Валидация глобальных карт опасности наводнений для рек России по данным дистанционного зондирования

Е. Д. Павлюкевич[1,2], А. А. Деркачева[1]

[1] *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»*
Москва, 109028, Россия
E-mail: epavlyukevich@hse.ru
[2] *Институт водных проблем РАН, Москва, 119333, Россия*

Выполнена валидация глобальных карт опасности наводнений JRC (*англ.* Joint Research Centre) для рек России на основе сравнения с контурами исторических затоплений, дешифрированными по разновременным космическим снимкам Landsat и Sentinel-2. Целью исследования была оценка точности и применимости глобальных карт опасности наводнений для стратегической оценки рисков регионального уровня на территории России, поскольку отечественные карты затопления охватывают лишь отдельные населённые пункты и не образуют единого национального покрытия. Для анализа было отобрано 14 репрезентативных участков рек в различных физико-географических регионах страны, где за последние 30 лет зафиксированы крупные наводнения; обработано 26 космических снимков, соответствующих 26 событиям затопления различной обеспеченности. Соответствие модельных и фактических контуров затопления оценивалось по метрикам качества HR (*англ.* Hit Rate), FAR (*англ.* False Alarm Rate) и CSI (*англ.* Critical Success Index). Медианные значения метрик составили: HR — 0,93, FAR — 0,12, CSI — 0,84, что указывает в целом на хорошее качество глобального набора данных. Выявлена систематическая тенденция модели к завышению площадей затопления (в среднем на 13 %). Карты опасности наводнений JRC имеют ограничения для использования в локальном проектировании, но подходят для целей стратегического регионального планирования, особенно на территориях с недостатком данных.

Ключевые слова: валидация, глобальные карты опасности наводнений, дистанционное зондирование, зоны затопления, пространственный анализ, гидрологическое моделирование

Одобрена к печати: 26.06.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-331-345

Введение

Наводнения — одни из самых распространённых опасных природных явлений, часто связанных с серьёзным социально-экономическим ущербом и человеческими жертвами. В России за последние два десятка лет экономический ущерб от наводнений оценивается в 0,1–0,13 % ВВП страны, и на них приходится около 30 % погибших от всех опасных природных явлений (Бирюков, Терентьев, 2024). Продолжающиеся изменения климата увеличивают риск наводнений на реках (Hirabayashi et al., 2013; Martel et al., 2020; Milly et al., 2002), что в будущем приведёт к увеличению экономического ущерба и числу пострадавших. В условиях нарастающей частоты и интенсивности наводнений критически важным становится адаптация и управление рисками от затоплений (Wilby, Keenan, 2012). Картографирование зон затоплений становится эффективным и всё чаще используемым инструментом территориального планирования и снижения риска бедствий (Sayers et al., 2013). В мире развито создание карт затоплений разной обеспеченности, которые выполняются как в рамках пангосударственных инициатив (например, Environment Agency (https://check-long-term-flood-risk.service.gov.uk/map); Géorisques (https://www.georisques.gouv.fr/risques/inondations); HORA (*англ.* Natural Hazard Overview and Risk Assessment Austria) (https://hora.gv.at/)), так и для отдельных территорий (Moghadas et al., 2019; Tehrany et al., 2014; Vojinovic, Tutulic, 2009).

В России государственная оценка риска затоплений при пространственном планировании опирается на официально установленные зоны с особыми условиями использования территории, в состав которых входят зоны затопления и подтопления (Постановление...,

2014). Необходимость их установления и правовой статус закреплены российским законодательством, а картографические сведения размещены в Национальной системе пространственных данных и других системах аккумуляции кадастровых данных. Вместе с тем существующие данные имеют ряд существенных ограничений: границы затопления определяются только в пределах населённых пунктов, в настоящий момент работы выполнены не для всех населённых пунктов и, как правило, представлены исключительно для обеспеченности 1 %. Для формирования комплексной оценки риска затоплений, в том числе в целях стратегического планирования, необходимы карты для более широкого диапазона обеспеченностей, охватывающие всю территорию страны.

В России также накоплен значительный массив исследований, посвящённых картированию зон затопления. Однако практически все они выполнены для отдельных регионов или конкретных населённых пунктов (например, (Дьяконова и др., 2020; Крыленко и др., 2017; Мирошниченко и др., 2024; Терский и др., 2017)). Это связано с необходимостью сбора большого объёма натурных данных, что делает создание зон затопления для всей территории Российской Федерации чрезвычайно трудоёмкой задачей. В результате до сих пор отсутствует национальная карта затоплении с охватом всей страны, выполненная по единой методике.

Глобальные наборы данных о зонах затопления представляют собой ценный ресурс для быстрой оценки рисков, особенно для территорий, недостаточно охваченных гидрологическими данными. Последнее актуально для многих регионов России. Развитие вычислительной мощности и расширение возможностей спутникового зондирования в последние десятилетия обусловили появление ряда глобальных продуктов для оценки зон затопления. К наиболее распространённым из них относятся карты опасности CaMa-Flood (Yamazaki et al., 2011), GAR (*англ.* Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction) (Rudari et al., 2015), Fathom Global (Sampson et al., 2015), JRC (*англ.* Joint Research Center) (Dottori et al., 2016), GLOFRIS (*англ.* GLObal Flood Risk with Image Scenarios) (Winsemius et al., 2016) и Aqueduct (Gassert et al., 2015).

В настоящем исследовании для анализа были выбраны карты опасности наводнений JRC (Baugh et al., 2026), что обусловлено рядом факторов. Во-первых, данный продукт прошёл валидацию на репрезентативной выборке речных бассейнов различных регионов мира (Dottori et al., 2016, 2022; Risling et al., 2024), что свидетельствует о его нацеленности на широкую географию использования. Во-вторых, благодаря открытости данных и моделей, которые используются для создания карт JRC, обеспечивается полная прозрачность вычислительной процедуры, что повышает научную достоверность результатов. Наконец, продукт включает карты опасности для различных периодов повторяемости наводнений, что позволяет провести анализ как для частых событий, случающихся примерно раз в 10 лет, так и для крайне редких и экстремальных, которые могут происходить раз в 500 лет.

Цель исследования заключается в оценке точности и применимости глобальных карт опасности наводнений JRC для стратегической оценки рисков регионального уровня на территории России. Методология основана на сравнении с контурами реальных исторических наводнений, дешифрированными по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), для чего были отобраны 14 тестовых участков в различных географических регионах, где за последние 30 лет происходили разрушительные половодья и паводки.

Материалы и методы

Глобальные карты опасности наводнений JRC

Набор глобальных карт JRC основан на последовательной цепочке гидрологического, статистического и гидродинамического моделирования (*рис. 1*).

На первом этапе создаются глобальные сеточные архивы речного стока (реанализы) GloFAS (*англ.* Global Flood Awareness System) за период 1979–2022 гг. с использованием атмосферного реанализа ERA5 на сетке 0,05°. В качестве модели формирования стока в гло-

бальном гидрологическом реанализе использовалась пространственно-распределённая физически обоснованная модель LISFLOOD, разработанная в Объединённом исследовательском центре (JRC) Европейской комиссии (*англ.* European Commission) (van der Knijff et al., 2010). Входными данными служат карты рельефа, почв и ландшафтов, а также метеорологические данные реанализа ERA5.

