



Научная статья

УДК 332.2:551.59:502/504:364.6

doi: 10.55186/25876740_2026_69_4_456

КАРТИРОВАНИЕ РИСКА ЗАТОПЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО И МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО МЕТОДОВ: ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ПРИБРЕЖНЫХ УРБАНИЗИРОВАННЫХ АГЛОМЕРАЦИИ КОТОНУ (РЕСПУБЛИКА БЕНИН)

В.В. Вершинин, С.Р. Муссе

Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия

Аннотация. В настоящей публикации представлены полученные авторами результаты оценки риска затопления урбанизированной агломерации Гранд-Нокуюэ (Котону, Абомей-Калави, Семе-Кподжи). Авторы отмечают, что в контексте глобального потепления и сопутствующего ему повышения уровня Мирового океана актуальность оценки рисков затопления прибрежных территорий существенно возрастает. На территории Республики Бенин данная проблема усугубляется особенностями гидрологического режима, характеризующегося экзогенным стоком атмосферных осадков в направлении с севера на юг. Наиболее уязвимой является агломерация Гранд-Нокуюэ, расположенная в межэкваториальной зоне между озером Нокуюэ и акваторией Атлантического океана. Методологическая основа исследования включает геоинформационный подход, интегрирующий анализ документальных источников, обработку дистанционных данных, пространственное моделирование риска затопления и многокритериальный анализ в ГИС-среде. Пространственная идентификация и классификация уровней риска осуществлены посредством интегрального анализа картографических слоев, характеризующих факторы опасности и уязвимости территории. Результаты количественной оценки демонстрируют следующее распределение категорий риска затопления в пределах агломерации Гранд-Нокуюэ: высокий риск — 19,97% территории, умеренный — 50,25%, низкий — 29,77%. Установлено, что территория города Котону характеризуется преобладанием зон высокого риска (65% площади), в то время как для плато Абомей-Калави данный показатель составляет 16%, а для Семе-Кподжи — 3%. Особо выделены урбанизированные периферийные районы Котону (Годомей, Калави, Акассато, Агблангандан, Екпе), также подверженные высокому риску затопления. В заключении авторы указывают, что полученные результаты изложенного исследования могут служить основой для разработки стратегии перспективного и скоординированного территориального планирования агломерации Гранд-Нокуюэ в целях устойчивого управления рисками возможного затопления.

Ключевые слова: урбанизированные территории, агломерации, моделирование риска затопления, картографирование

Original article

FLOOD RISK MAPPING BASED ON THE USE OF GEOSPATIAL AND MULTICRITERIA METHODS: ECOLOGICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF COTONOU COASTAL URBANIZED AGGLOMERATION (REPUBLIC OF BENIN)

V.V. Vershinin, S.R. Musse

State University of Land Use Planning, Moscow, Russia

Abstract. This publication presents the results of the authors' assessment of the risk of flooding in the urban agglomeration of Grand-Nokoué (Cotonou, Abomey-Calavi, Sèmè-Kpodji). The authors note that in the context of global warming and the associated increase in sea levels, the relevance of assessing the risks of coastal flooding has significantly increased. In the Republic of Benin, this problem is exacerbated by the specific features of the hydrological regime, which is characterized by the exogenous flow of precipitation from north to south. The most vulnerable area is the Grand-Nokoué agglomeration, located in the inter-equatorial zone between Lake Nokoué and the Atlantic Ocean. The methodological basis of the study includes a geoinformation approach that integrates the analysis of documentary sources, the processing of remote data, spatial modeling of flood risk, and multi-criteria analysis in a GIS environment. The spatial identification and classification of risk levels are carried out through the integral analysis of cartographic layers that characterize the factors of danger and vulnerability of the territory. The results of the quantitative assessment demonstrate the following distribution of flood risk categories within the Grand-Nokoué agglomeration: high risk — 19.97% of the territory, moderate — 50.25%, low — 29.77%. It has been established that the territory of the city of Cotonou is characterized by a predominance of high-risk areas (65% of the area), while this figure is 16% for the Abomey-Calavi plateau and 3% for Sèmè-Kpodji. The urbanized peripheral areas of Cotonou (Godomey, Kalavi, Akassato, Agblangandan, and Ekpe) are also at high risk of flooding. In conclusion, the authors point out that the results of this study can serve as a basis for developing a long-term and coordinated territorial planning strategy for the Grand-Nokoué agglomeration in order to sustainably manage the risks of potential flooding.

