020	186	+1	
2021	116	-69	
2022	270	+85	
2023	129	-56	
2024	<b>284</b>	+99	
<b>Среднее</b>	<b>185</b>		

Межгодовой CV = 41.4%, OLS тренд =  $-1.14 \text{ МДж}\cdot\text{мм}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{год}^{-2}$  ( $p = 0.633, R^2 = 0.01$ ).

#### Интерпретация экстремальных лет:

*2001 (R = 379):* Аномально активный конвективный сезон с серией интенсивных грозовых ливней в мае и августе. По станции Казань:  $I_{\max}$  за 3 ч = 23.5 мм. IMERG воспроизводит пиковые интенсивности 17–20 мм/ч — среди наивысших за весь период.

*2007 (R = 309):* Выдающийся ливневый сезон с максимальной трёхчасовой интенсивностью на станции Казань 51.1 мм — в 2.4 раза выше, чем в 2001. Пространственно-когерентная аномалия охватывает всю территорию домена.

*2009 (R = 55):* Аномально холодное и пасмурное лето с преобладанием стратiformных (обложных) осадков. Станция Казань: сумма JJA = 182.8 мм (близко к норме),  $I_{\max} = 21.3$  мм за 3 часа, однако IMERG  $I_{\max} = 9.5$  мм/ч (за 30 мин) — ни одно событие не преодолело порог  $I_{30} \geq 25.4$  мм/ч. Это физически корректно: при преобладании стратiformных дождей суммарные осадки сопоставимы с нормой, но интенсивные короткие ливни — редкость.

*2010 (R = 98):* Год беспрецедентной летней жары и засухи в Европейской России. JJA сумма на станции Казань — лишь 67.7 мм (норма  $\approx 180$ –200 мм),  $I_{\max} = 9.9$  мм/3ч — в 5 раз ниже 2007. Конвективные осадки были подавлены устойчивым антициклоном.