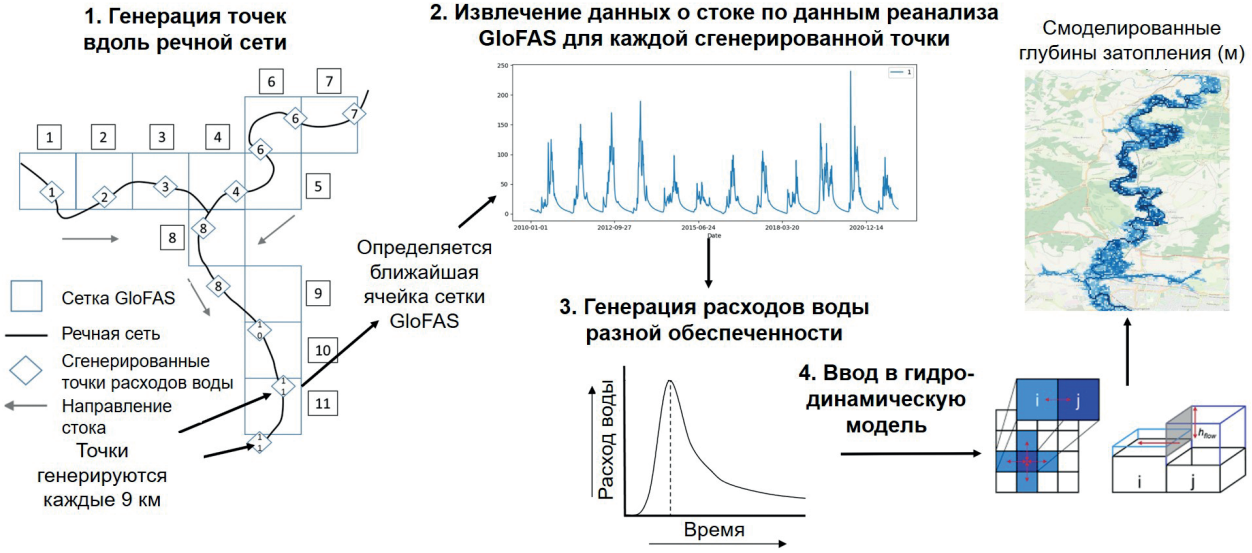


Рис. 1. Методика расчёта зон затопления на основе комплекса гидрологической и гидродинамической моделей при создании данных JRC (адаптировано из работы (Dottori et al., 2022))

На втором этапе из полученных временных рядов суточного стока для каждого элемента речной сети с площадью водосбора не менее 500 км^2 выделяются годовые максимумы расходов, к которым аппроксимируется распределение Гумбеля для оценки расчётных расходов заданной обеспеченности. На их основе формируются синтетические гидрографы: пиковое значение соответствует расходу выбранного периода повторяемости. Из каждого гидрографа вычитается расход 1,5-летней обеспеченности, принятый за руслонаполняющий. Таким образом в гидродинамическую модель поступает только та часть стока, которая непосредственно выходит на пойму. Гидрографы формируются для семи периодов повторяемости: 10, 20, 50, 75, 100, 200 и 500 лет (обеспеченности: 10; 5; 2; ~1,33; 1; 0,5 и 0,2 %).

На третьем этапе расчёты зон затопления выполняются с помощью двумерной гидродинамической модели LISFLOOD-FP (Bates, de Roo, 2000) с пространственным разрешением около 90 м. Топографической основой служит цифровая модель рельефа MERIT-Hydro (Yamazaki, 2019), коэффициенты шероховатости Манинга задаются по типу землепользования на основе карты Copernicus Global Land Cover (Buchhorn et al., 2020). В результате гидродинамическая модель рассчитывает глубину затопления в каждой ячейке сетки.

Более подробная информация об оригинальной методологии представлена в работах (Alfieri et al., 2014) и (Dottori et al., 2017).

Для верификации данных выполнено сравнение полученных карт с официальными картами зон затопления для ряда речных бассейнов, а также с данными спутниковых наблюдений исторических наводнений в Европе, Южной Америке, Африки, Азии (Bernhofen et al., 2022; Dottori et al., 2022; Risling et al., 2024; Singh, Mohanty, 2023). Однако на территории России оценки не осуществлялись.

Карты опасности наводнений JRC широко используются в современных исследованиях. На их основе проводят крупномасштабную оценку подверженности населения и экономических активов риску наводнений (Lindersson et al., 2021; Yazawa et al., 2026). Кроме того, их используют в качестве эталона для калибровки, валидации и обучения других моделей (Bernhofen et al., 2021; Rachit et al., 2026).

Методы валидации глобальных карт опасности наводнений

Валидация глобальных карт наводнений JRC проводилась на основе данных ДЗЗ. Потребовалось дополнительно определить обеспеченность затопления, наблюдаемого на снимке в известную дату, что было выполнено с привлечением режимных данных наблюдений за уровнем воды. Подробнее исходные данные описаны в *табл. 1.*

Таблица 1. Исходные данные для валидации глобальных карт наводнений JRC

Тип данных	Ресурс	Описание
Данные ДЗЗ	Данные спутников Landsat-5, -7, -8, -9, Sentinel-2	Космические снимки (разрешение 30 и 10 м)
Максимальные уровни воды	Гидрологический ежегодник, многолетние данные о режиме и ресурсах вод суши	Ряд максимальных уровней воды для определения обеспеченности затопления

Выбор ключевых участков валидации

Для валидации глобальных карт наводнений JRC было отобрано 14 репрезентативных ключевых участков. Отбор осуществлялся на основании трёх критериев.

Первый критерий — физико-географическое разнообразие речных участков в пределах территории России. Первостепенное значение при этом придавалось различиям в формировании стока и в морфологии русла и поймы, поскольку данный фактор может существенно влиять на точность воспроизведения затоплений глобальным набором данных. Также важно, что рассматриваемый набор данных основан на гидрологическом реанализе GloFAS, который в свою очередь базируется на метеорологическом реанализе ERA5, ассимилирующем наблюдения наземной метеорологической сети. Принимая во внимание неравномерность плотности метеорологических станций на территории России, можно предположить, что в европейской части страны, характеризующейся более развитой наблюдательной сетью, точность глобального набора данных будет систематически выше.

Таблица 2. Тестовые участки рек России для валидации глобальных карт наводнений на основе ДЗЗ

№	Река	Регион	Населённый пункт (гидрологический пост)	Длина участка, км	Период наблюдений, годы	*H*, см (от нуля поста)	*P*, %	Дата	Снимок
1	Амур	Хабаровский край	Комсомольск-на-Амуре	150	1932–2023	911	1	12.09.2013	Landsat-7
						820	2	14.09.2019	Santinel-2
						704	5	01.10.2020	Landsat-7
						668	10	08.10.2020	Santinel-2
2	Колыма	Республика Саха (Якутия)	Среднеколымск	78	1927–2023	1420	2	17.05.2013	Landsat-8
3	Енисей	Красноярский край	Красноярск	137	1902(1968)–2023	456	5	09.06.2021	Santinel-2
						440	10	18.06.2010	Landsat-7
4	Лена	Республика Саха (Якутия)	Якутск	73	1941–2023	878	5	15.05.2007	Landsat-7
						848	10	17.05.2011	Landsat-7
5	Десна	Брянская обл.	Брянск	132	1900–2023	501	10	14.04.1999	Landsat-5
6	Обь	Ханты-Мансийский автономный округ	Нижневартовск	83	1972–2023	1061	2	18.06.2015	Landsat-7
						1044	5	26.06.2015	Landsat-8

Окончание табл. 2

№	Река	Регион	Населённый пункт (гидрологический пост)	Длина участка, км	Период наблюдений, годы	*H*, см (от нуля поста)	*P*, %	Дата	Снимок
7	Вычегда	Республика Коми	Сыктывкар	80	1924–2023	617	10	03.05.2016	Landsat-7
8	Урал	Оренбургская обл.	Оренбург	63	1927–2024	1187	2	13.04.2024	Landsat-9
						1092	5	11.04.2024	Santinel-2
						977	10	21.04.2024	Landsat-8
9	Кубань	Краснодарский край	Невинномысск	74	1927–2023	1144	1	21.06.2002	Landsat-5
10	Зея	Амурская обл.	Благовещенск	108	1900–2023	805	2	20.08.2013	Landsat-8
						717	10	24.06.2021	Landsat-7
11	Печора	Ненецкий автономный округ	Оксино/ Нарьян-Мар	168	1917–2023	774	10	28.05.2020	Santinel-2
12	Верхняя Обь	Алтайский край	Барнаул	101	1960–2023	670	2	07.06.2014	Landsat-7
						640	5	20.06.2010	Landsat-5
						600	10	01.05.2015	Landsat-8
13	Белая	Башкортостан	Уфа	220	1878–2023	944	5	27.04.1991	Landsat-5
						902	10	30.04.2001	Landsat-7
14	Кола	Мурманская обл.	1429-й км Октябрьской ж.д.	17	1928–2023	330	10	07.06.2020	Landsat-8

П р и м е ч а н и е: *P* — обеспеченность, № — номер участка, *H* — уровень воды.

