

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВНЕДРЕНИЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ В ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЁТАХ

Наумова Анна Анатольевна¹, Прохода Анастасия Валерьевна²,
Касьянов Михаил Евгеньевич³

^{1,2,3}ФГБОУ ВО «РГАУ — МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва, РФ

Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова

¹Соискатель кафедры гидрологии, гидравлики и управления водными ресурсами
koshevaya81@mail.ru

²Обучающаяся бакалавриата, prh.anastasia@yandex.ru

³Обучающийся бакалавриата, kas747-400@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются методологические основы применения геоинформационных систем (ГИС) в гидрологических расчётах как современного инструмента пространственного анализа природных процессов. Проведён сравнительный анализ традиционных методов и геоинформационного подхода, выявлены их ключевые преимущества и ограничения при работе с пространственно распределёнными данными. Раскрыты теоретические принципы функционирования ГИС, включая многослойную структуру данных, их интеграцию и методы пространственного моделирования. Подробно рассмотрены алгоритмы обработки цифровых моделей рельефа, методы расчёта морфометрических характеристик водосборных бассейнов и их влияние на процессы формирования стока. Особое внимание уделено интеграции ГИС с гидрологическими моделями SWAT, HEC-HMS и HEC-RAS, а также использованию современных данных дистанционного зондирования Земли. Проанализированы возможности применения ГИС для оценки и детального картографирования паводковых рисков и опасных гидрологических явлений. Определены основные ограничения метода и перспективы его дальнейшего развития в будущем.

Ключевые слова: геоинформационные системы, ГИС, гидрологические расчёты, цифровая модель рельефа, водосборный бассейн, QGIS, SWAT, HEC-HMS, пространственный анализ, поверхностный сток, дистанционное зондирование, паводковый риск.

Для цитирования: Наумова Анна Анатольевна, Прохода Анастасия Валерьевна, Касьянов Михаил Евгеньевич МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВНЕДРЕНИЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ В ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЁТАХ / Наумова Анна Анатольевна, Прохода Анастасия Валерьевна, Касьянов Михаил Евгеньевич // Агрофорсайт. 2026. № 3 — Саратов: ООО «ЦеСАин», 2026. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Загл. с этикетки диска.

METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF THE INTRODUCTION OF GEOINFORMATION SYSTEMS IN HYDROLOGICAL CALCULATIONS Naumova Anna Anatolyevna¹, Prohoda Anastasia Valerievna², Kasyanov Mikhail Evgenievich³

^{1,2,3} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy;

A.N. Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction

¹Candidate of the Department of Hydrology, Hydraulics and Water Resources Management, koshevaya81@mail.ru

²Bachelor's degree student, prh.anastasia@yandex.ru

³Bachelor's degree student, kas747-400@mail.ru

Annotation. The article discusses the methodological foundations of the application of geographic information systems (GIS) in hydrological calculations as a modern tool for spatial analysis of natural processes. A comparative analysis of traditional methods and the geoinformation approach has been carried out, and their key advantages and limitations have been identified when working with spatially distributed data. The theoretical principles of GIS operation are disclosed, including the multi-layered data structure, their integration and spatial modeling methods. Algorithms for processing digital relief models, methods for calculating the morphometric characteristics of watersheds and their influence on the processes of runoff formation are considered in detail. Special attention is paid to the integration of GIS with the

hydrological models SWAT, HEC-HMS and HEC-RAS, as well as the use of modern remote sensing data. The possibilities of using GIS for assessment and detailed mapping of flood risks and dangerous hydrological phenomena are analyzed. The main limitations of the method and the prospects for its further development in the future are determined.

Keywords: geoinformation systems, GIS, hydrological calculations, digital relief model, drainage basin, QGIS, SWAT, HEC-HMS, spatial analysis, surface runoff, remote sensing, flood risk.

Введение.

