

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° (~ 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 $185 \pm 35 \text{ МДж}\cdot\text{мм}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ (1σ , 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° обеспечивает разрешение ~ 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° . 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 |
| v5 (soft-QM + year-anchor) | 4.1 | 3.3 | 13.8 | 24 |

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 ≥ 12.7 мм, или - Максимальная 30-минутная интенсивность ≥ 25.4 мм/ч.

EI₃₀ 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 | ≥ 12.7 мм |
| Пиковая интенсивность | ≥ 25.4 мм/ч |
| Экспоненциальный коэффициент k | 0.082 (RUSLE2) |

3. Результаты

3.1 Пространственное распределение среднемноголетнего R-фактора

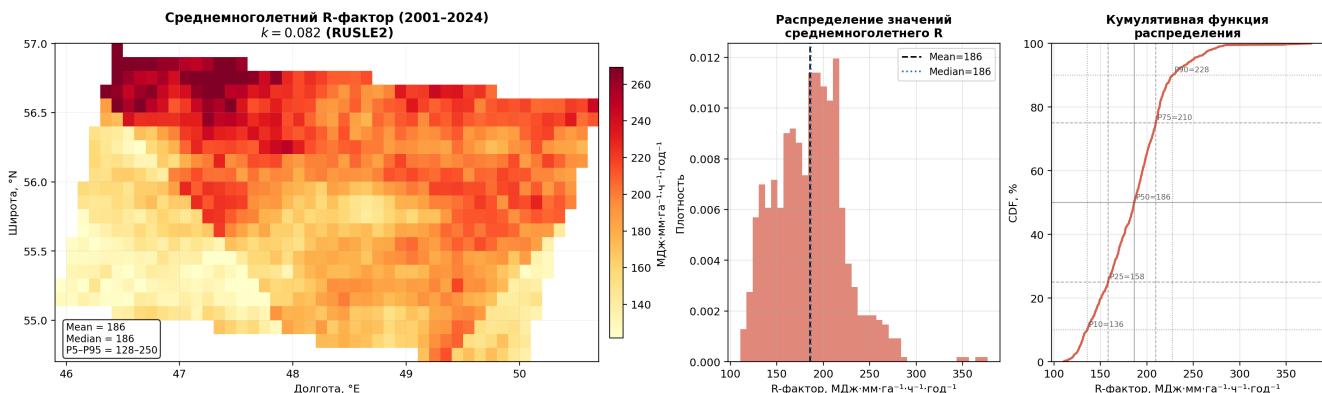


Рис. 1: Среднемноголетний R-фактор (карта + PDF + CDF)