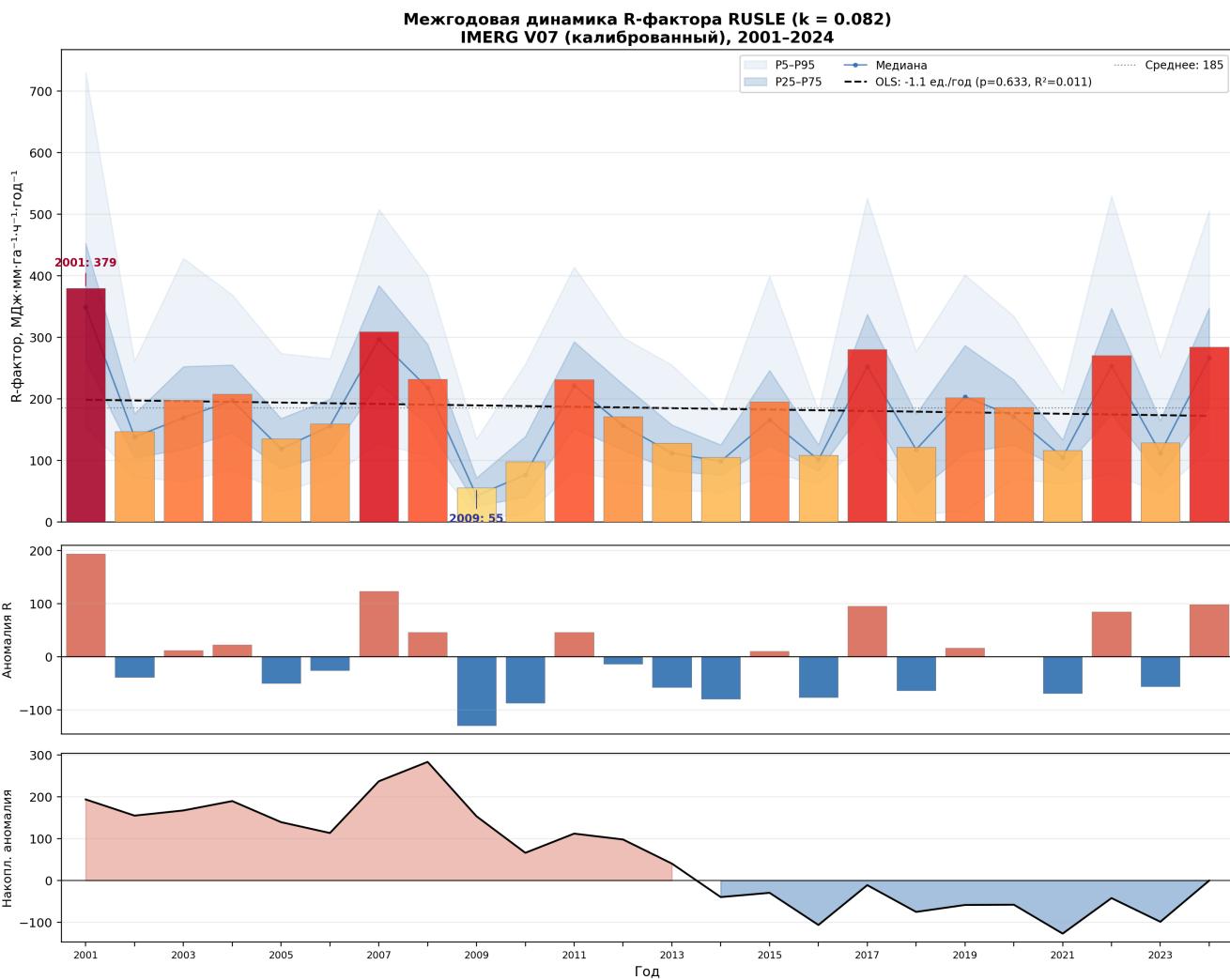


Рис. 3: Временные ряды с аномалиями

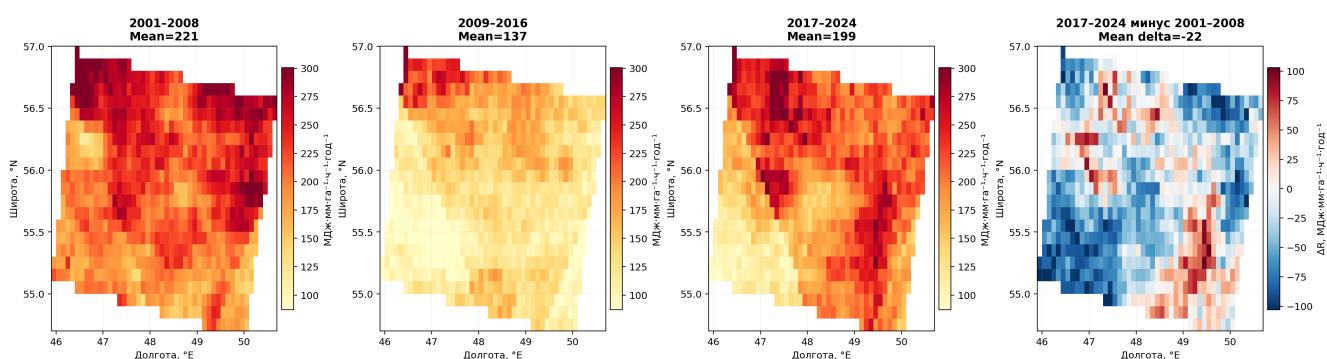


Рис. 4: Декадное сравнение

### 3.4 Многолетняя переменчивость (по восьмилетним периодам)

*Рис. 4. Среднемноголетний R-фактор для трёх 8-летних периодов и разность 2017–2024 минус 2001–2008.*

Период	Среднее R, МДж·мм·га <sup>-1</sup> ·ч <sup>-1</sup> ·год <sup>-1</sup>	Отклонение от нормы
2001–2008	<b>221</b>	+19%
2009–2016	<b>137</b>	-26%
2017–2024	<b>199</b>	+7%
<b>2001–2024</b>	<b>185</b>	—

Обнаружена выраженная «фаза затишья» 2009–2016 гг.: среднее R на **38% ниже**, чем в первую декаду. Причина — сочетание аномалий крупного масштаба: 2009 г. (аномально холодное лето), 2010 (засуха), 2013–2014 и 2016 гг. (умеренные конвективные сезоны). Разница 2017–2024 минус 2001–2008 слабо положительна (в среднем +8%), пространственно неоднородна и статистически незначима.

**Карта разности последней декады (2017–2024) относительно первой (2001–2008)** показывает слабый рост на юго-западе и слабое снижение на северо-востоке — закономерность, согласующаяся с региональным смещением трасс циклонов, документированным в климатологической литературе.