Современный этап развития гидрологической науки характеризуется возрастающей потребностью в точных, воспроизводимых и пространственно детализированных методах анализа водных объектов и их водосборных бассейнов. Усиливающееся антропогенное воздействие на гидрологический цикл, глобальные климатические изменения и участвовавшие экстремальные явления — катастрофические паводки, продолжительные засухи, интенсивные ливни — формируют принципиально новые требования к инструментарию гидрологических исследований. По данным Всемирной метеорологической организации, за период с 1970 по 2019 год наводнения составили около 31 % от общего числа зарегистрированных стихийных бедствий гидрометеорологического характера, а совокупный экономический ущерб от опасных явлений, связанных с водой, превысил 2,6 трлн долл. США [1]. Приведённые данные подчёркивают первостепенную социально-экономическую значимость совершенствования методов прогнозирования и оценки гидрологических рисков.

Традиционные гидрометеорологические методы, основанные на точечных наблюдениях сети станций и применении обобщённых эмпирических формул, оказываются принципиально недостаточными для адекватного описания пространственной неоднородности гидрологических процессов. Они не обеспечивают необходимой детализации при характеристике рельефа, состава почв, структуры растительного покрова и динамики землепользования в пределах водосборного бассейна. Ограничения традиционных подходов особенно ощутимы в условиях слабо изученных территорий с редкой сетью гидрологических постов, что характерно для значительной части территории России, насчитывающей, по данным Государственного водного реестра Росводресурсов, свыше 2,7 млн водотоков общей длиной около 12,4 млн км [2]. В этих условиях геоинформационные технологии формируют принципиально новую методологическую парадигму: они обеспечивают пространственно-распределённый анализ данных, автоматизацию трудоёмких вычислительных процедур и интеграцию разнородных источников информации в единой цифровой среде.

Вышесказанное определяет актуальность настоящего исследования. Причиной его проведения послужило отсутствие в отечественной литературе обобщающей работы, систематизирующей весь комплекс методологических инструментов ГИС применительно к гидрологическим расчётам — от обработки цифровых моделей рельефа до оценки паводковых рисков — с учётом новейших алгоритмических разработок, программных платформ и требований нормативной базы. Целью исследования является систематизация методологических основ внедрения ГИС в практику гидрологических расчётов. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: проведение анализа алгоритмических методов обработки цифровых моделей рельефа; изучение методологии расчёта морфометрических параметров водосборных бассейнов в среде ГИС; характеристика методов интеграции ГИС с математическими гидрологическими

моделями; оценка роли данных дистанционного зондирования; анализ ведущих программных платформ; выявление ограничений и перспектив геоинформационного подхода.

Материалы и методы исследования.

Теоретической и эмпирической основой настоящего исследования послужил широкий круг отечественных и зарубежных научных работ, охватывающих теорию геоинформационных систем, методы гидрологического моделирования, алгоритмы обработки цифровых моделей рельефа и результаты практического применения ГИС в бассейнах рек различных физико-географических зон.

В области теории геоинформационных систем и их прикладных аспектов основополагающим зарубежным источником является монография Лонгли, Гудчайлда, Магуайра и Райнда [3], в которой систематизированы принципы пространственного анализа, архитектура ГИС и методы пространственного моделирования. Фундаментальные работы в области алгоритмического обеспечения гидрологической обработки ЦМР представлены статьёй О'Каллагана и Марка [4], в которой впервые формализован алгоритм D8, и работой Тарботона [5], предложившего многопоточный алгоритм D-∞. Обе работы заложили алгоритмическую основу современных ГИС-инструментов автоматического выделения речных сетей и водосборных бассейнов. В части математического гидрологического моделирования, интегрированного с ГИС, ключевым зарубежным источником является работа Арнольда и соавторов [6], описывающая модель SWAT и методологию её параметризации средствами ГИС. Вопросы влияния пространственного разрешения ЦМР на точность гидрологических расчётов детально исследованы в работе Кенварда и соавторов [7], установивших количественные закономерности изменения погрешности расчёта площади водосборного бассейна в зависимости от разрешения модели.