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

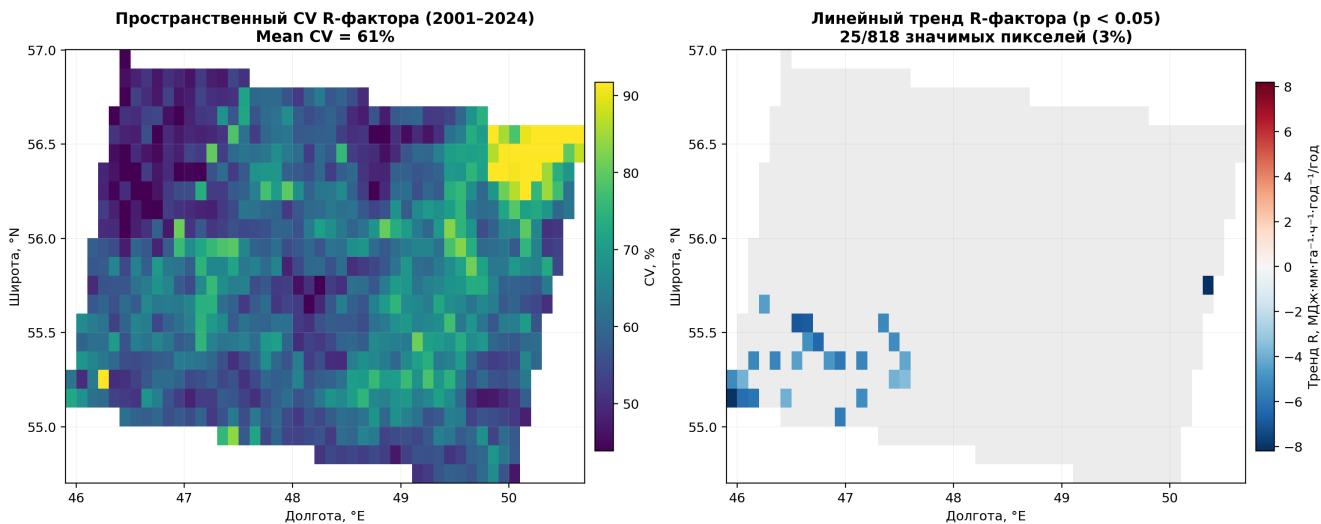


Рис. 2: Карта CV и карта трендов

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⁻¹·ч⁻¹·год⁻¹). Нижняя панель — накопленная аномалия (cumulative sum).

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

| Год | R, МДж·мм·гa ⁻¹ ·ч ⁻¹ ·год ⁻¹ | Аномалия | Характеристика |
|------|--|----------|--------------------|
| 2001 | 379 | +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 | 309 | +124 | 2-й по эрозивности |
| 2008 | 232 | +47 | |
| 2009 | 55 | -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 | 281 | +96 | |
| 2018 | 121 | -64 | |
| 2019 | 202 | +17 | |
| 2020 | 186 | +1 | |
| 2021 | 116 | -69 | |
| 2022 | 270 | +85 | |
| 2023 | 129 | -56 | |
| 2024 | 284 | +99 | |
| Среднее | 185 | | |

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 ≈ 180 –200 мм), $I_{\max} = 9.9$ мм/3ч — в 5 раз ниже 2007. Конвективные осадки были подавлены устойчивым антициклоном.