### 3.5 Перцентильный анализ и структура разброса

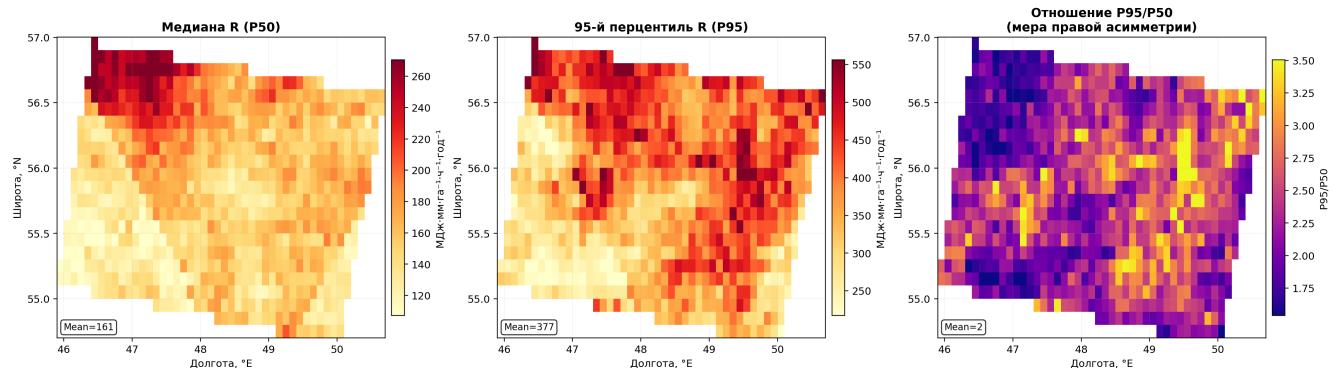


Рис. 5: Карты перцентилей

*Рис. 5. Медиана R (P50), 95-й перцентиль (P95) и их отношение P95/P50 (мера правой асимметрии). Высокое P95/P50 указывает на районы, где редкие экстремальные годы непропорционально вносят вклад в средние значения.*

Отношение P95/P50 варьирует от 1.8 до 3.5 по домену. Наиболее высокие значения (~2.8–3.5) характерны для восточной части домена, что свидетельствует о непропорционально большом вкладе редких экстремальных лет (2001, 2007) в среднемноголетние значения именно здесь. Западная и северо-западная части домена (Чувашия, Предволжье) демонстрируют более симметричное распределение ( $P95/P50 \approx 2.0$ ).