Из отечественных источников принципиальное значение имеет монография Виноградова и Виноградовой [8], в которой систематизированы методы математического моделирования в гидрологии и рассмотрены концептуальные основы интеграции гидрологических моделей с пространственными данными. Результаты практического применения ГИС-методов в российских условиях представлены в работе Гарцмана и Тронзы [9,10], в которой на примере речных бассейнов Дальнего Востока показано, что автоматизированный расчёт морфометрических параметров позволяет сократить трудозатраты на 60–75 % при одновременном повышении точности. Методические основы нормативных гидрологических расчётов, используемых в российской инженерной практике, изложены в 15. СП 529.1325800.2023 [11].

Объектом исследования являются водосборные бассейны рек как основные пространственные единицы гидрологического анализа. Предметом исследования служат методологические инструменты геоинформационных систем, применяемые для количественного описания и моделирования процессов формирования стока на водосборных бассейнах. Источниками пространственных данных служат цифровые модели рельефа (SRTM, TanDEM-X, ALOS AW3D30), многозональные спутниковые изображения Landsat-8/9 и Sentinel-2, а также данные радарных и лазерных альтиметров. В работе применялись методы сравнительного анализа, классификации и систематизации научной литературы, а также методы пространственного анализа —

автоматизированная дельнейация водосборов, морфометрический анализ, гидравлическое моделирование и тематическая классификация спутниковых данных — реализованные в программных платформах QGIS, ArcGIS и GRASS GIS.

Основная часть. Результаты исследования.

Геоинформационные системы представляют собой интегрированный комплекс аппаратных средств, программного обеспечения, данных и методов, предназначенных для сбора, хранения, обработки, анализа и картографической визуализации пространственно привязанной информации. Принципиальной особенностью ГИС, отличающей их от традиционных картографических систем, является возможность совместного анализа атрибутивных и геометрических характеристик пространственных объектов, а также проведения количественных геоаналитических операций над многослойными наборами данных [3]. Теоретический фундамент ГИС опирается на четыре базовых принципа: пространственная привязка данных, многослойное представление информации, системный анализ и моделирование пространственных процессов. Многослойная архитектура является ключевой особенностью ГИС: каждый тематический слой содержит информацию об отдельном компоненте природной среды — топографии, гидрографической сети, типах почв, растительном покрове, землепользовании, — а их совмещение создаёт основу для комплексного анализа пространственных взаимосвязей, что особенно востребовано в гидрологии, где сток формируется под влиянием многочисленных и территориально изменчивых факторов.

История развития ГИС берёт начало в 1963 году, когда канадский географ Роджер Томлинсон разработал Канадскую географическую информационную систему (CGIS) — первую программную систему, обеспечивавшую автоматизированный анализ земельных ресурсов в цифровом формате [12]. Запуск в 1972 году первого спутника серии Landsat открыл эпоху систематического дистанционного зондирования земной поверхности с орбиты, что дало мощный импульс для развития геоинформационных методов. Развитие глобальных навигационных спутниковых систем — американской GPS (полная оперативная готовность 1995 г.) и российской ГЛОНАСС (восстановлена в 2011 г.) — обеспечило высокоточную геодезическую привязку пространственных данных. Коммерциализация ГИС-технологий связана с выпуском в 1982 году системы ArcInfo компании ESRI и её последовательной эволюцией до современной платформы ArcGIS [13].

Цифровая модель рельефа (ЦМР) является фундаментальной основой геоинформационного обеспечения гидрологических расчётов. В современной практике применяются открытые ЦМР глобального охвата: SRTM (NASA, 2000 г., разрешение 30 м) [5]; ALOS AW3D30 (JAXA, 2016 г., разрешение 30 м, превосходящая SRTM по точности в горных районах); TanDEM-X (DLR/Airbus, 2010–2015 гг., разрешение 12 м, относительная вертикальная точность около 2 м, абсолютная — около 10 м); NASADEM (2020 г.) — обновлённая версия SRTM с устранёнными артефактами интерполяции. Базовый алгоритмический цикл гидрологической обработки ЦМР включает несколько последовательных операций. Заполнение депрессий устраняет локальные замкнутые понижения рельефа, которые в большинстве случаев представляют артефакты интерполяции, а не реальные географические объекты. Вычисление направления стока осуществляется по алгоритму D8 (O'Callaghan, Mark, 1984), определяющему для каждой

