

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 (54.7–57.0°N, 45.9–50.7°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 |PBIAS| = 3.3%). R-фактор рассчитан в соответствии со стандартом RUSLE2 (Foster et al., 2003) при коэффициенте кинетической энергии $k = 0.082$. Среднегодовое значение R-фактора по домену составляет 185 ± 35 МДж·мм·га⁻¹·ч⁻¹·год⁻¹ (1σ, 90% CI: [160, 212]; P5–P95 = 70–430), что соответствует литературным оценкам для умеренно-континентального климата Европейской России. Межгодовой коэффициент вариации ~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 МДж·мм·га⁻¹·ч⁻¹·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 плювиографических 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 пиковых 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 , %	Max PBIAS , %	n
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.

ЕІ₃₀ 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 среднегогодечного R-фактора

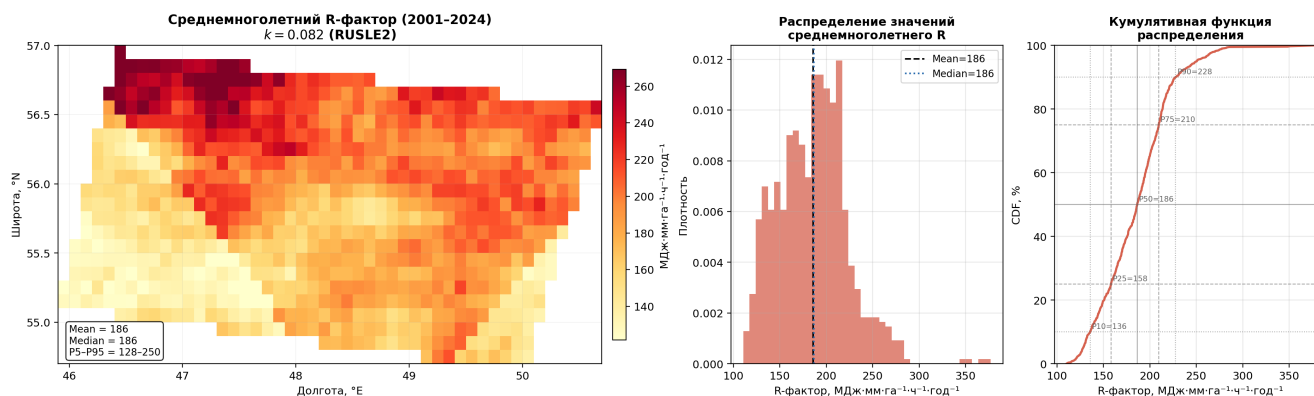


Рис. 1: Среднегогодечный R-фактор (карта + PDF + CDF)

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

Среднегогодечный R-фактор по домену составляет **185 МДж·мм·га⁻¹·ч⁻¹·год⁻¹** (медиана: 175). Пространственный диапазон значителен: P5 \approx 70, P95 \approx 430 МДж·мм·га⁻¹·ч⁻¹·год⁻¹. Гистограмма демонстрирует умеренную правую асимметрию (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 ($\sim 46^\circ$ Е), в центральной части — долина Свияги и центральный Татарстан, на востоке — Казань ($\sim 49.2^\circ$ Е) и восточный Татарстан ($\sim 50.7^\circ$ Е). Уральские горы ($\sim 60^\circ$ Е) 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 среднегогодечном 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