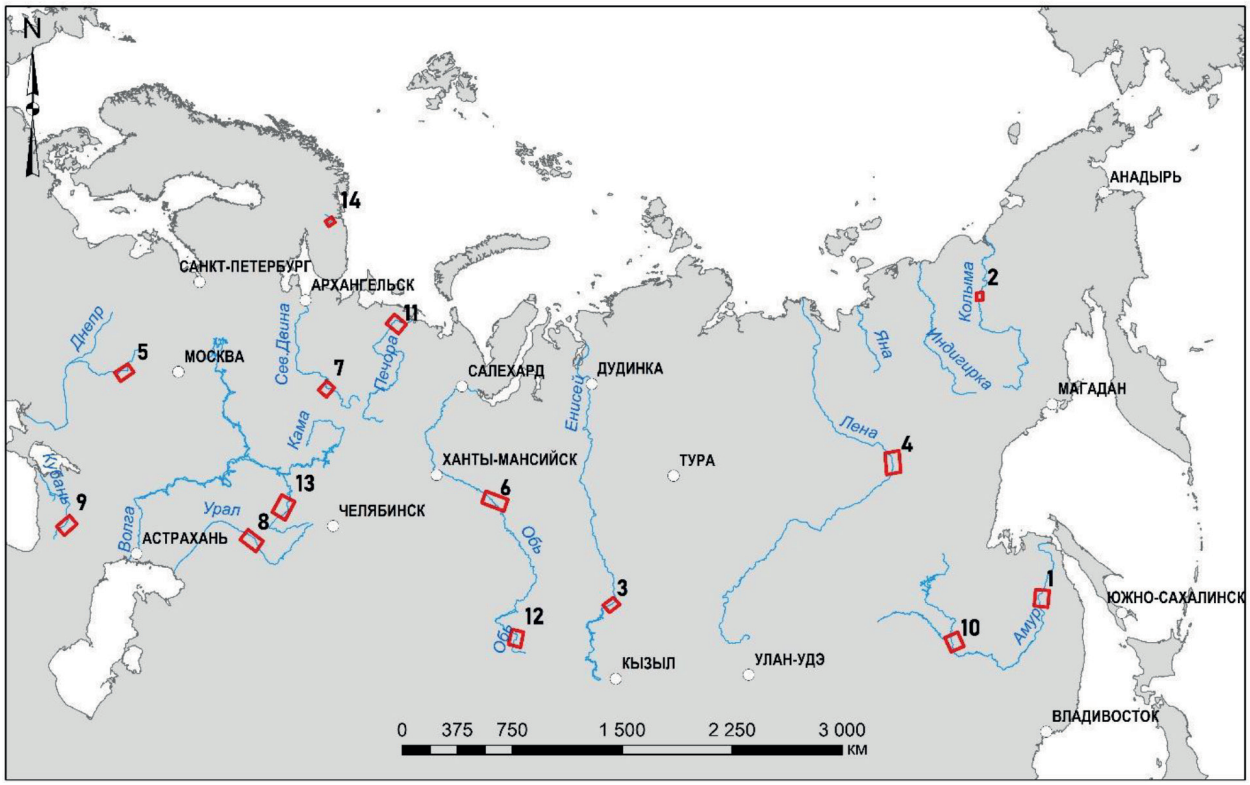


Рис. 2. Тестовые участки для валидации глобального набора данных JRC

Вторым критерием послужило наличие задокументированного крупного наводнения в течение последних 30 лет. Данный временной интервал обусловлен двумя факторами: во-первых, доступностью актуальных данных о рельефе местности; во-вторых, достаточным объёмом архива космических снимков, поскольку материалы спутниковой съёмки до 2000 г. имеют существенно меньшее покрытие. Поиск информации о наводнениях осуществлялся по материалам средств массовой информации, публикациям в социальных сетях и научным статьям.

Третий критерий — наличие гидрологических данных о максимальных уровнях воды на рассматриваемом участке реки. Данные сведения необходимы для определения обеспеченности затопления, зафиксированного на космическом снимке.

Речные участки, отобранные в соответствии с указанными критериями, представлены в *табл. 2* и на *рис. 2*.

Данные дистанционного зондирования

Валидация глобального набора карт затопления выполнялась сравнением модельных контуров с границами реальных исторических наводнений, дешифрированными по данным ДЗЗ. Данный этап включал несколько последовательных подготовительных стадий.

На первой стадии осуществлялся сбор гидрологических данных по выбранным гидрологическим постам. Сведения об исторических максимальных уровнях воды были получены из гидрологических ежегодников, базы данных Государственного гидрологического института, а также автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов.

Вторым шагом являлся расчёт обеспеченности максимального уровня воды для исследуемых гидрологических постов. Статистическая обработка проводилась в программном комплексе HydroStatCalc, эмпирическое распределение аппроксимировалось теоретической кривой распределения Пирсона типа III.

Далее проводился подбор спутниковых снимков, соответствующих уровню воды заданной обеспеченности по данным гидрологических постов. В работе использовались материалы съёмки, находящиеся в открытом доступе: снимки спутников Landsat-5, -7, -8, -9 и Sentinel-2. Критерием отбора служило отсутствие облачности в пределах зоны затопления в даты, когда наблюдался высокий уровень воды. Перечень отобранных снимков приведён в *табл. 2*.

Заключительной стадией было непосредственное выделение зоны затопления по космическому снимку. Поскольку затопленные острова и поймы с развитым растительным покровом отличаются по спектральным характеристикам от участков открытой воды, их дешифрирование не представляется возможным на основе индексов NDWI (*англ.* Normalized Difference Water Index) или MNDWI (*англ.* Modification of Normalised Difference Water Index) (Корнилова и др., 2018). С учётом данного обстоятельства для выделения зон затопления применялась обучаемая контролируемая классификация изображений в программной среде ArcGIS.

Критерии оценки качества

Вся оценка пространственной точности данных JRC выполнялась только для контуров охвата наводнением, глубина затопления не анализировалась. Контуры JRC сопоставлялись с контурами космических снимков с использованием трёх метрик пространственного наложения полигонов, применяемых в оригинальных работах по валидации JRC (*рис. 3*) (Dottori et al., 2016, 2022).

Доля попаданий HR (*англ.* Hit Rate) описывает совпадение смоделированной и наблюдаемой зон затопления и рассчитывается как

$$\mathrm{HR} = \frac{F_m \cap F_o}{F_o},$$

где F_m — смоделированный контур; F_o — наблюдаемая (фактическая) область затопления; а $F_m \cap F_o$ — область пересечения F_m и F_o, т.е. корректно оценённая моделью как затопляемая. Значения HR находятся в диапазоне от 0 до 1, где значение 1 соответствует случаю, при котором все затопленные ячейки фактических данных согласуются с модельными результатами. Данный критерий не учитывает области ложно предсказанного затопления. Они оцениваются долей ложных тревог FAR (*англ.* False Alarm Rate):

$$\mathrm{FAR} = \frac{F_m / F_o}{F_m},$$

где F_m/F_o — площадь, ошибочно классифицированная моделью как затопленная. Значения FAR варьируются от 0 (ложные затопления отсутствуют) до 1 (все смоделированные затопления являются ложными). Критерием, обеспечивающим интегральную оценку соответствия между смоделированным и фактическим затоплением, становится критический индекс успеха CSI (*англ.* Critical Success Index), также известный как критерий Жаккарда (*англ.* Jaccard Index) или пересечение над объединением IoU (*англ.* Intersection over Union):

$$\mathrm{CSI} = \frac{F_m \cap F_o}{F_m \cup F_o},$$

где $F_m \cap F_o$ — площадь наложения контуров; $F_m \cup F_o$ — площадь, объединяющая наблюдаемые и смоделированные затопленные территории. Значения CSI варьируются от 0 (полное несовпадение смоделированного и фактического затопления) до 1 (идеальное совпадение смоделированного затопления с фактическим).