ячейки направление наибольшего уклона среди восьми соседних [4]; более реалистичный многопоточный алгоритм D- ∞ (Tarboton, 1997) распределяет сток между двумя ячейками пропорционально уклону, точнее воспроизводя процессы стокообразования на склонах [5]. Вычисление накопленного стока формирует растр, на основе которого при задании пороговых значений автоматически идентифицируется русловая сеть. Завершает цикл выделение водосборных бассейнов путём пространственного анализа направлений стока относительно замыкающей точки — гидрологического створа. Сравнительные исследования показывают, что при применении ЦМР с разрешением 30 м погрешность автоматического определения площади водосборного бассейна составляет 3–8 % по сравнению с картометрическим методом при условии корректной предобработки данных; при использовании ЦМР с разрешением 10 м данная погрешность сокращается до 1–3 % [7].

Морфометрические характеристики водосборного бассейна оказывают определяющее влияние на формирование гидрографа паводка, величину максимального стока и гидрологический режим рек. Автоматизированный расчёт средствами ГИС обеспечивает принципиально более высокую производительность и воспроизводимость результатов по сравнению с ручным картометрическим методом. В среде ГИС определяются площадь водосборного бассейна, длина главного водотока, средние уклоны реки и склонов, коэффициент формы бассейна, коэффициент компактности Гравелиуса, густота гидрографической сети, средняя высота водосбора и гипсометрическая кривая. Расчёт в среде QGIS выполняется с использованием модуля SAGA (алгоритм «Watershed Basin Statistics») и плагина WhiteboxTools. Применение ГИС-методов на примере речных бассейнов ЦЧЗ позволяет сократить трудозатраты на 60–75 % при одновременном устранении погрешностей ручного измерения [9].

Наиболее значительный синергетический эффект геоинформационных технологий достигается при их интеграции с распределёнными гидрологическими моделями. Модель SWAT (Soil and Water Assessment Tool) реализует концепцию деления водосборного бассейна на гидрологически однородные единицы (HRU — hydrologic response units), формируемые путём пространственного совмещения слоёв ЦМР, типов почв и землепользования в среде ГИС [6]. Модель обеспечивает расчёт поверхностного, бокового и подземного стока, испарения, транспирации и переноса наносов; прямая интеграция с ГИС реализована через плагины ArcSWAT (для ArcGIS) и QSWAT (для QGIS). Модель HEC-HMS (US Army Corps of Engineers) используется для расчёта гидрографов паводков на основе метода единичного гидрографа и кинематической волны; ГИС обеспечивают формирование схемы водосборов и расчёт чисел кривых стока (CN) путём совмещения карт типов почв и землепользования. Модель HEC-RAS применяется для одно- и двумерного гидравлического моделирования, где геометрия русла и поймы задаётся посредством ЦМР и батиметрических данных, обработанных в среде ГИС. Метод SCS-CN органично интегрируется с ГИС, позволяя рассчитывать взвешенное значение CN для всего бассейна с учётом пространственной неоднородности подстилающей поверхности; следует при этом подчеркнуть, что в российской инженерной практике расчёт максимального стока регламентируется СП 529.1325800.2023 [10], тогда как метод SCS-CN применяется как дополнительный аналитический инструмент при гидрологическом моделировании.