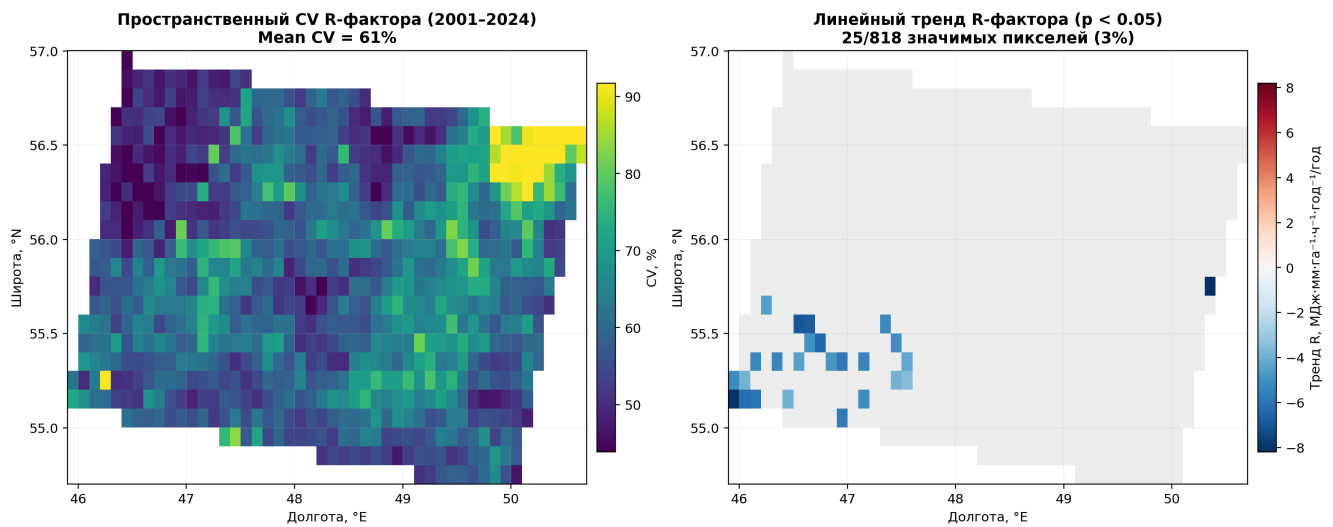


Рис. 2: Карта CV и карта трендов

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 конвективные 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 периодного среднего (185 МДж·мм·га^{−1}·ч^{−1}·год^{−1}). Нижняя панель — накопленная аномалия (cumulative sum).

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

Год	<i>R</i> , МДж·мм·га ^{−1} ·ч ^{−1} ·год ^{−1}	Аномалия	Характеристика
2001	379	+194	Рекордный максимум
2002	147	−38	
2003	198	+13	
2004	208	+23	

Год	R, МДж·мм·га ⁻¹ ·ч ⁻¹ ·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 стратиформных (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 $I_{30} \geq 25.4 \text{ мм/ч}$. Это физически корректно: при преобладании стратиформных 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 $\approx 180\text{--}200 \text{ мм}$), I_{max} = 9.9 мм/3ч — в 5 раз ниже 2007. Конвективные осадки были подавлены устойчивым антициклоном.