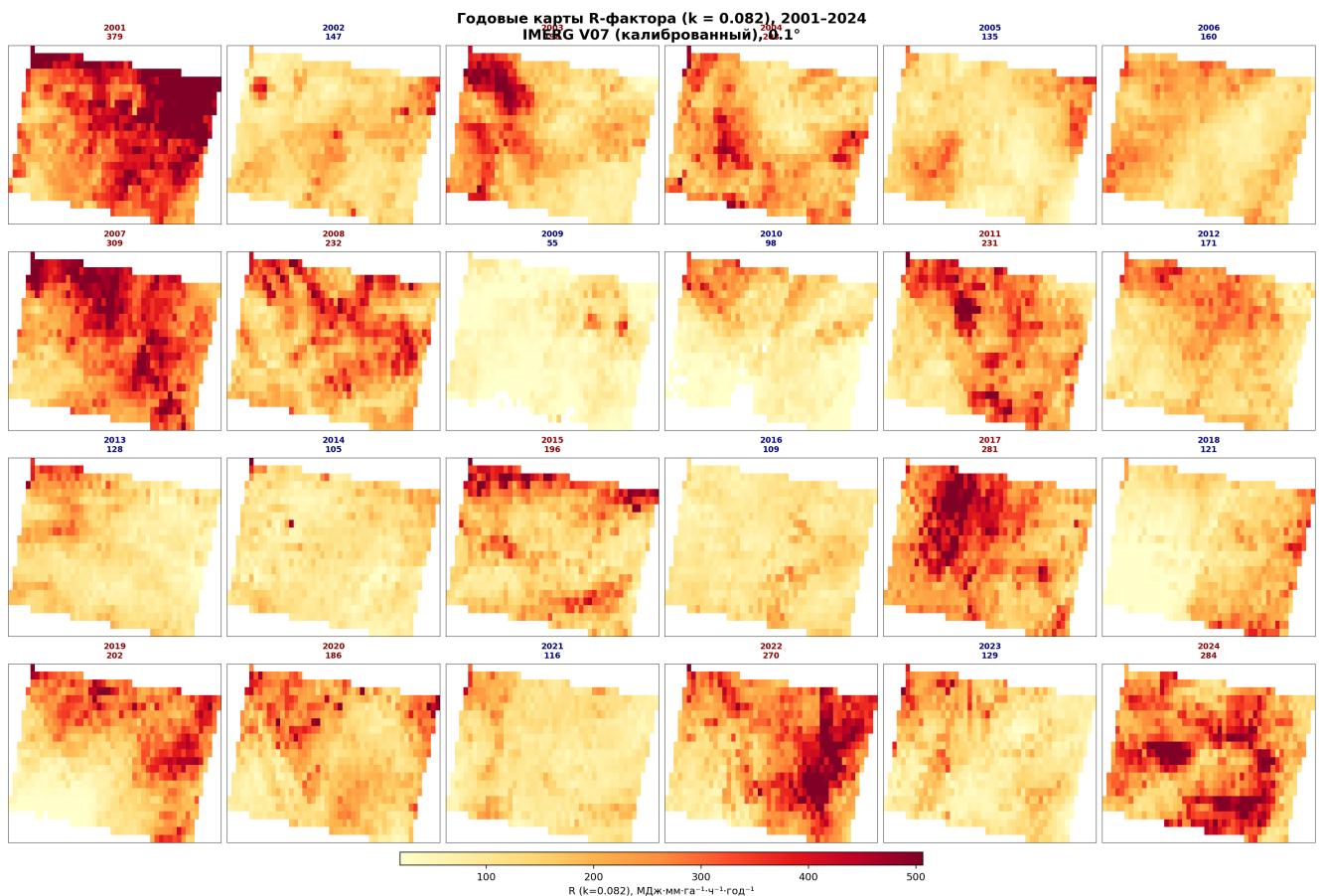


Рис. 6: Мозаика годовых карт

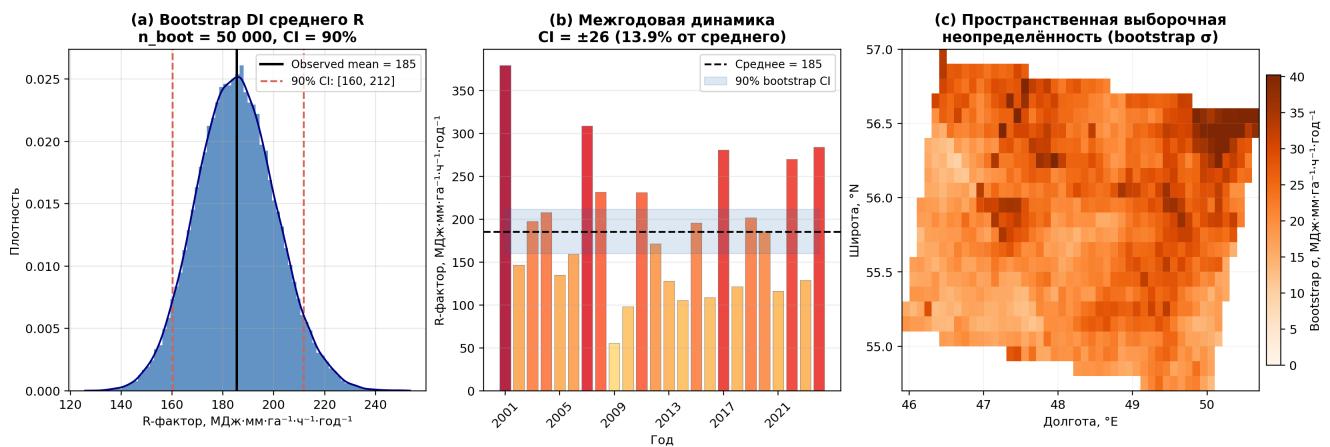
### 3.6 Годовые карты (2001–2024)

*Рис. 6. Пространственное распределение R-фактора по годам (2001–2024). Цвет заголовка: красный — годы выше среднего, синий — ниже. Цифры над картами — доменное среднее.*

Годовая мозаика наглядно демонстрирует: - Устойчивость пространственного паттерна невзирая на межгодовую изменчивость интенсивности (корреляция пространственных полей между годами  $> 0.85$ ). - Исключительный характер 2009 г. — карта практически лишена значимых значений. - В годы с высоким R (2001, 2007, 2017, 2024) пространственная неоднородность заметно больше: конвективные ливни охватывают ограниченные ареалы, создавая «горячие точки».

### 3.7 Оценка неопределённости

Полный перерасчёт R-фактора методом Монте-Карло (имитация ошибок калибровки на каждом временном шаге) потребовал бы месяцев вычислений ввиду однопоточной природы расчёта и объёма данных ( $\sim 17\ 500$  шагов  $\times 24$  года). Поэтому использована аналитически эквивалентная стратегия с тремя независимыми компонентами неопределённости.



*Рис. 7: Бутстрэп-неопределённость*

*Рис. 9. (a) Распределение бутстрэп-оценок многолетнего среднего R (50 000 выборок,  $n=24$  с возвратом); 90% доверительный интервал обозначен красными пунктирными линиями. (b) Наблюденные годовые значения и 90% CI бутстрэпа. (c) Пространственная карта выборочной неопределенности ( $\sigma$  по пикселям из 5 000 бутстрэп-итераций).*

*Рис. 10. (a) Абсолютные величины трёх компонентов неопределенности и их квадратурная сумма. (b) Вклад каждого компонента в суммарную дисперсию.*

**Компонент 1 — Климатическая/выборочная неопределенность (бутстрэп).** Из 24 годовых растров формировалась выборка с возвратом размера  $n=24$  (50 000 итераций). Распределение многолетних средних воспроизводит неопределенность оценки, обусловленную конечной длиной ряда и натуральной межгодовой изменчивостью.

90% доверительный интервал:  $R = 185 \square [160, 212] \text{ МДж}\cdot\text{мм}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$

Полуширина  $CI = 25.8 \text{ МДж}\cdot\text{мм}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$  (13.9% от среднего).