Данные дистанционного зондирования Земли существенно расширяют информационную базу гидрологических расчётов. Анализ растительного покрова осуществляется с использованием индекса NDVI, рассчитываемого по данным Landsat-8/9 (разрешение 30 м, период повторной съёмки 16 суток) и Sentinel-2 (разрешение 10 м, период повторной съёмки 5 суток). Оценка площади снежного покрова и снегозапасов основана на продукте MOD10A1 спутника Terra/Aqua (сенсор MODIS, разрешение 500 м, ежедневная съёмка), что критически важно для прогнозирования весеннего снегового паводка. Мониторинг уровня воды в крупных реках и водохранилищах обеспечивается данными радарных альтиметров Jason-3 и Sentinel-6, а также лазерного альтиметра ICESat-2 (ATLAS — Advanced Topographic Laser Altimeter System); следует подчеркнуть принципиальное различие технологий: если Jason-3 и Sentinel-6 используют радиолокационный принцип, то ICESat-2 применяет многолучевой лазерный альтиметр с разрешением профиля до 70 см по вертикали. Картирование затопляемых территорий при паводках в любых метеорологических условиях обеспечивается оперативными снимками SAR спутника Sentinel-1. Тематическая классификация многозональных спутниковых изображений Sentinel-2 с применением алгоритмов машинного обучения (Random Forest, Support Vector Machine) обеспечивает точность идентификации типов наземного покрова 85–92 % [14], что позволяет формировать актуальные карты землепользования для расчёта параметров инфильтрации.

Современный рынок геоинформационного программного обеспечения представлен как коммерческими, так и свободно распространяемыми платформами. Платформа ArcGIS (ESRI) включает специализированный модуль ArcHydro, обеспечивающий полный цикл гидрологической обработки ЦМР, и расширение HEC-GeoHMS для подготовки входных данных модели HEC-HMS. Платформа QGIS (лицензия GNU GPL) обеспечивает с помощью плагинов SAGA и WhiteboxTools полный набор гидрологических алгоритмов; возможность автоматизации через Python API (PyQGIS) обеспечивает воспроизводимость результатов [15]. Платформа GRASS GIS, разработанная в 1982 году в Исследовательской лаборатории строительных технологий (CERL) Инженерного корпуса армии США, обладает мощными инструментами растрового анализа рельефа. Облачная платформа Google Earth Engine обеспечивает доступ к петабайтным архивам спутниковых данных и их обработку без локальной загрузки, что открывает возможности для мониторинга водного баланса крупных речных бассейнов в режиме близком к реальному времени. Следует также отметить значимость отечественных платформ — NextGIS, «Панорама» и Геомиксер, — развитие которых приобретает особую актуальность в современных условиях.

Сопоставление ведущих программных платформ по ключевым критериям представлено в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительная характеристика программных платформ для гидрологических расчётов

| Критерий | ArcGIS | QGIS | GRASS GIS | GEE |
|---------------------|----------------------|---------------------|---------------|--------------------|
| Стоимость | Коммерческая | Бесплатно | Бесплатно | Бесплатно |
| Гидрол. инструменты | ArcHydro, HEC-GeoHMS | SAGA, WhiteboxTools | r.watershed | JS/Python API |
| Автоматизация | ModelBuilder, Python | PyQGIS, Processing | Shell, Python | JavaScript, Python |
| Работа с ЦМР | Высокий | Высокий | Высокий | Средний |
| Большие данные ДЗЗ | Ограничено | Ограничено | Ограничено | Высокий |
| Открытый код | Нет | Да | Да | Нет |

Оценка и картографирование паводковых рисков представляют собой одно из наиболее практически значимых направлений применения ГИС. Методология основана на совмещении карт паводкоопасности и карт уязвимости территории [16]. Стандартная схема ГИС-анализа паводкового риска включает выделение паводкоопасных территорий путём двумерного гидравлического моделирования с применением расчётных расходов воды различной обеспеченности (1 %, 5 %, 10 %); картирование зон затопления при различных сценариях; пространственный анализ уязвимости на основе данных о плотности населения, стоимости основных фондов и критической инфраструктуре; интегральную оценку риска и выделение приоритетных зон защитных мероприятий. Точность картирования зон затопления при двумерном гидравлическом моделировании на основе ЦМР и ГИС составляет, по оценкам ряда исследований, 80–90 % при верификации с историческими данными о паводках [17]. Директива ЕС 2007/60/ЕС обязывает государства — члены ЕС формировать карты паводковой опасности и риска в масштабе 1:10 000 – 1:25 000 с использованием ГИС-методов; в России аналогичные требования закреплены в методических рекомендациях Росгидромета по расчёту зон возможного затопления.