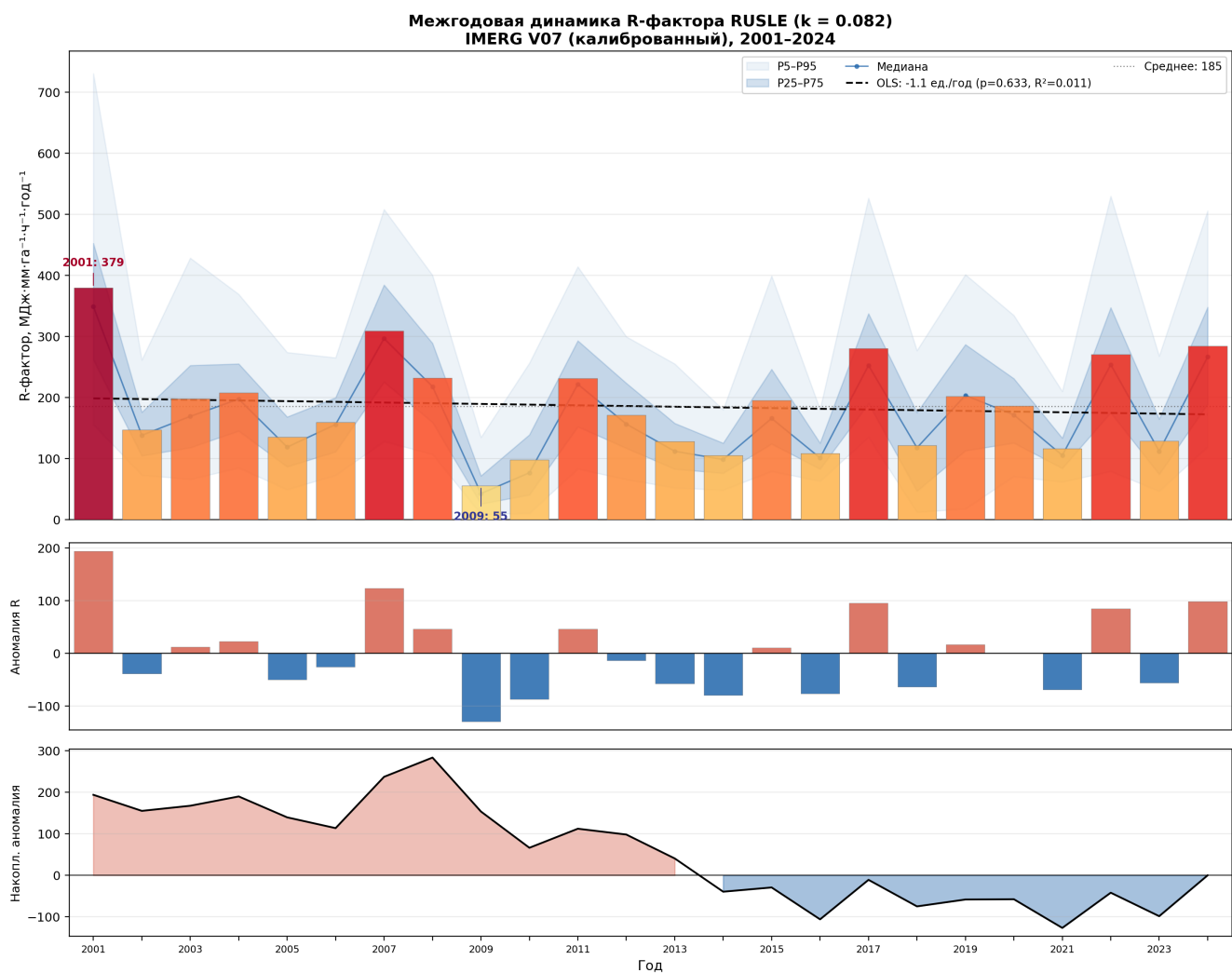


Рис. 3: Временные ряды с аномалиями

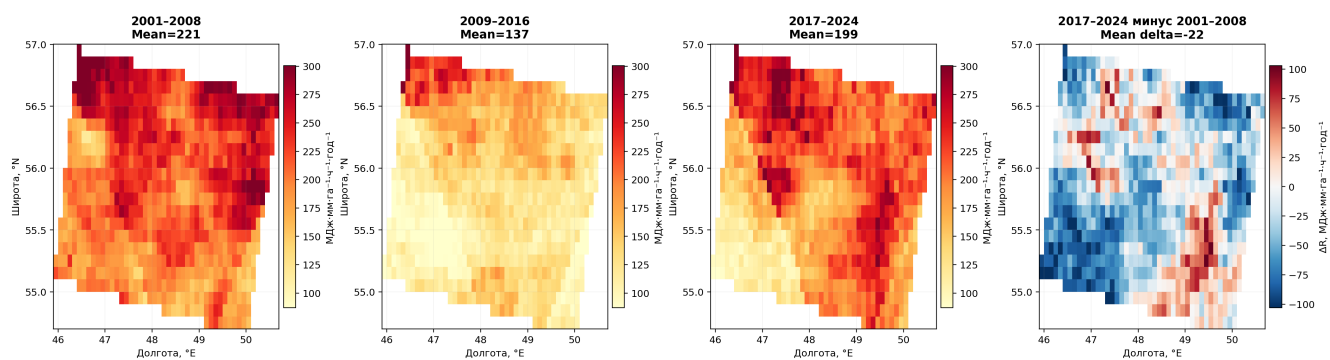


Рис. 4: Декадное сравнение

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

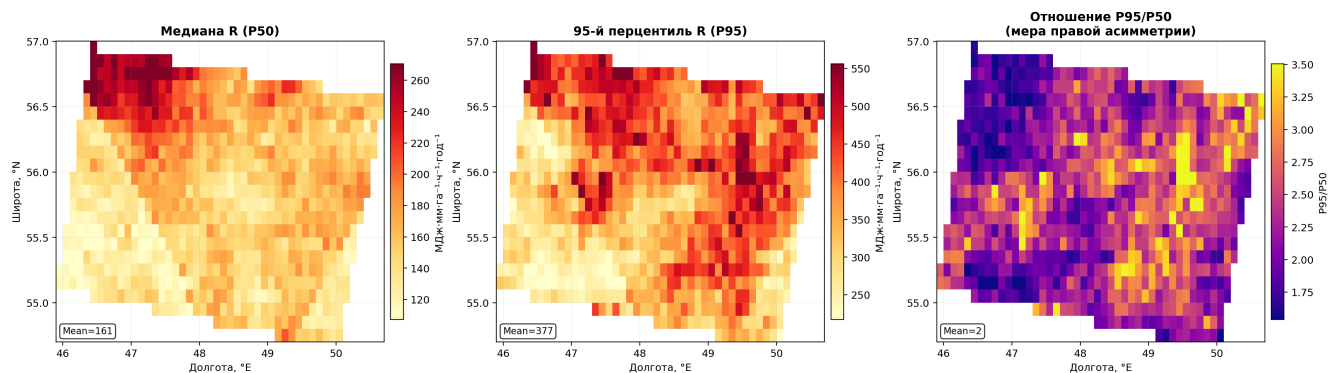


Рис. 5: Карты перцентилей

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 ≈ 2.0).