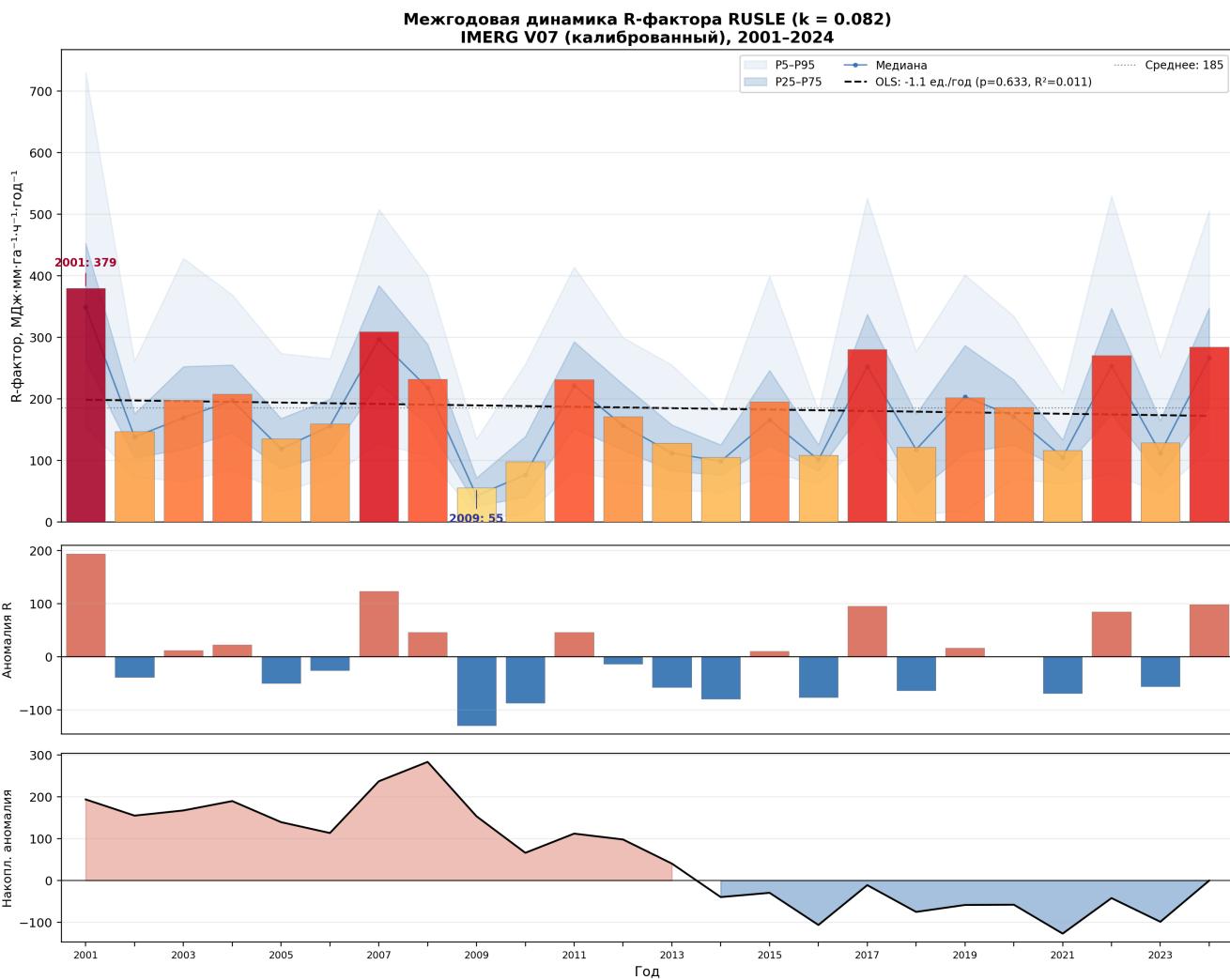


Рис. 3: Временные ряды с аномалиями

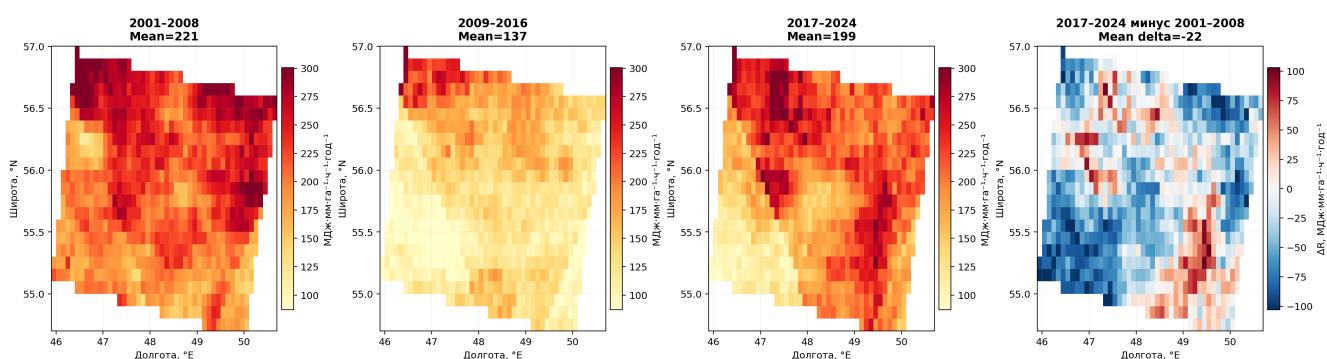


Рис. 4: Декадное сравнение

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 ⁻¹ ·ч ⁻¹ ·год ⁻¹ | Отклонение от нормы |
|------------------|--|---------------------|
| 2001–2008 | 221 | +19% |
| 2009–2016 | 137 | -26% |
| 2017–2024 | 199 | +7% |
| 2001–2024 | 185 | — |