Keywords: urbanized areas, agglomerations, flood risk modeling and mapping

Введение. По мнению современных ученых, занимающихся проблемами окружающей среды, климатические изменения представляют собой одну из наиболее значимых глобальных проблем современности. Среди спектра природных опасностей (штормовые явления, сейсмическая активность, лесные пожары, засухи, вулканизм) наводнениям принадлежит доминирующая роль, составляя только за период 1994-2013 гг. 43% от общего количества

зарегистрированных природных катастроф [1]. На территории Бенина наводнения являются ключевым природным риском, приводящим к значительным социально-экономическим последствиям, включая человеческие жертвы (побережье озера Нокуюэ, 2009, 2010, 2019 гг.). Ряд исследований подтверждает цикличность и высокую повторяемость событий затопления в урбанизированных центрах Бенина, включая Котону [2, 3].

Целью настоящей публикации является предоставление читателям полученных авторами результатов оценки риска затопления, урбанизированных агломерации Гранд-Нокуюэ, включающей города Котону, Абомей-Калави и Семе-Кподжи на основе использования проведенного ими комплексного картографирования этих территорий. Разработанная комплексная карта рисков затопления обеспечит возможность принятия необходимых управленческих мер по



предотвращению этих негативных последствий, а использование методики её разработки — создание аналогичной картографической основы для аналогичных урбанизированных территорий африканского континента.

Район исследования. Исследуемая территория расположена в южной части Бенина в пределах географических координат: $6^{\circ}20'30''$ — $6^{\circ}42'00''$ северной широты и $2^{\circ}13'20''$ — $2^{\circ}42'40''$ восточной долготы (рис. 1).

На представленной схеме (рис. 1) иллюстрируется географическая локализация городской агломерации Гранд-Нокуэ, характеризующаяся развитой гидрографической сетью. Указанная сеть, включающая озеро Нокуэ, лагуны Джону и Порто-Ново, канал Котону, а также многочисленные водотоки меньшего порядка, занимает совокупную площадь, эквивалентную приблизительно 9,41% от общей площади исследуемого региона. Дополнительно, заболоченные территории составляют 19% территории исследования.

Настоящее исследование базируется на комплексном сборе, последующем анализе и обработке гетерогенных данных.

Использованные данные. Для реализации поставленных исследовательских задач были привлечены следующие категории данных:

а. Гидрологическая статистика.

Данные о максимальных суточных осадках и показателях стока реки Уэме в створе выхода Бону. Источники: Национальная метеорологическая служба Бенина (Bénin Météo, период наблюдений: 1980–2010 гг.) и Гидрологическая служба Главного управления водных ресурсов (период наблюдений: 1980–2020 гг.).

б. Демографическая статистика.

Результаты четырех Всеобщих переписей населения и жилищного фонда (RGPH 1, 2, 3, 4) для населенных пунктов, входящих в состав конурбации Гранд-Нокуэ. (Данные предоставлены Национальным институтом статистики и демографического анализа (INStaD) в апреле 2021 г.)

в. Пространственные данные и дистанционное зондирование:

- картографические данные OpenStreetMap (OSM, 2016 г.).
- цифровая модель рельефа (ЦМР, 2014 г.).
- данные геопортала Национального географического института Бенина (IGN Benin, 2018 г.).
- спутниковые снимки Sentinel-2A (февраль 2021 г.). Указанные пространственные данные использовались для генерации производных картографических слоев, включая: уклоны поверхности, абсолютные высоты, типы почв, гидрогеологические условия, пространственное распределение осадков, дистанции до гидрографических объектов и дорожной сети, плотность населения и структуру землепользования. Данные слоёв послужили основой для пространственной параметризации критериев оценки риска затопления на изучаемой территории.
- г. Социально-экономические данные.

Результаты анализа научной литературы и специализированного социально-экономического исследования, проведенного авторами.

Методология и методы исследования.

В рамках методологического решения рассматриваемой проблемы в процесс исследования были интегрированы технологии Географических Информационных Систем (ГИС) и метод Анализа Иерархий (Analytic Hierarchy Process — АНР) [4]. Процедура анализа включала следующие этапы:

Первый этап. Определение и характеристика факторов паводка-образующей опасности.