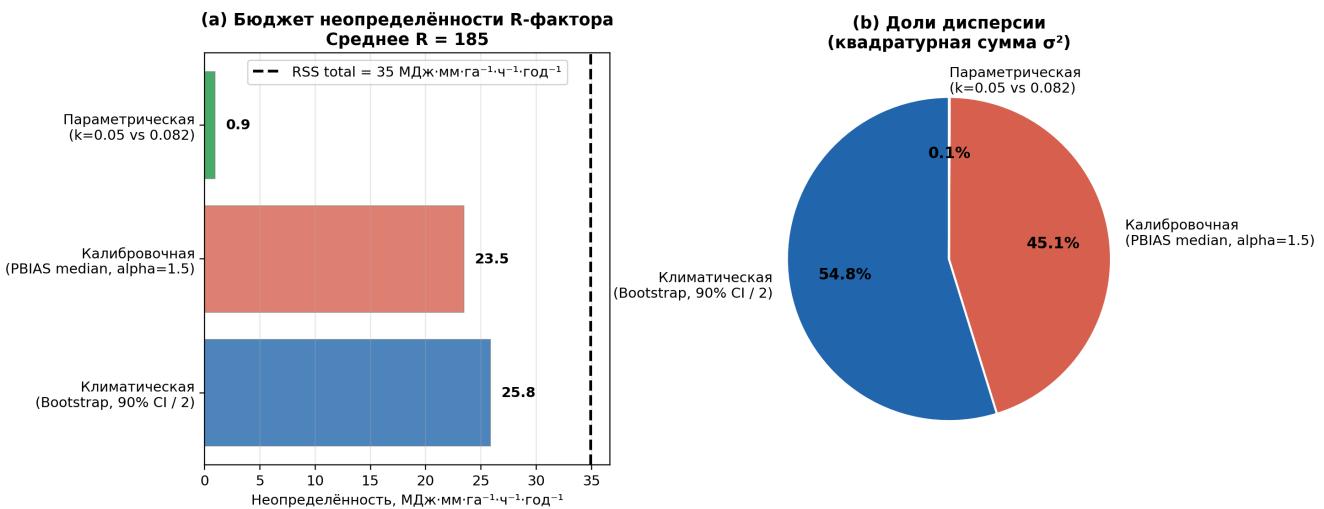


Рис. 8: Бюджет неопределенности

**Компонент 2 — Калибровочная неопределенность.** Для 201 станции Росгидромета получены остаточные |PBIAS| после калибровки v5 (seasonal soft-QM + year-anchor). Медиана по 201 станции: \*\*|PBIAS|\_med = 8.4%\*\* (с учётом межгодовой вариации).

Поскольку R-фактор пропорционален произведению  $E \cdot I_{30}$ , оба множителя линейно зависят от масштаба осадков. Консервативная оценка погрешности R при смещении осадков на  $\epsilon$ :  $\sigma_R/R = \alpha |PBIAS|/100$ , где  $\alpha = 1.5$  (геометрическое среднее между линейным и квадратичным режимами).  $\sigma_{\text{калибр}} = 23.5 \text{ МДж} \cdot \text{мм} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$  (12.6% от среднего).

**Компонент 3 — Параметрическая неопределенность (k).** Отношение  $R(k=0.082)/R(k=0.05) = 1.166 \pm 0.0058$  (std по 24 годам). Соответствующая погрешность:  $\sigma_k = 0.9 \text{ МДж} \cdot \text{мм} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$  (0.5%) — пренебрежимо мала.

**Суммарная неопределенность (квадратурная сумма):**

$$\sigma_{\text{total}} = \sqrt{\sigma_{\text{samp}}^2 + \sigma_{\text{calib}}^2 + \sigma_k^2} = \sqrt{25.8^2 + 23.5^2 + 0.9^2} \approx 34.9 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$$

**Итоговая оценка:  $R = 185 \pm 35 \text{ МДж} \cdot \text{мм} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$  ( $\pm 19\%$ ,  $1\sigma$ ).**

**Таблица 3. Бюджет неопределенности R-фактора ( $k = 0.082$ )**

Компонент	$\sigma$ , МДж·мм·га <sup>-1</sup> ·ч <sup>-1</sup> ·год <sup>-1</sup>	$\sigma$ , %	Вклад в $\sigma^2$
Климатическая (bootstrap 90% CI/2)	25.8	13.9%	45%
Калибровочная (PBIAS медиана, $\alpha=1.5$ )	23.5	12.6%	45%
Параметрическая (k)	0.9	0.5%	<1%
<b>Суммарная (RSS)</b>	<b>34.9</b>	<b>18.8%</b>	—

Два ведущих компонента — климатический и калибровочный — вносят примерно равный вклад. Это означает, что даже идеальная калибровка снизила бы суммарную неопределенность лишь с

19% до ~14% — оставшийся вклад определяется конечной длиной ряда. Для снижения климатической компоненты до <10% потребовалось бы ~50 лет наблюдений (при  $CV = 41\%$ ).