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

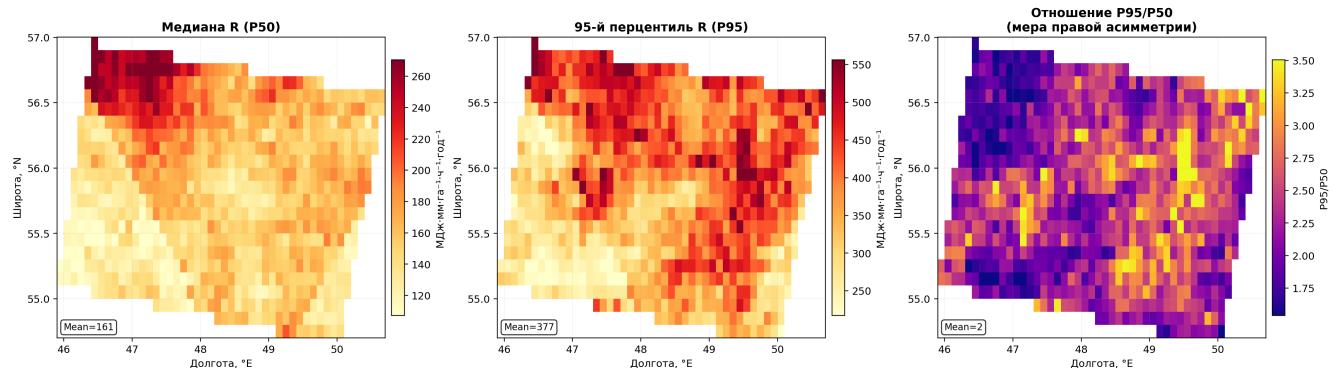


Рис. 5: Карты перцентилей

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 ($P95/P50 \approx 2.0$).