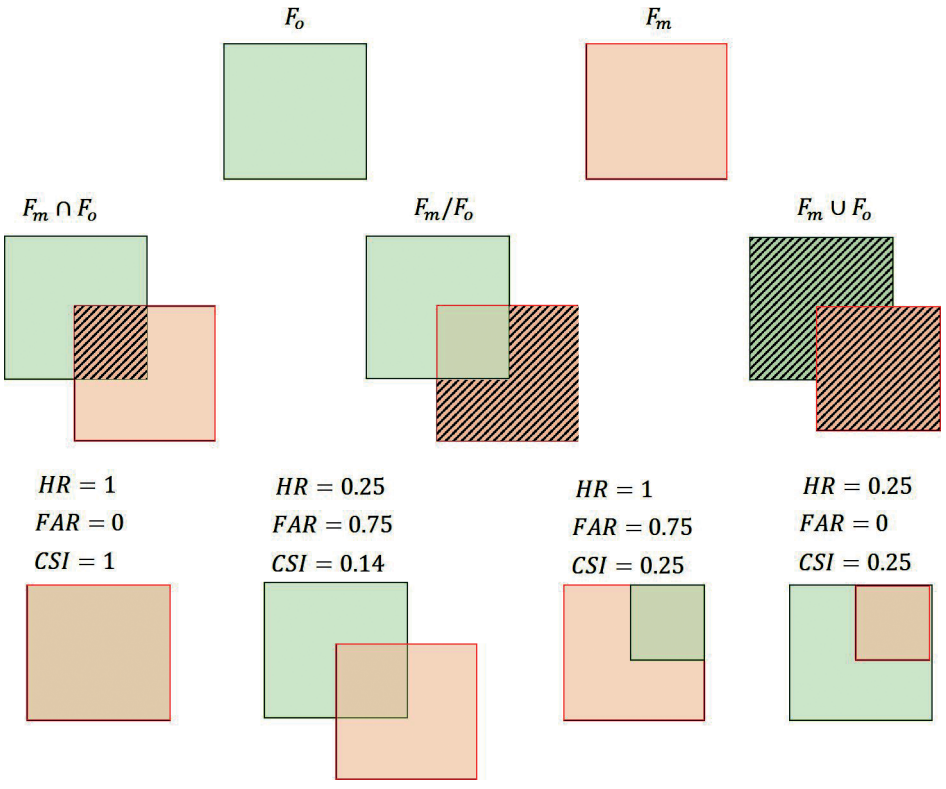


Рис. 3. Примеры пространственного соотношения смоделированных и наблюдаемых зон затопления при различных значениях метрик качества, использовавшихся для валидации глобального набора данных JRC

Результаты и обсуждение

Проведённая количественная оценка точности глобальных карт затопления JRC выявила не только общие закономерности, но и ряд ограничений. При валидации по данным ДЗЗ (*табл. 3*, *рис. 4*) медианные метрики качества для всех исследуемых участков составили: HR — 0,936 (диапазон 0,57–0,99), FAR — 0,129 (диапазон 0,034–0,44), CSI — 0,84 (диапазон 0,50–0,89), что указывает на применимость этих данных для стратегических региональных оценок, например, составления обзорных карт затапливаемых территорий. Однако значения демонстрируют значительный разброс на отдельных тестовых участках. Ниже приведены факторы, которые вероятно влияют на ошибки продукта и точность оценок.

Таблица 3. Результаты валидации на основе данных ДЗЗ

Река	Населённый пункт	P, %	Площадь затопления, км^2		Метрики качества		
			Факт	Модель	HR	FAR	CSI
Амур	Комсомольск-на-Амуре	1	1763	2033	0,997	0,135	0,862
Кубань	Невинномысск		117,6	183	0,875	0,439	0,520
Амур	Комсомольск-на-Амуре	2	1731	1997	0,997	0,135	0,863
Колыма	Среднеколымск		733	1063	0,999	0,312	0,688
Обь	Нижневартовск		1873	1973	0,957	0,092	0,872
Урал	Оренбург		310	324	0,961	0,079	0,888
Верхняя Обь	Барнаул		873	721	0,790	0,044	0,762
Зея	Благовещенск		666	443	0,567	0,149	0,516
Амур	Комсомольск-на-Амуре	5	1703	1940	0,994	0,128	0,868
Лена	Якутск		723	813	0,972	0,136	0,843
Енисей	Красноярск		109	114	0,905	0,136	0,793
Обь	Нижневартовск		1772	1899	0,938	0,125	0,827
Урал	Оренбург		305	313	0,959	0,065	0,899
Верхняя Обь	Барнаул		714	671	0,823	0,125	0,736
Белая	Уфа		1235	1143	0,894	0,034	0,866
Белая	Уфа	10	1168	1040	0,822	0,077	0,769
Кола	1429-й км Октябрьской ж. д.		2,75	3,19	0,817	0,295	0,609
Верхняя Обь	Барнаул		789	650	0,775	0,058	0,740
Печора	Оксино/Нарьян-Мар		3288	3138	0,917	0,039	0,885
Зея	Благовещенск		244	337	0,793	0,425	0,500
Амур	Комсомольск-на-Амуре		1672	1895	0,991	0,126	0,868
Енисей	Красноярск		93,5	111	0,934	0,216	0,743
Лена	Якутск		670	786	0,988	0,158	0,834
Десна	Брянск		271	298	0,957	0,129	0,839
Вычегда	Сыктывкар		180	234	0,909	0,298	0,656
Урал	Оренбург		281	302	0,949	0,117	0,843

Примечание: цвет соответствует значениям метрик качества в следующих диапазонах:
— отличное качество (>0,8 для метрик HR и CSI, <0,2 для метрики FAR)
— хорошее качество (0,6–0,8 для метрик HR и CSI, 0,2–0,4 для метрики FAR)
— удовлетворительное качество (0,4–0,6 для метрик HR, CSI и FAR)