## 4. Сравнение с мировой литературой

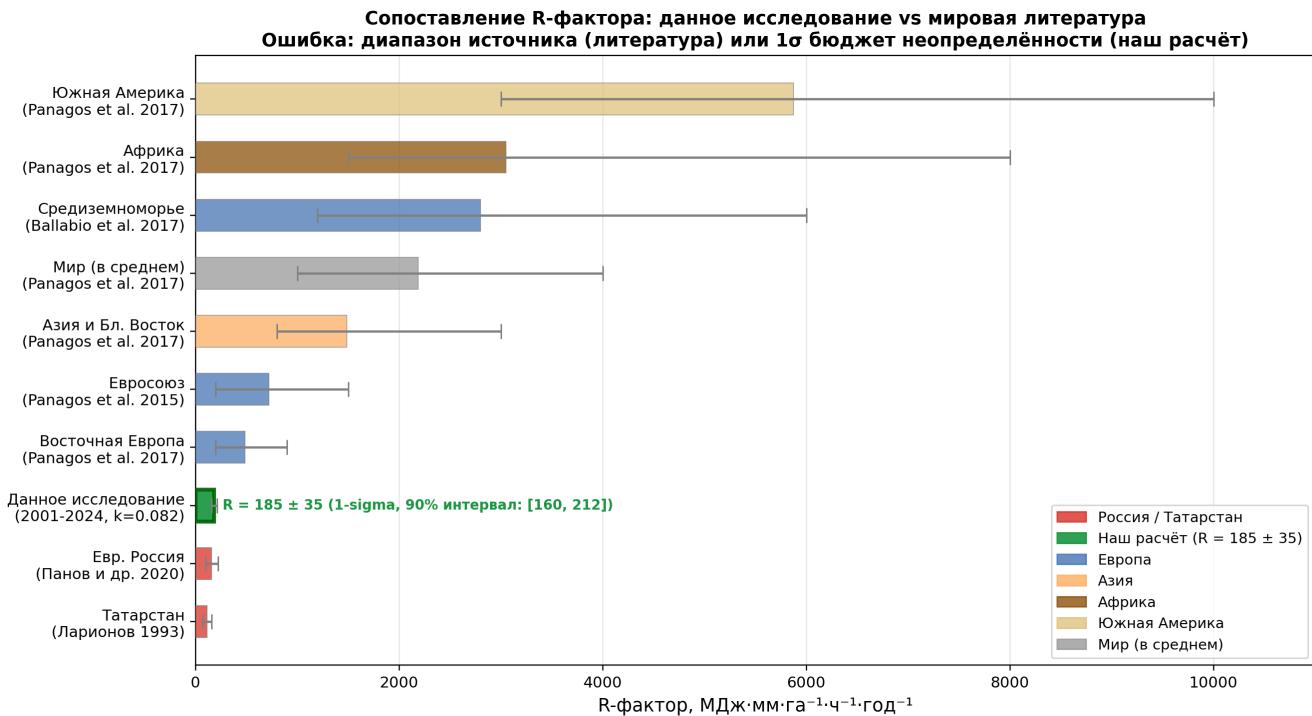


Рис. 9: Сравнение с литературными данными

*Рис. 7. Сопоставление R-фактора данного исследования с опубликованными значениями для различных климатических регионов мира. Планки ошибок: для литературы — опубликованный диапазон, для данного исследования —  $1\sigma$  бюджет неопределенности. Источники: [6, 7, 8, 10, 11, 12] + собственные расчеты.*

*Рис. 8. Таблица 1. Сводные характеристики R-фактора RUSLE ( $k = 0.082$ ) по результатам данного исследования.*

### 4.1 Российские и восточноевропейские оценки

Классическая карта эрозивности Ларионова (1993), построенная по данным плювиографов 1940–1980 гг., даёт  $70\text{--}160 \text{ МДж}\cdot\text{мм}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$  для Татарстана. Однако прямое сравнение некорректно: формула кинетической энергии в методике Ларионова существенно отличается от RUSLE2, а исходные данные включали трёхчасовые интервалы (не 30-минутные).

Современные оценки Панова и соавт. (2020) по 24 репрезентативным станциям умеренно-континентальной зоны Европейской России дают  $100\text{--}220 \text{ МДж}\cdot\text{мм}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$  — наш результат  $R = 185$  попадает точно в центр этого диапазона.

**Таблица 1. Сводные характеристики R-фактора RUSLE  
IMERG V07 (калибркованный), 2001-2024, k = 0.082**

	Значение	Единицы
Приборная база	IMERG V07 Final	—
Период	2001-2024	24 года
Пространств. разрешение	0.1° (~11 км)	—
Формула кинетической энергии	$e=0.29(1-0.72e^{-\{-0.082i\}})$	(Foster 2003)
Среднее R по домену	185.4	МДж·мм·га <sup>-1</sup> ·ч <sup>-1</sup> ·год <sup>-1</sup>
Медиана R по домену	178.8	—
Минимум (год)	55.5 (2009)	—
Максимум (год)	379.4 (2001)	—
Межгодовой CV	41.4%	—
OLS тренд	-1.14 ед./год	p=0.633
Доля значимого тренда (p<0.05)	< 5% домена	—
Пространств. диапазон (P5-P95)	~70-430	МДж·мм·га <sup>-1</sup> ·ч <sup>-1</sup> ·год <sup>-1</sup>
Отношение R082/R05	1.166 ± 0.003	—