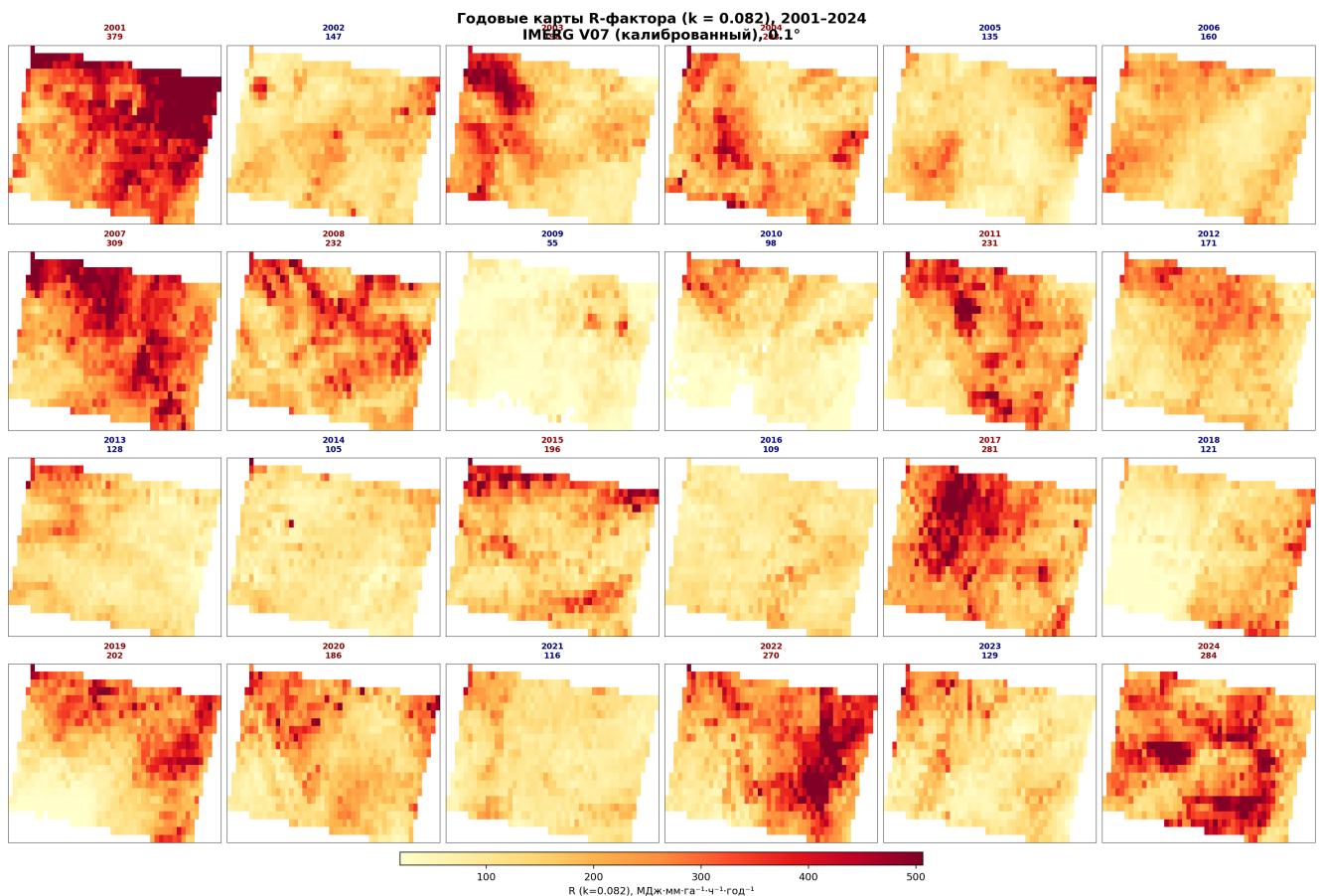


Рис. 6: Мозаика годовых карт

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 (σ 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).

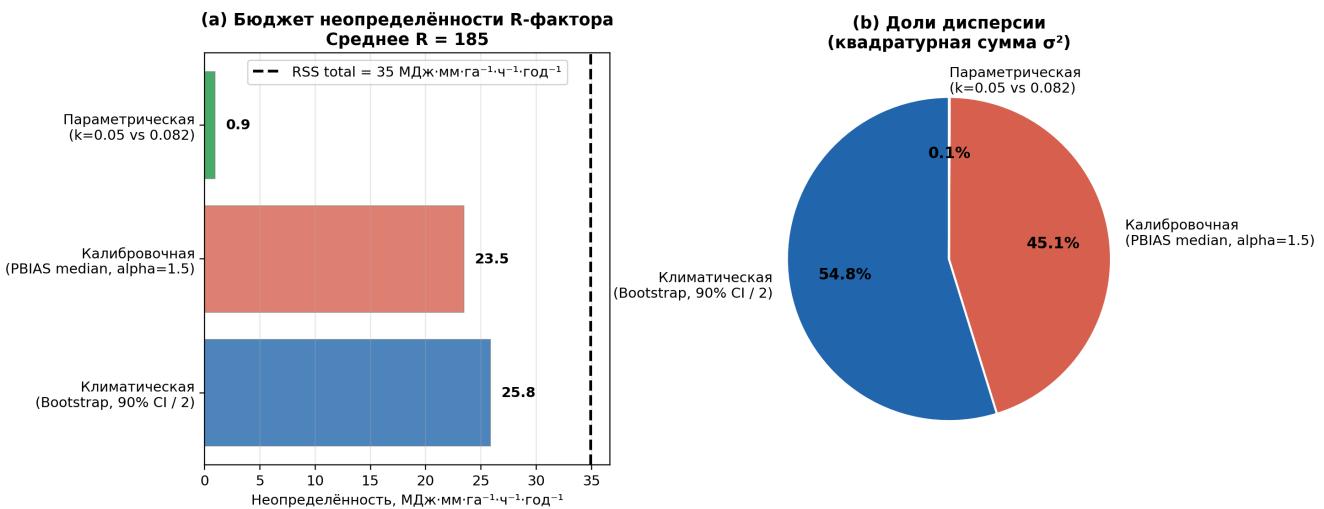


Рис. 8: Бюджет неопределенности

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 ϵ : $\sigma_R/R = \alpha |PBIAS|/100$, 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: $R = 185 \pm 35 \text{ МДж} \cdot \text{мм} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ ($\pm 19\%$, 1σ).

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

| Компонент | σ , МДж·мм·га ⁻¹ ·ч ⁻¹ ·год ⁻¹ | σ , % | Вклад в σ^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% |
| Суммарная (RSS) | 34.9 | 18.8% | — |