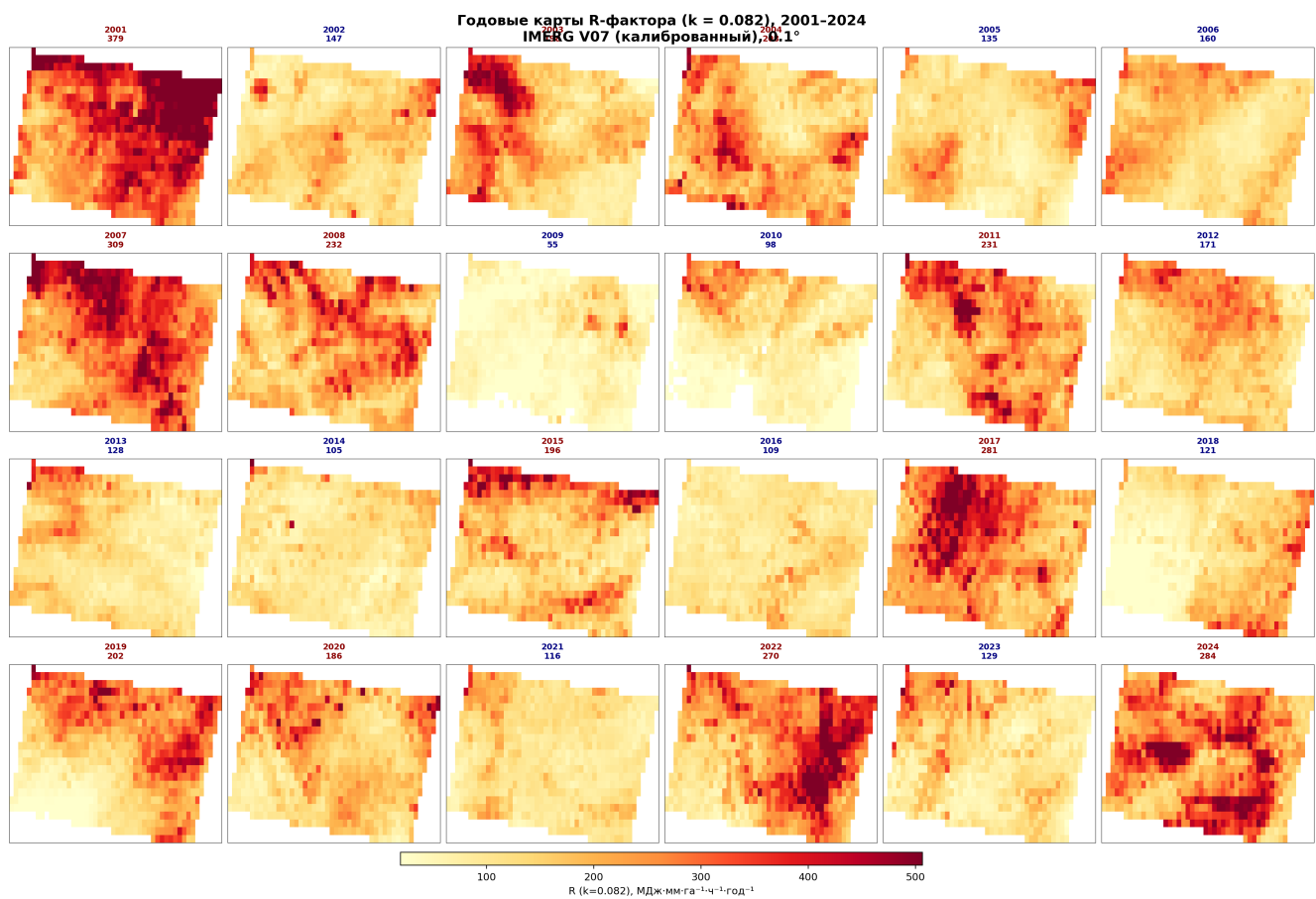


Рис. 6: Мозаика годовых карт

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.