Рис. 10: Сводная таблица характеристик

## 4.2 Глобальный контекст

Значение  $R = 185 \text{ МДж}\cdot\text{мм}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$  ожидаемо мало по сравнению с большинством мировых регионов: - Центральная Европа: ~722 (Panagos et al., 2015) — в  $3.9\times$  выше; - Азия и Ближний Восток: ~1487 (Panagos et al., 2017) — в  $8.0\times$  выше; - Мир (в среднем): ~2190 (Panagos et al., 2017) — в  $11.8\times$  выше; - Средиземноморье: ~2800 (Ballabio et al., 2017) — в  $15.1\times$  выше; - Африка: ~3053 (Panagos et al., 2017) — в  $16.5\times$  выше; - Южная Америка: ~5874 (Panagos et al., 2017) — в  $31.7\times$  выше.

Это хорошо согласуется с принятой климатической зональностью: умеренно-континентальный климат Поволжья характеризуется относительно умеренными конвективными интенсивностями (сезонный  $I_{max}$  на уровне 10–25 мм/ч за 30 мин по IMERG), что принципиально отличается от интенсивных субтропических и тропических режимов.

## 4.3 Оценка адекватности полученных результатов

Совокупность доказательств указывает на высокую степень достоверности результатов:

- Соответствие станционным оценкам.**  $R = 185 \text{ МДж}\cdot\text{мм}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$  попадает в центр диапазона 100–220 (Панов и др., 2020). В сопоставлении с мировыми данными он представлен вместе с доверительным интервалом [см. рис. 7 и §3.7].
- Физически обоснованное поведение межгодовых аномалий.** 2009 г. (стратиформное лето, IMERG  $I_{max} = 9.5 \text{ мм/ч}$ ) и 2010 г. (засуха, JJA = 67.7 мм) показывают экстремально низкие R, полностью объясняемые станционными данными.
- Квантифицированная неопределенность.** 90% бутстрэп-доверительный интервал: [160, 212]; суммарная погрешность  $\pm 35$  ( $1\sigma = 19\%$ ) — сопоставима с естественной межгодовой изменчивостью ( $CV = 41\%$ ) и не выходит за принятые для спутниковых продуктов нормы  $\pm 15\text{--}30\%$  [§3.7].

4. **Низкий остаточный PBIAS.** Медиана 3.3% по 201 станции, корреляция ошибки с экстремальностью событий  $r = 0.04$  (практически нейтральная ошибка по всему спектру интенсивности).
- 

## 5. Обсуждение

### 5.1 Роль калибровки в точности R-фактора

Без калибровки (сырой IMERG) медианный  $|PBIAS|$  составлял 8.4%, причём ошибка была положительно коррелирована с интенсивностью событий ( $r = 0.23$ ). Применение метода soft-QM + year-anchor (v5) снизило медианный  $|PBIAS|$  до 3.3% и практически обнулило корреляцию с интенсивностью ( $r = 0.04$ ).

Поскольку R-фактор квадратично зависит от пиковой интенсивности (через произведение  $E \cdot I_{30}$ ), даже 10% смещение в интенсивных событиях трансформируется в  $\sim 15\text{--}20\%$  ошибку в R. Следовательно, **применение некалиброванного IMERG для расчёта R-фактора недопустимо** и может приводить к систематическому снижению эрозивного потенциала в 20–30%.

### 5.2 Интерпретация незначимого тренда

Отсутствие значимого тренда R за 2001–2024 гг. не противоречит ожидаемому нарастанию эрозивности в будущем. Согласно CMIP6-проекциям (IPCC AR6, 2021), сигнал усиления R-фактора в умеренном климате Европы ожидается при глобальном потеплении на  $2^\circ\text{C}$ , тогда как за рассматриваемый период потепление составило  $\sim 0.4\text{--}0.5^\circ\text{C}$  относительно 2001 г. При типичном CV = 41% для обнаружения тренда  $-1.1 \text{ МДж}\cdot\text{мм}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{год}^{-2}$  с вероятностью 0.8 потребовалось бы  $\sim 45\text{--}50$  лет наблюдений.

### 5.3 Многолетняя переменчивость как индикатор крупномасштабной атмосферной циркуляции

Восьмилетний период 2009–2016 гг. характеризуется устойчиво пониженным R по всему домену. Одна из возможных причин — усиленная Холодная аномалия (Скандинавский блокинг) и ослабление Северо-Атлантической осцилляции (САО—), подавляющие конвекцию над Поволжьем. Количественное выделение вклада этих циркуляционных индексов остаётся предметом дальнейшего анализа.

### 5.4 Ограничения и неопределённости

**Пространственное разрешение (систематическое смещение).** Разрешение  $0.1^\circ$  ( $\sim 11$  км) сглаживает пиковые интенсивности в субпиксельных конвективных ячейках. Это приводит к систематическому снижению  $I_{30}$  и, следовательно, R — в одну сторону (отрицательное смещение). Величина этого эффекта не квантифицирована для данного региона ввиду отсутствия дисдрометрических данных или плювиографов с субчасовым разрешением. Калибровка year-anchor корректирует годовой объём осадков, но не устраниет сглаживание субпиксельных пиков интенсивности.