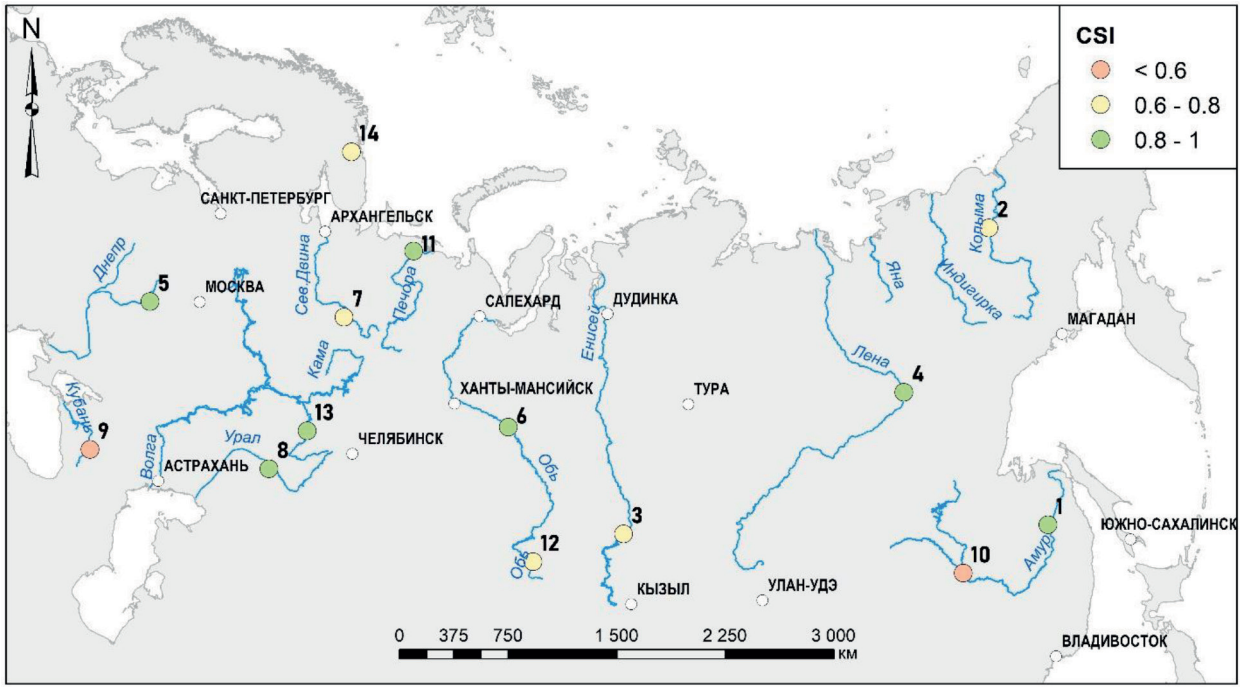


Рис. 4. Пространственное распределение CSI (отношение площади корректно смоделированного затопления к общей площади, объединяющей наблюдаемые и смоделированные затопленные территории) по результатам валидации глобальных карт затопления на основе данных ДЗЗ. Для каждого участка приведены значения CSI, осреднённые по всем обеспеченностям. Значения CSI варьируются от 0 (полное несовпадение смоделированного и фактического затопления) до 1 (идеальное совпадение смоделированного затопления с фактическим)

Модель демонстрирует систематическую тенденцию к завышению площадей затопления. Медианное значение доли ложных тревог FAR составило 0,13, что указывает на завышение затопленных площадей в среднем на 13 % по сравнению с наблюдаемыми данными. В 74 % случаев модель завысила площади затопления.

Анализ метрики HR, описывающей совпадение смоделированной и наблюдаемой зон затопления, демонстрирует существенно более высокую долю успешных результатов. В 84,6 % случаев метрика HR составила больше 0,8 со средним значением 0,93 и медианой 0,95, что указывает на отличное качество глобального набора данных. Только 11,5 % выборки находится в диапазоне 0,6–0,8. Удовлетворительные значения ($HR < 0,6$) зафиксированы всего на одном участке (р. Зея в Благовещенске, HR — 0,567).

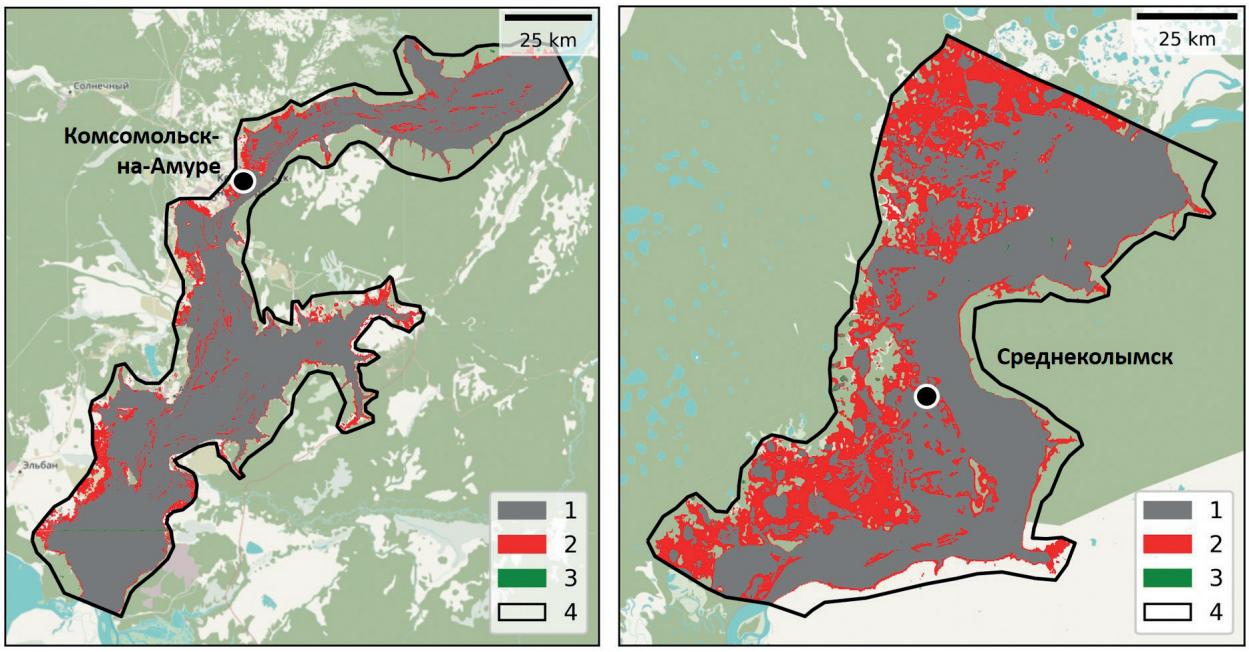
Критический индекс успеха CSI, описывающий интегральную оценку соответствия между смоделированным и фактическим затоплением, выявил более дифференцированное распределение. В 53,8 % случаев оценки достигли высоких значений ($CSI > 0,8$) со средним 0,86, демонстрируя отличную общую согласованность между результатами моделирования и наблюдаемыми границами затопления. Треть выборки (34,6 %) находится в промежуточном диапазоне 0,6–0,8, а 11,5 % показали значения ниже 0,6, что указывает на удовлетворительное качество глобального набора данных.

Анализ пространственного распределения участков с пониженным качеством позволяет предположить региональные факторы, определяющие качество моделирования глобального набора данных.

С уменьшением фактической площади затопления наблюдается закономерное снижение метрик качества. Данная зависимость носит преимущественно технический характер: при малых масштабах затопления даже незначительные ошибки модели приводят к существенному ухудшению метрик качества. Наиболее показателен участок р. Колы (1429-й км Октябрьской ж.д., $P = 10$ %), где фактическая площадь зоны затопления составила всего

2,75 км^2, а CSI = 0,609. Для сравнения: на участках с площадью затопления более 1000 км^2 CSI в среднем превышает 0,85, достигая 0,899 на р. Урал у Оренбурга (P = 5 %).

Как показали результаты, самые низкие метрики качества зафиксированы для участков, расположенных в зонах с низкой плотностью наблюдательной сети (р. Колыма — г. Среднеколымск (*рис. 5б*), р. Лена — г. Якутск, р. Вычегда — г. Сыктывкар, р. Зея — г. Благовещенск, р. Кубань — г. Невинномысск). Поэтому одним из факторов, определяющих достоверность результатов, может стать качество исходных метеорологических данных, используемых в гидрологическом реанализе GloFAS. Реанализ ERA5 ассимилирует данные ограниченного числа метеостанций, и в регионах с редкой сетью наблюдений пространственная интерполяция осадков и температуры становится недостаточно репрезентативной, даже несмотря на ассимиляцию и спутниковых наблюдений. Для горных территорий России выше отметок 2000 м количество ассимилируемых станций стремится к нулю, тогда как реальное распределение осадков отличается крайне высокой пространственной неоднородностью, обусловленной орографическими особенностями. Это приводит к систематическим ошибкам в расчётах максимального стока.