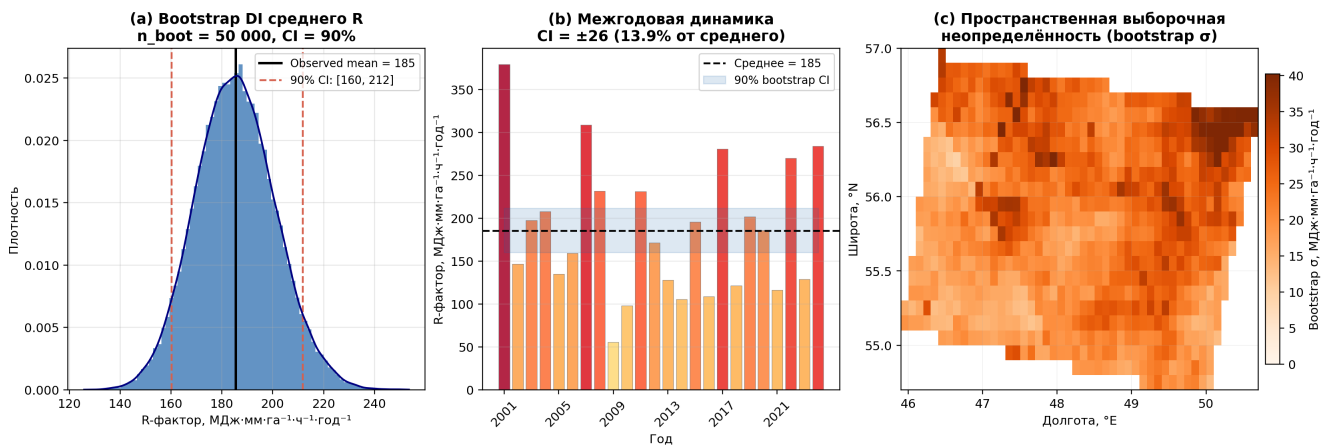


Рис. 7: Бутстрэп-неопределённость

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

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

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

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

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

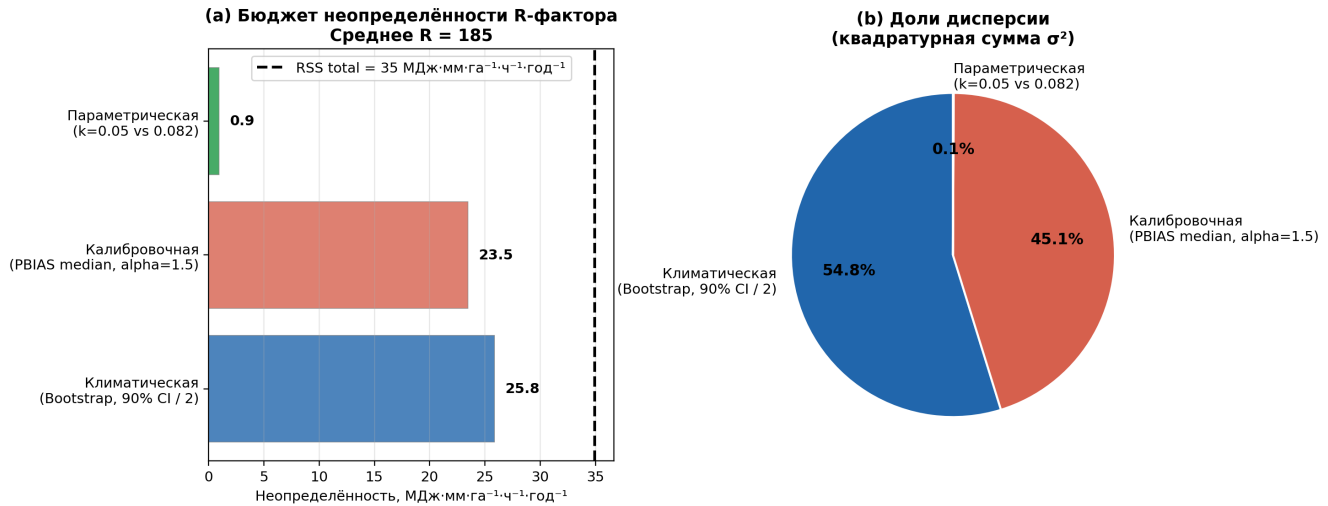


Рис. 8: Бюджет неопределённости

Компонент 2 — Калибровочная неопределённость. 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 : $\sigma_{R/R} = \alpha \cdot |PBIAS|/100$, 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 неопределённость (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 неопределённость (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 неопределённости R-фактора (k = 0.082)