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

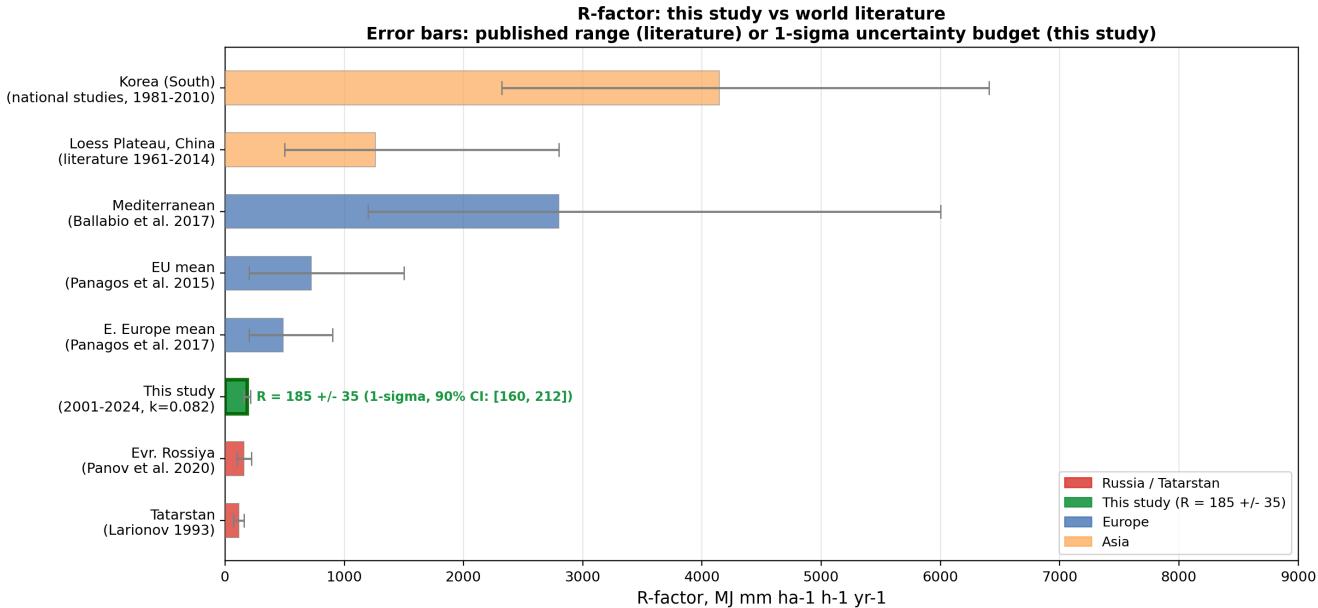


Рис. 9: Сравнение с литературными данными

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

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.

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; - Средиземноморье:

**Таблица 1. Сводные характеристики R-фактора RUSLE
IMERG V07 (калибранный), 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 ⁻¹ ·ч ⁻¹ ·год ⁻¹ |
| 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 ⁻¹ ·ч ⁻¹ ·год ⁻¹ |
| Отношение R082/R05 | 1.166 ± 0.003 | — |

Рис. 10: Сводная таблица характеристик

~2800 (Ballabio et al., 2017) — в 15× выше; - Лёссовое плато Китая: ~1260 (Zhao et al., 2017) — в 6.8× выше; - Корея (Южная): ~4147 (Kim et al., 2012) — в 22× 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 объяснённые станционными данными.
- Квантифицированная неопределенность.** 90% бутстрэп-доверительный интервал: [160, 212]; суммарная погрешность ± 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].
- 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 ~15–20% ошибку в R. Следовательно, **применение некалиброванного IMERG для расчёта R-фактора недопустимо** и может приводить к систематическому занижению 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°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° (~11 км) сглаживает пиковые интенсивности в субпиксельных конвективных ячейках. Это приводит к систематическому занижению 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 устраняет 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. Неопределённость при переносе в умеренный климат Поволжья не верифицирована ввиду отсутствия российских дисдрометрических рядов. Чув-

ствительность 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 неопределённость 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 $|PBIAS| \approx 7\%$), 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, $\sim 500 \times 250$ км). Диапазон $P5-P95 = 70-430$ укладывается в 6-кратный интервал.
 3. **Межгодовая изменчивость:** $CV = 41\%$ — доминирующий источник неопределённости 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_HH/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>
11. Kim, S. et al. (2012). Temporal and spatial distributions of rainfall erosivity for flood season in South Korea. *J. Korean Soc. Hazard Mitigation*, for reference. [Среднее по 60 станциям, 1981–2010: $\sim 4\ 147\ \text{MJ}\cdot\text{мм}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$.]
12. Zhao, W. et al. (2017). Temporal and spatial variations of rainfall erosivity on the Loess Plateau, China (1961–2014). *Catena*, 156, 30–38.