а *б*

Рис. 5. Сравнение данных JRC и исторических затоплений на р. Амур близ г. Комсомольска-на-Амуре (обеспеченность 1 %) (*а*) (снимок Landsat-7, 12.09.2013) и р. Колыме около г. Среднеколымска (обеспеченность 2 %) (*б*) (снимок Landsat-8, 17.05.2013): 1 — пересечение между данными JRC и границами исторического затопления, 2 — только данные JRC, 3 — только результаты дешифрирования исторического затопления, 4 — границы валидации

На участках с коротким временем добегания и сложными условиями формирования стока (р. Кубань — г. Невинномысск, р. Обь — г. Барнаул) зафиксированы наиболее низкие значения CSI. Для р. Кубань у г. Невинномысска при P = 1 % CSI составил 0,52, для р. Оби у г. Барнаула при P = 2 % — 0,76, при P = 10 % — 0,74. Вероятно, в данном случае на результаты может влиять не только неоднородность метеорологических данных в верховьях бассейна, но и разрешение модели. Суточное разрешение гидрологической модели может недостаточно полно отражать динамику быстроразвивающихся паводков в горных бассейнах.

Кроме того, модель не учитывает регулирование стока водохранилищами. На участках, расположенных ниже крупных водохранилищ (р. Енисей — г. Красноярск, р. Зея — г. Благовещенск), наблюдаются низкие значения CSI (0,50–0,79). Косвенной причиной

может быть отсутствие учёта сбросов водохранилищ и трансформации стока в глобальной гидрологической модели.

Важным методологическим аспектом, повлиявшим на результаты валидации глобального набора данных JRC, выступает несоответствие временных периодов. Валидация проводилась за единый период 1979–2022 гг., что соответствует доступности гидрологического реанализа. Включение в ретроспективу данных только за последние 40 лет может не в полной мере отражать статистически редкие события. Учёт более длительных исторических рядов позволил бы уточнить параметры распределения максимального стока и, вероятно, повысить точность моделирования для редких событий.

В качестве исходных данных для моделирования глобального набора данных использовались цифровые модели рельефа с пространственным разрешением 90 м, что накладывает ограничения на точность расчёта границ затопления. Во-первых, даже незначительные ошибки высот в пределах разрешения цифровой модели рельефа приводят к существенному смещению расчётных границ. Для рек с широкими, плоскими поймами (р. Амур у г. Комсомольска-на-Амуре, р. Обь у г. Нижневартовска, р. Урал у г. Оренбурга) характерно наибольшее расхождение вычисленной и фактической площади затопления (модель систематически завышает площади затопления на 10–15 %) (см. *рис. 5а*). Во-вторых, данное разрешение не позволяет корректно воспроизводить элементы антропогенной инфраструктуры (дороги, насыпи, дамбы, мосты), которые имеют характерные размеры менее 90 м, но существенно влияют на границы затопления (р. Урал — г. Оренбург, р. Зея — г. Благовещенск). Игнорирование этих элементов в глобальной модели приводит к снижению точности определения зон затопления. Поэтому для целей локального планирования прямое применение глобальных наборов данных JRC не рекомендуется и может приводить к значительным ошибкам.

Выводы

В процессе валидации глобального набора данных JRC было обработано 26 космических снимков для 14 ключевых участков по 26 событиям наводнений.

Полученные результаты подтверждают достаточно высокое качество глобального набора данных JRC для использования на территории России. При валидации по спутниковым данным медианные метрики составили: HR — 0,93, FAR — 0,12, CSI — 0,84.

Глобальные карты опасности наводнений могут служить ценным инструментом для стратегического планирования и первичной оценки рисков на региональном масштабе, особенно на территориях с недостатком данных. Применение данных карт для локального инженерного проектирования в России ограничено ключевыми факторами: чувствительностью к ошибкам цифровых моделей рельефа и игнорированием антропогенной нагрузки.

Литература

1. *Бирюков Е.С.*, *Терентьев Н.Е.* К оценке экономического ущерба от наводнений в России и потенциала адаптации // Теория и практика общественного развития. 2024. № 11. С. 162–168. DOI: 10.24158/tipor.2024.11.19.
2. *Дьяконова Т.А.*, *Кривко В.В.*, *Агафонникова Е.О. и др.* Определение границ зон затопления на основе гидродинамического моделирования // Мат. физика и компьютер. моделирование. 2020. Т. 23. № 3. С. 12–22. DOI: 10.15688/mpcm.jvolsu.2020.3.2.
3. *Корнилова Е.Д.*, *Крыленко И.Н.*, *Головлев П.П. и др.* Верификация двумерной гидродинамической модели р. Лены у г. Якутска по разновременным данным космической съёмки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 169–178. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-169-178.
4. *Крыленко И.Н.*, *Головлев П.П.*, *Корнилова Е.Д.*, *Сазонов А.А.*, *Фингерт Е.А.* Оценка характеристик затопления на основе двумерной гидродинамической модели // 13-я Общероссийская

научно-практич. конф. и выставка «Перспективы развития инженер. изысканий в строительстве в Российской Федерации». М.: ООО «Геомаркетинг», 2017. С. 187–190.
5. *Мирошниченко С.А.*, *Лучников А.И.*, *Лепешкин С.А.*, *Тиунов А.А.* Разработка гидродинамической модели р. Вага для решения задач защиты населенных пунктов от затопления // Водное хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 4. С. 73–86. DOI: 10.35567/19994508-2024-4-73-86.
6. Постановление Правительства Российской Федерации от 18 апреля 2014 г. № 360 «Об определении границ зон затопления и подтопления (с «Правилами определения границ зон затопления, подтопления»)».
7. *Терский П.Н.*, *Фатхи М.О.*, *Цыпленков А.С.*, *Землянов И.В.*, *Горелиц О.В.*, *Павловский А.Е.* Определение границ зон затопления рек города Москвы // Геориск. 2017. № 3. С. 20–29.
8. *Alfieri L.*, *Salamon P.*, *Bianchi A. et al.* Advances in pan-European flood hazard mapping // Hydrological Processes. 2014. V. 28. P. 4067–4077. DOI: 10.1002/hyp.9947.
9. *Bates P.D.*, *de Roo A.P.J.* A simple raster-based model for flood inundation simulation // J. Hydrology. 2000. V. 236. P. 54–77. DOI: 10.1016/S0022-1694(00)00278-X.
10. *Baugh C.*, *Colonese J.*, *D'Angelo C. et al.* Global river flood hazard maps. European Commission, Joint Research Centre, 2026. DOI: 10.2905/JRC.VD32YWG.
11. *Bernhofen M.V.*, *Trigg M.A.*, *Sleigh P.A. et al.* Global flood exposure from different sized rivers // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2021. V. 21. No. 9. P. 2829–2847. DOI: 10.5194/nhess-21-2829-2021.
12. *Bernhofen M.V.*, *Cooper S.*, *Trigg M. et al.* The role of global data sets for riverine flood risk management at national scales // Water Resources Research. 2022. V. 58. Article e2021WR031555. DOI: 10.1029/2021WR031555.
13. *Buchhorn M.*, *Lesiv M.*, *Tsendbazar N.-E. et al.* Copernicus Global Land Cover layers — Collection 2 // Remote Sensing. 2020. V. 12. Article 1044. DOI: 10.3390/rs12061044.
14. *Dottori F.*, *Salamon P.*, *Bianchi A. et al.* Development and evaluation of a framework for global flood hazard mapping // Advances in Water Resources. 2016. V. 94. P. 87–102. DOI: 10.1016/j.advwatres.2016.05.002.
15. *Dottori F.*, *Kalas M.*, *Salamon P. et al.* An operational procedure for rapid flood risk assessment in Europe // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2017. V. 17. No. 7. P. 1111–1126. DOI: 10.5194/nhess-17-1111-2017.
16. *Dottori F.*, *Alfieri L.*, *Bianchi A. et al.* A new dataset of river flood hazard maps for Europe and the Mediterranean Basin // Earth System Science Data. 2022. V. 14. No. 4. P. 1549–1569. DOI: 10.5194/essd-14-1549-2022.
17. *Gassert F.*, *Reig P.*, *Shiao T.*, *Luck M.* Aqueduct global maps 2.1: Constructing decision-relevant global water risk indicators. World Resources Institute, 2015. 31 p.
18. *Hirabayashi Y.*, *Mahendran R.*, *Koirala S. et al.* Global flood risk under climate change // Nature Climate Change. 2013. V. 3. No. 9. P. 816–821. DOI: 10.1038/nclimate1911.
19. *Lindersson S.*, *Brandimarte L.*, *Mård J.*, *Di Baldassarre G.* Global riverine flood risk — how do hydrogeomorphic floodplain maps compare to flood hazard maps? // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2021. V. 21. No. 10. P. 2921–2948. DOI: 10.5194/nhess-21-2921-2021.
20. *Martel J.-L.*, *Mailhot A.*, *Brissette F.* Global and regional projected changes in 100-yr subdaily, daily, and multiday precipitation extremes estimated from three large ensembles of climate simulations // J. Climate. 2020. V. 33. No. 3. P. 1089–1103. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0764.1.
21. *Milly P.C.D.*, *Wetherald R.T.*, *Dunne K.A.*, *Delworth T.L.* Increasing risk of great floods in a changing climate // Nature. 2002. V. 415. No. 6871. P. 514–517. DOI: 10.1038/415514a.
22. *Moghadas M.*, *Asadzadeh A.*, *Vafeidis A. et al.* A multi-criteria approach for assessing urban flood resilience in Tehran, Iran // Intern. J. Disaster Risk Reduction. 2019. V. 35. Article 101069. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2019.101069.
23. *Rachit T.V.*, *Mohanty M.P.*, *Pandey A.*, *Gupta A.K.* Rapid flood susceptibility mapping in the Indian Himalayan region using CNN-U-Net segmentation: insights from the 2025 monsoon events // Natural Hazards. 2026. V. 122. Article 424. DOI: 10.1007/s11069-026-08175-w.
24. *Risling A.*, *Lindersson S.*, *Brandimarte L.* A comparison of global flood models using Sentinel-1 and a change detection approach // Natural Hazards. 2024. V. 120. P. 11133–11152. DOI: 10.1007/s11069-024-06629-7.
25. *Rudari R.*, *Silvestro F.*, *Campo L.*, *Rebora N.*, *Boni G.* Improvement of the Global Flood Model for the GAR15, Background Paper prepared for the 2015 Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. Geneva, Switzerland: UNISDR, 2015. 69 p.
26. *Sampson C.C.*, *Smith A.M.*, *Bates P.D. et al.* A high-resolution global flood hazard model // Water Resources Research. 2015. V. 51. P. 7358–7381. DOI: 10.1002/2015WR016954.
27. *Sayers P.*, *Li Y.*, *Galloway G.*, *Penning-Rowsell E.*, *Shen F.*, *Wen K.*, *Chen Y.*, *Le Quesne T.* Flood risk management: A strategic approach. Paris: UNESCO, 2013. 202 p.