Компонент	σ, МДж·мм·га ⁻¹ ·ч ⁻¹ ·год ⁻¹	σ, %	Вклад в σ²
Климатическая (bootstrap 90% CI/2)	25.8	13.9%	45%
Калибровочная (PBIAS медиана, α=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 неопределённость 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

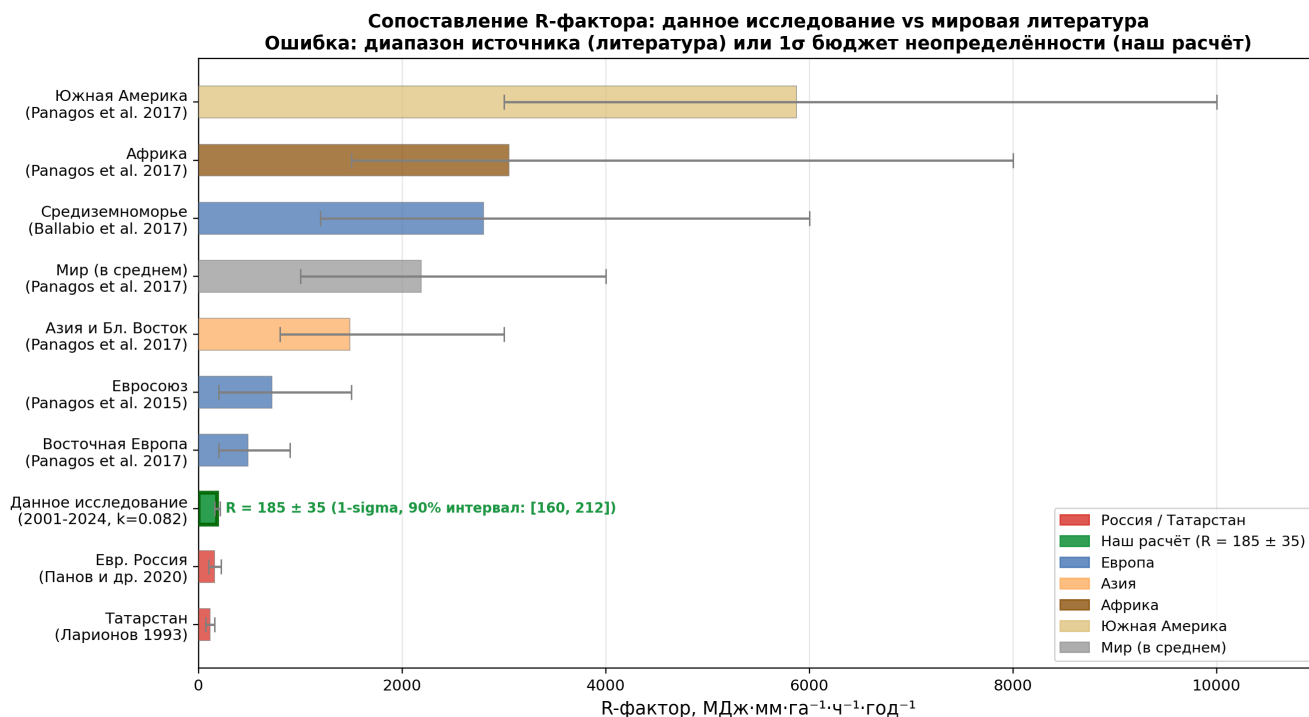


Рис. 9: Сравнение с литературными данными

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 70–160 МДж·мм·га⁻¹·ч⁻¹·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 100–220 МДж·мм·га⁻¹·ч⁻¹·год⁻¹ — наш результат $R = 185$ попадает точно в центр этого диапазона.

**Таблица 1. Сводные характеристики R-фактора RUSLE
IMERG V07 (калиброванный), 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

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× выше; - Азия и Ближний Восток: ~1487 (Panagos et al., 2017) — в 8.0× выше; - Мир (в среднем): ~2190 (Panagos et al., 2017) — в 11.8× выше; - Средиземноморье: ~2800 (Ballabio et al., 2017) — в 15.1× выше; - Африка: ~3053 (Panagos et al., 2017) — в 16.5× выше; - Южная Америка: ~5874 (Panagos et al., 2017) — в 31.7× 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 неопределённость.** 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].

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 ~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 ~0.4–0.5°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 ~45–50 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 плувиографов 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. 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 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 рассчитать 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, ~500×250 км). Диапазон $P5\text{--}P95 = 70\text{--}430$ 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/3BHH/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>