Второй этап. Определение и характеристика факторов уязвимости территории.

Третий этап. Стандартизация критериальных карт.

Четвертый этап. Определение весовых коэффициентов значимости факторов методом АНР.

Пятый этап. Построение интегральных карт опасности (hazard) затопления и уязвимости (vulnerability).

Шестой этап. Расчет интегрального показателя риска затопления, как функции комбинации показателей опасности (hazard) и уязвимости vulnerability).

Методология картирования риска наводнений основана на пространственном интегрировании серии критериальных карт (карты с ожидаемым результатом) посредством инструмента «Растровый калькулятор» (ArcMap 5.3). Пространственная репрезентация риска наводнения достигается путем кросс-корреляции карт опасности и уязвимости. Методологическая последовательность включает следующие этапы:

Первый этап. Определение и характеристика факторов паводка-образующей опасности (выявление, обнаружение, описание характерных признаков и особенностей чего-либо). Этап осуществляется посредством взвешенной интеграции семи критериев, идентифицированных как детерминанты паводковой опасности в районе исследований.

✓ **Первый критерий. Уклон местности (Slope):** рассчитан по цифровой модели рельефа (ЦМР), разрешение 30 м, источник SRTM). Классифицирован на три уровня (низкий, умеренный, высокий) в соответствии с прогнозируемой частотой и вероятностью затопления. Уклон детерминирует латеральное перемещение водных масс с возвышенных участков в понижения, где способствует аккумуляции осадков, формируя зоны высокой опасности затопления. Присвоены значительные весовые коэффициенты.

✓ **Второй критерий. Абсолютная высота/рельеф (Elevation/Topography):** альтиметрическая (высотная) характеристика территории, стратифицированная на три класса (низкий, умеренный, высокий) на основе ЦМР. Зоны минимальных высотных отметок соответствуют аккумуляционным равнинам и точкам конвергенции гидрографической сети. Установлена обратная корреляция между абсолютной высотой и вероятностью затопления. В исследуемом районе фокус риска локализован в аллювиальных равнинах у подножия плато.

✓ **Третий критерий. Почвенный покров (Pedology):** влияет на образование паводков через параметры инфильтрационной способности и влагоудержания. Доминирование почв с низкой инфильтрацией потенцирует процессы поверхностного стока и затопления.

✓ **Четвертый критерий. Гидрогеологические условия (Hydrogeology):** оценивается по двум ключевым параметрам: литология подстилающих пород и характеристики водонесных горизонтов. Литологический состав определяет зоны потенциального подтопления и регулирует инфильтрацию, влияя на интенсивность паводка [6]. В исследуемом районе выделены гидрогеологические комплексы: прибрежно-морские отложения, аллювиальные пески, глинистые формации и др.

✓ **Пятый критерий. Дистанция до гидрографических объектов (Distance to Water Bodies):** риск затопления коррелирует с евклидовым расстоянием до постоянных водотоков и водоемов. Прямая зависимость: риск экспоненциально возрастает при приближении к руслам. Данный фактор определяет экспозицию объектов инфраструктуры при выходе водотоков из берегов [7].