28. *Singh H.*, *Mohanty M.P.* Can atmospheric reanalysis datasets reproduce flood inundation at regional scales? A systematic analysis with ERA5 over Mahanadi River Basin, India // Environmental Monitoring and Assessment. 2023. V. 195. Article 1143. DOI: 10.1007/s10661-023-11798-2.
29. *Tehrany M.S.*, *Pradhan B.*, *Jebur M.N.* Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS // J. Hydrology. 2014. V. 512. P. 332–343. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.03.008.
30. *van der Knijff J.M.*, *Younis J.*, *de Roo A.P.J.* LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation // Intern. J. Geographical Information Science. 2010. V. 24. P. 189–212. DOI: 10.1080/13658810802549154.
31. *Vojinovic Z.*, *Tutulic D.* On the use of 1D and coupled 1D-2D modelling approaches for assessment of flood damage in urban areas // Urban Water J. 2009. V. 6. No. 3. P. 183–199. DOI: 10.1080/15730620802566877.
32. *Wilby R.L.*, *Keenan R.* Adapting to flood risk under climate change // Progress in Physical Geography: Earth and Environment. 2012. V. 36. No. 3. P. 348–378. DOI: 10.1177/0309133312438908.
33. *Winsemius H.C.*, *Aerts J.C.J.H.*, *van Beek L.P.H. et al.* Global drivers of future river flood risk // Nature Climate Change. 2016. V. 6. P. 381–385. DOI: 10.1038/nclimate2893.
34. *Yamazaki D.*, *Kanae S.*, *Kim H.*, *Oki T.* A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model // Water Resources Research. 2011. V. 47. Article W04501. DOI: 10.1029/2010WR009726.
35. *Yamazaki D.*, *Ikeshima D.*, *Sosa J. et al.* MERIT Hydro: A high-resolution global hydrography map based on latest topography dataset // Water Resources Research. 2019. V. 55. P. 5053–5073. DOI: 10.1029/2019WR024873.
36. *Yazawa T.*, *Sato J.*, *Ngoksilp G. et al.* Assessing community vulnerability and adaptive capacity for evidence based water governance in the lower Mekong basin // Discover Water. 2026. V. 6. Article 39. DOI: 10.1007/s43832-026-00364-9.

Validation of global flood hazard maps for Russian rivers using remote sensing data

E. D. Pavlyukevich [1,2], A. A. Derkacheva [1]

[1] *National Research University Higher School of Economics, Moscow 109028, Russia*
E-mail: epavlyukevich@hse.ru
[2] *Water Problems Institute RAS, Moscow 119333, Russia*

The study presents a validation of the global flood hazard maps developed by the JRC (Joint Research Centre) for Russian rivers based on comparison with historical flood extents delineated from multi-temporal Landsat and Sentinel-2 satellite imagery. The aim was to assess the accuracy and applicability of global flood hazard maps for strategic, regional-scale flood risk assessment across Russia, given that domestic flood maps currently cover only individual settlements and do not form a unified national dataset. Fourteen representative river reaches were selected across different physiographic regions of the country where major floods had occurred within the past 30 years, and 26 satellite images corresponding to 26 flood events of varying return periods were processed and compared with the modeled inundation extents. Agreement between modeled and observed flood boundaries was quantified using the Hit Rate (HR), False Alarm Ratio (FAR), and Critical Success Index (CSI). Median values of the metrics were: 0,93 for HR, 0,12 for FAR, and 0,84 for CSI, indicating overall good quality of the global dataset. The model showed a systematic tendency to overestimate flood extents (by 13 % on average). JRC flood hazard maps have limitations for local-scale engineering applications and detailed hazard zonation, but are well-suited for strategic regional planning purposes, particularly in data-sparse regions.

Keywords: validation, global flood hazard maps, remote sensing, flood zones, spatial analysis, hydrological modeling