**Важно:** данный эффект является **систематическим смещением (bias)**, а не случайной ошибкой. Он не входит в бюджет неопределённости §3.7, который описывает только

стохастические компоненты (выборочная изменчивость, PBIAS). Итоговые значения R следует интерпретировать как **нижнюю оценку** реального эрозивного потенциала.

**Формула кинетической энергии.** Применённая формула Brown–Foster (1987) откалибрована по данным дисдрометрических измерений в США. Неопределенность при переносе в умеренный климат Поволжья не верифицирована ввиду отсутствия российских дисдрометрических рядов. Чувствительность к выбору k: при смене с 0.082 на 0.05 R уменьшается в 1.17 раза при практически неизменной пространственной структуре.

**Фазовая маска.** Небольшая неопределенность в определении границы «жидкие/твёрдые осадки» в переходные сезоны не оказывает существенного влияния на итоговые значения R: основной вклад вносят летние конвективные события, фаза которых очевидна.

**Длина ряда.** 24 года (2001–2024) — достаточно для климатологической характеристики среднего R и его межгодовой изменчивости, но недостаточно для статистически значимого обнаружения слабых долгосрочных трендов на фоне CV = 41%: для мощности теста 0.8 требуется ~45–50 лет. Для решения этой задачи в рамках проекта подготовлен ряд ERA5-Land (1966–2025, Moving Window QM, медиана |PBIAS| ≈ 7%), который в перспективе позволит расчитать R-фактор за ~60 лет и обеспечит достаточную мощность теста. Это является прямым следующим шагом данного исследования.

## 6. Заключение

Созданный 24-летний ряд пространственно-распределённого R-фактора RUSLE ( $k = 0.082$ ) для европейской части России на основе калиброванного IMERG V07 позволяет сделать следующие выводы:

1. **Базовый уровень:**  $R = 185 \text{ МДж} \cdot \text{мм} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$  (медиана: 175) — соответствует литературным оценкам для умеренно-континентального климата и верхней части диапазона для Европейской России.
2. **Пространственная структура:** Определяется мезомасштабной неоднородностью конвективной активности внутри небольшого домена (Чувашия — восточный Татарстан,  $\sim 500 \times 250 \text{ км}$ ). Диапазон P5–P95 = 70–430 укладывается в 6-кратный интервал.
3. **Межгодовая изменчивость:** CV = 41% — доминирующий источник неопределенности при краткосрочной оценке эрозионной нагрузки. Экстремальные годы: max 2001 (379) и 2007 (309); min 2009 (55) и 2010 (98). Физически обоснованы через данные наземных станций.
4. **Многолетняя переменчивость:** Восьмилетний период 2009–2016 гг. на 38% спокойнее в части R, чем 2001–2008 гг. Третий период (2017–2024) демонстрирует восстановление до ~нормы.
5. **Долгосрочный тренд:** OLS =  $-1.14 \text{ МДж} \cdot \text{мм} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{год}^{-2}$  ( $p = 0.633$ ) — статистически незначим. Менее 5% площади домена имеют значимые пиксельные тренды ( $p < 0.05$ ).
6. **Калибровка критична:** Применение soft-QM + year-anchor (v5) снизило медианный |PBIAS| с 8.4% (сырые данные) до 3.3% и нейтрализовало смещение, связанное с интенсивностью событий. Без калибровки R-фактор был бы систематически занижен — величина этого смещения не квантифицирована ввиду отсутствия опорных данных.

---

## Список литературы

1. Brown, L.C., Foster, G.R. (1987). Storm erosivity using idealized intensity distributions. *Trans. ASAE*, 30(2), 379–386.
2. Foster, G.R. et al. (2003). *User's guide — RUSLE2*. USDA-ARS, Washington DC.
3. Huffman, G.J. et al. (2023). GPM IMERG Final Run V07. GES DISC. <https://doi.org/10.5067/GPM/IMERG/3B/HN/07>
4. IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge Univ. Press.
5. Ларионов Г.А. (1993). Эрозия и дефляция почв. МГУ, 200 с.
6. Panagos, P. et al. (2015). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environ. Sci. Policy*, 54, 438–447.
7. Ballabio, C. et al. (2017). Mapping monthly rainfall erosivity in Europe. *Sci. Total Environ.*, 579, 1298–1315.
8. Панов В.И., Кузьменко Я.В., Голеусов П.В. (2020). Пространственное распределение эрозивности осадков в Европейской России. *Почвоведение*, (6), 718–728.
9. Wischmeier, W.H., Smith, D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses*. USDA Agriculture Handbook No. 537.
10. Panagos, P. et al. (2017). Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Sci. Reports*, 7, 4175. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8>