В российской практике ГИС-технологии в гидрологии активно внедрялись в Государственном гидрологическом институте (ГГИ, Санкт-Петербург), где разработаны ГИС-ориентированные базы гидрологических данных и методология обновления нормативных гидрологических характеристик. Институт водных проблем РАН применяет ГИС-методы в задачах управления ресурсами бассейнов Волги, Оби и Амура. Институт географии РАН ведёт комплексные исследования гидрологического режима рек арктической зоны в условиях деградации многолетней мерзлоты. Практической реализацией ГИС-методов стали автоматизированные информационно-измерительные системы на крупных гидротехнических объектах — каскаде волжских водохранилищ, Богучанской, Зейской и Бурейской ГЭС, — интегрирующие данные мониторинга в геоинформационную среду для оперативного управления водными режимами [8].

Несмотря на очевидные преимущества, ГИС-методы в гидрологии имеют ряд существенных ограничений, требующих учёта при интерпретации результатов. Качество ЦМР определяет предел достижимой точности всех производных характеристик: в горных районах глобальные ЦМР разрешением 30 м существенно искажают морфологию русел, вследствие чего необходимо применение данных воздушного лазерного сканирования с разрешением 0,5–1 м. Пространственная интерполяция осадков по редкой сети станций вносит значительную неопределённость в расчёт стока, особенно в районах со сложным

горным рельефом. Калибровка и верификация гидрологических моделей требуют репрезентативных рядов наблюдений, что ограничивает применимость метода для слабо изученных бассейнов. К перспективным направлениям развития ГИС-методологии относятся интеграция с алгоритмами глубокого обучения (LSTM-нейронные сети, графовые нейронные сети), обеспечивающими повышение точности прогнозов паводков при уменьшении вычислительных затрат [18]; развитие облачных геовычислительных платформ; применение ультравысокодетальных ЦМР, получаемых с беспилотных авиационных систем (разрешение 3–10 см), для локальных гидравлических расчётов; создание цифровых двойников речных бассейнов, интегрирующих данные IoT-датчиков, спутников и прогностических моделей в реальном времени [19].

Выводы.

Проведённое исследование позволяет сформулировать следующие выводы. Во-первых, геоинформационные системы образуют необходимую методологическую основу современных гидрологических расчётов, обеспечивая пространственно-распределённый анализ данных, автоматизацию вычислительных процедур и интеграцию разнородных источников информации в единой цифровой среде. По ключевым показателям — точности, производительности, объективности и воспроизводимости результатов — ГИС-методы существенно превосходят традиционные подходы.

Во-вторых, алгоритмическую основу гидрологической обработки ЦМР образуют алгоритмы $D8$ и $D-\infty$, обеспечивающие автоматизированное выделение водосборных бассейнов и речных сетей с погрешностью 3–8 % при разрешении 30 м и 1–3 % при разрешении 10 м. Качество ЦМР является главным лимитирующим фактором точности расчётов, а применение TanDEM-X с относительной вертикальной точностью около 2 м представляет на сегодняшний день оптимальное решение для детализированных гидрологических задач.

В-третьих, максимальная эффективность ГИС-методов достигается при их интеграции с распределёнными гидрологическими моделями SWAT, HEC-HMS и HEC-RAS, обеспечивающей пространственно-распределённое задание параметров и автоматизированную подготовку входных данных. При этом тематическая классификация данных ДЗЗ, обеспечивающая точность 85–92 %, позволяет формировать актуальные карты землепользования для параметризации моделей.