Accepted: 26.06.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-331-345

References

1. Biryukov E.S., Terentyev N.E., Towards the assessment of economic damage from floods in Russia and the potential for adaptation, *Theory and Practice of Social Development*, 2024, No. 11, pp. 162–168 (in Russian), DOI: 10.24158/tipor.2024.11.19.
2. D'yakonova T.A., Krivko V.V., Agafonnikova E.O. et al., Determination of the boundaries of flooded zones based on hydrodynamic modeling, *Mathematical Physics and Computer Simulation*, 2020, V. 23, No. 3, pp. 12–22 (in Russian), DOI: 10.15688/mpcm.jvolsu.2020.3.2.
3. Kornilova E.D., Krylenko I.N., Golovlyov P.P. et al., Verification of the two-dimensional hydrodynamic model of the Lena River near Yakutsk by time-varying satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 5, pp. 169–178 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-169-178.
4. Krylenko I.N., Golovlev P.P., Kornilova E.D., Sazonov A.A., Fingert E.A., Assessment of flooding characteristics based on a two-dimensional hydrodynamic model, *13-ya Obshcherossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya i vystavka "Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskanii v stroitel'stve v Rossiiskoi Federatsii"* (13th All-Russian Scientific and Practical Conf. and Exhibition "Prospects for the Development of Engineering Surveys in Construction in the Russian Federation"), Moscow: OOO "Geomarketing", 2017, pp. 187–190 (in Russian).
5. Miroshnichenko S.A., Luchnikov A.I., Lepeshkin S.A., Tiunov A.A., Development of a hydrodynamic model of the Vaga River to solve the problems of protecting settlements from flooding, *Water Sector of Russia: Problems*, *Technologies*, *Management*, 2024, No. 4, pp. 73–86 (in Russian), DOI: 10.35567/19994508-2024-4-73-86.
6. *Postanovlenie Pravitel'stva RF "Ob opredelenii granits zon zatopleniya i podtopleniya* (*s "Pravilami opredeleniya granits zon zatopleniya*, *podtopleniya"*)*"* (Resolution of the Government of the Russian Federation "On determining the boundaries of flood and inundation zones (with the "Rules for determining the boundaries of flood and inundation zones")"), Apr. 18, 2014, No. 360 (in Russian).
7. Tersky P.N., Fathi M.O., Tsyplenkov A.S., Zemlyanov I.V., Gorelits O.V., Pavlovsky A.E., Flood zones delineation for Moscow City rivers, *Georisk*, 2017, No. 3, pp. 20–29 (in Russian).
8. Alfieri L., Salamon P., Bianchi A. et al., Advances in pan-European flood hazard mapping, *Hydrological Processes*, 2014, V. 28, pp. 4067–4077, DOI: 10.1002/hyp.9947.
9. Bates P.D., de Roo A.P.J., A simple raster-based model for flood inundation simulation, *J. Hydrology*, 2000, V. 236, pp. 54–77, DOI: 10.1016/S0022-1694(00)00278-X.
10. Baugh C., Colonese J., D'Angelo C. et al., *Global river flood hazard maps*, European Commission, Joint Research Centre, 2026, DOI: 10.2905/JRC.VD32YWG.
11. Bernhofen M.V., Trigg M.A., Sleigh P.A. et al., Global flood exposure from different sized rivers, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2021, V. 21, No. 9, pp. 2829–2847, DOI: 10.5194/nhess-21-2829-2021.
12. Bernhofen M.V., Cooper S., Trigg M. et al., The role of global data sets for riverine flood risk management at national scales, *Water Resources Research*, 2022, V. 58, Article e2021WR031555, DOI: 10.1029/2021WR031555.
13. Buchhorn M., Lesiv M., Tsendbazar N.-E. et al., Copernicus Global Land Cover layers — Collection 2, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, Article 1044, DOI: 10.3390/rs12061044.
14. Dottori F., Salamon P., Bianchi A. et al., Development and evaluation of a framework for global flood hazard mapping, *Advances in Water Resources*, 2016, V. 94, pp. 87–102, DOI: 10.1016/j.advwatres.2016.05.002.
15. Dottori F., Kalas M., Salamon P. et al., An operational procedure for rapid flood risk assessment in Europe, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2017, V. 17, No. 7, pp. 1111–1126, DOI: 10.5194/nhess-17-1111-2017.
16. Dottori F., Alfieri L., Bianchi A. et al., A new dataset of river flood hazard maps for Europe and the Mediterranean Basin, *Earth System Science Data*, 2022, V. 14, No. 4, pp. 1549–1569, DOI: 10.5194/essd-14-1549-2022.
17. Gassert F., Reig P., Shiao T., Luck M., *Aqueduct global maps 2.1: Constructing decision-relevant global water risk indicators*, World Resources Institute, 2015, 31 p.
18. Hirabayashi Y., Mahendran R., Koirala S. et al., Global flood risk under climate change, *Nature Climate Change*, 2013, V. 3, No. 9, pp. 816–821, DOI: 10.1038/nclimate1911.
19. Lindersson S., Brandimarte L., Mård J., Di Baldassarre G., Global riverine flood risk — how do hydrogeomorphic floodplain maps compare to flood hazard maps?, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2021, V. 21, No. 10, pp. 2921–2948, DOI: 10.5194/nhess-21-2921-2021.
20. Martel J.-L., Mailhot A., Brissette F., Global and regional projected changes in 100-yr subdaily, daily, and multiday precipitation extremes estimated from three large ensembles of climate simulations, *J. Climate*, 2020, V. 33, No. 3, pp. 1089–1103, DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0764.1.

21. Milly P. C. D., Wetherald R. T., Dunne K. A., Delworth T. L., Increasing risk of great floods in a changing climate, *Nature*, 2002, V. 415, No. 6871, pp. 514–517, DOI: 10.1038/415514a.
22. Moghadas M., Asadzadeh A., Vafeidis A. et al., A multi-criteria approach for assessing urban flood resilience in Tehran, Iran, *Intern. J. Disaster Risk Reduction*, 2019, V. 35, Article 101069, DOI: 10.1016/j.ijdrr.2019.101069.
23. Rachit T. V., Mohanty M. P., Pandey A., Gupta A. K., Rapid flood susceptibility mapping in the Indian Himalayan region using CNN-U-Net segmentation: insights from the 2025 monsoon events, *Natural Hazards*, 2026, V. 122, Article 424, DOI: 10.1007/s11069-026-08175-w.
24. Risling A., Lindersson S., Brandimarte L., A comparison of global flood models using Sentinel-1 and a change detection approach, *Natural Hazards*, 2024, V. 120, pp. 11133–11152, DOI: 10.1007/s11069-024-06629-7.
25. Rudari R., Silvestro F., Campo L., Rebora N., Boni G., *Improvement of the Global Flood Model for the GAR15*, Background Paper prepared for the 2015 Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction, Geneva, Switzerland: UNISDR, 2015, 69 p.
26. Sampson C. C., Smith A. M., Bates P. D. et al., A high-resolution global flood hazard model, *Water Resources Research*, 2015, V. 51, pp. 7358–7381, DOI: 10.1002/2015WR016954.
27. Sayers P., Li Y., Galloway G., Penning-Rowsell E., Shen F., Wen K., Chen Y., Le Quesne T., *Flood risk management: A strategic approach*, Paris, UNESCO, 2013, 202 p.
28. Singh H., Mohanty M. P., Can atmospheric reanalysis datasets reproduce flood inundation at regional scales? A systematic analysis with ERA5 over Mahanadi River Basin, India, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, V. 195, Article 1143, DOI: 10.1007/s10661-023-11798-2.
29. Tehrany M. S., Pradhan B., Jebur M. N., Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS, *J. Hydrology*, 2014, V. 512, pp. 332–343, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.03.008.
30. van der Knijff J. M., Younis J., de Roo A. P. J., LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation, *Intern. J. Geographical Information Science*, 2010, V. 24, pp. 189–212, DOI: 10.1080/13658810802549154.
31. Vojinovic Z., Tutulic D., On the use of 1D and coupled 1D-2D modelling approaches for assessment of flood damage in urban areas, *Urban Water J.*, 2009, V. 6, No. 3, pp. 183–199, DOI: 10.1080/15730620802566877.
32. Wilby R. L., Keenan R., Adapting to flood risk under climate change, *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2012, V. 36, No. 3, pp. 348–378, DOI: 10.1177/0309133312438908.
33. Winsemius H. C., Aerts J. C. J. H., van Beek L. P. H. et al., Global drivers of future river flood risk, *Nature Climate Change*, 2016, V. 6, pp. 381–385, DOI:10.1038/nclimate2893.
34. Yamazaki D., Kanae S., Kim H., Oki T., A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model, *Water Resources Research*, 2011, V. 47, Article W04501, DOI: 10.1029/2010WR009726.
35. Yamazaki D., Ikeshima D., Sosa J. et al., MERIT Hydro: A high-resolution global hydrography map based on latest topography dataset, *Water Resources Research*, 2019, V. 55, pp. 5053–5073, DOI: 10.1029/2019WR024873.
36. Yazawa T., Sato J., Ngoksilp G. et al., Assessing community vulnerability and adaptive capacity for evidence based water governance in the lower Mekong basin, *Discover Water*, 2026, V. 6, Article 39, DOI: 10.1007/s43832-026-00364-9.