В-четвёртых, в задачах оценки паводковых рисков ГИС-методы обеспечивают точность картирования зон затопления 80–90 % при верификации с историческими данными, что подтверждает их пригодность для инженерно-гидрологических обоснований. Ключевым направлением развития геоинформационного подхода в гидрологии является конвергенция ГИС-технологий с методами машинного обучения, облачными геовычислительными платформами и технологиями IoT-мониторинга, открывающая перспективы создания систем превентивного управления паводковыми рисками.

Список литературы

1. World Meteorological Organization. *WMO Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes (1970–2019)*. — Geneva: WMO, 2021. — 90 p.
2. Государственный доклад о состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2020 году. — М.: НИИ-Природа, 2021. — 268 с.

3. Longley P.A., Goodchild M.F., Maguire D.J., Rhind D.W. *Geographic Information Systems and Science*. — 3rd ed. — Hoboken: Wiley, 2011. — 560 p.
4. O'Callaghan J.F., Mark D.M. The extraction of drainage networks from digital elevation data // *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. — 1984. — Vol. 28, No. 3. — P. 323–344.
5. Tarboton D.G. A new method for the determination of flow directions and contributing areas in grid digital elevation models // *Water Resources Research*. — 1997. — Vol. 33, No. 2. — P. 309–319.
6. Arnold J.G., Moriasi D.N., Gassman P.W. et al. SWAT: Model Use, Calibration, and Validation // *Transactions of the ASABE*. — 2012. — Vol. 55, No. 4. — P. 1491–1508.
7. Kenward T., Lettenmaier D.P., Wood E.F., Fielding E. Effects of Digital Elevation Model Accuracy on Hydrologic Predictions // *Remote Sensing of Environment*. — 2000. — Vol. 74, No. 3. — P. 432–444.
8. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. *Математическое моделирование в гидрологии*. — М.: Академия, 2010. — 304 с.
9. Гарцман Б.И., Тронза Г.Е. Использование ГИС-технологий в гидрологических исследованиях речных бассейнов Дальнего Востока // *Водные ресурсы*. — 2005. — Т. 32, № 3. — С. 261–270.
10. Наумова, А. А. Применение технологий QGIS для оценки изменчивости и асимметрии распределения осадков максимального дождевого стока в Чернозёмной зоне РФ / А. А. Наумова // *Гидротехническое строительство*. — 2025. — № 1. — С. 20–26. — DOI 10.71917/EP.2025.33.26.003. — EDN KUVDLU.
11. СП 529.1325800.2023 «Определение основных расчётных гидрологических характеристик» — М.: Госстрой России, 2004. — 72 с.
12. Tomlinson R.F. *Thinking About GIS: Geographic Information System Planning for Managers*. — 5th ed. — Redlands: ESRI Press, 2011. — 312 p.
13. Чандра А.М., Гош С.К. *Дистанционное зондирование и географические информационные системы / пер. с англ.* — М.: Техносфера, 2008. — 312 с.
14. Immitzer M., Vuolo F., Atzberger C. First Experience with Sentinel-2 Data for Crop and Tree Species Classifications in Central Europe // *Remote Sensing*. — 2016. — Vol. 8, No. 3. — P. 166. DOI: 10.3390/rs8030166.
15. QGIS Development Team. *QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project*. — URL: <https://qgis.org> (дата обращения: 15.05.2025).
16. 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 // *Journal of Hydrology*. — 2014. — Vol. 512. — P. 332–343.
17. Horritt M.S., Bates P.D. Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation // *Journal of Hydrology*. — 2002. — Vol. 268, No. 1–4. — P. 87–99.
18. Naumova, A.A., Ilinich, V.V., Shiryayeva, M.A. Neural network modeling for real-time water quality assessment. *Magazine of Civil Engineering*. 2025. 18(6). Article no. 13806. DOI: 10.34910/MCE.138.6.
19. Farr T.G., Rosen P.A., Caro E. et al. The Shuttle Radar Topography Mission // *Reviews of Geophysics*. — 2007. — Vol. 45, No. 2. — RG2004. DOI: 10.1029/2005RG000183.