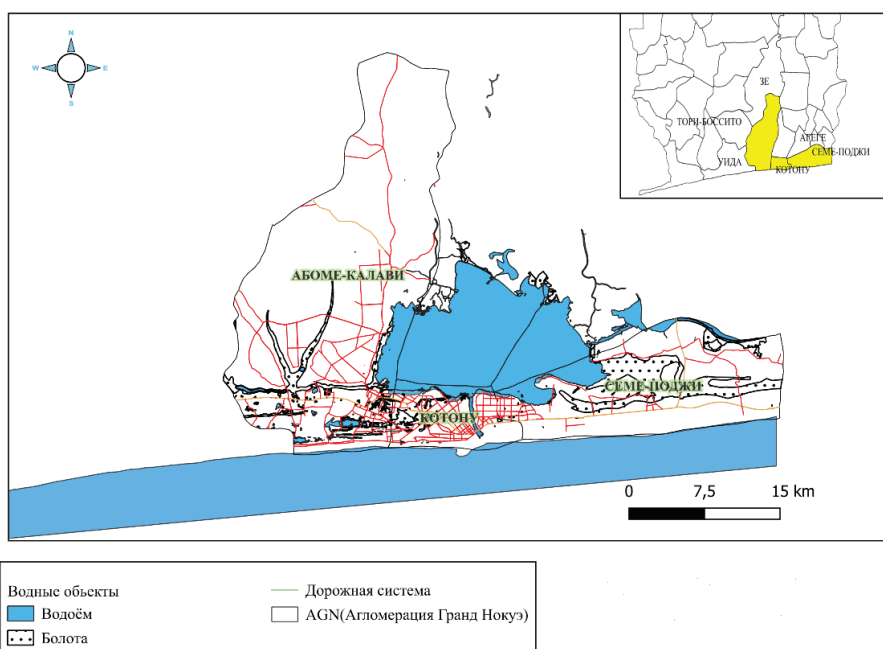


Рисунок 1. Географическое положение урбанизированной агломерации Гранд-Нокуэ
Figure 1. Geographical location of the Grand-Nokoué urban agglomeration

(Источник: Авторский материал)



✓ Шестой критерий. *Интенсивность атмосферных осадков* (Rainfall Intensity): ключевой природный фактор паводкообразования. Пространственное распределение осадков в пределах агломерации Гранд-Ноксэ получено методом кригинга на основе данных 18 метеостанций. Классифицировано на три зоны влияния: низкой, средней и высокой интенсивности.

✓ Седьмой критерий. *Характер землепользования* (Land Use/Land Cover — LULC): определяет параметры поверхностного стока и инфильтрации. Оценка LULC критична для прогнозирования потенциального ущерба различным типам активов. Применена стандартизированная классификационная легенда.

Второй этап. Определение и характеристики факторов уязвимости территории.

Анализ уязвимости сфокусирован на ключевых элементах, подверженных воздействию опасности. В агломерации Гранд-Ноксэ таковыми являются:

- плотность застройки (Building Density): косвенный индикатор плотности населения. Важная переменная для пространственного планирования и управления рисками. Наблюдаемый тренд роста плотности ведет к освоению пойменных территорий, повышая уязвимость;
- землепользование и инфраструктура (LULC & Infrastructure): размещение социально-экономических активов в зонах риска;
- проницаемость дорожной сети (Road Network Permeability): низкая пропускная способность сети может потенцировать уязвимость в условиях паводка. Для визуализации подверженных элементов проведена стандартизация слоев по каждому критерию уязвимости.

Третий этап. Стандартизация критериальных карт.

Учитывая дифференцированную значимость семи факторов в генезисе наводнений, была проведена стандартизация слоев каждой критериальной карты. Адаптированная методика [8] позволила привести значения пригодности/влияния всех слоев к единой безразмерной шкале.

Четвертый этап. Определение весовых коэффициентов значимости факторов методом АНР.

Взвешивание осуществлено методом Саати (Анализ Иерархий, АНР) [9, 10]. Данный метод,

основанный на попарном сравнении критериев, обеспечивает структурированный подход к определению приоритетов в многокритериальных задачах. Применена стандартная шкала сравнений АНР. Согласованность экспертных суждений верифицирована расчетом коэффициента согласованности «CR» (Consistency Ratio) [11, 12] с использованием формулы 1:

$$CR = CI / RI \quad (1)$$

где: CI — индекс согласованности (Consistency Index), рассчитывается по формуле

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1), \quad (2)$$

$\lambda_{\max}$ — максимальное собственное значение матрицы сравнений,
n — количество сравниваемых критериев,
RI — индекс случайности (Random Index), определяемый по справочным таблицам в зависимости от «n».

Матрица суждений признаётся согласованной при $CR < 0,1$. В противном случае ($CR \geq 0,1$) требуется пересмотр оценок.

Пятый этап. Построение интегральных карт опасности (hazard) затопления и уязвимости (vulnerability).

Агрегация взвешенных критериев опасности и уязвимости выполнена в среде ArcMap с использованием инструмента «Взвешенная сумма».

Если карта подверженности наводнениям построена корректно, она должна показывать следующие зоны:

- ✓ высокого риска (близко к воде, низменности, глинистые почвы);
- ✓ среднего риска (умеренные склоны, измененное землепользование);
- ✓ низкого риска (возвышенности, песчаные почвы, далеко от воды).

Таблица 1. Таблица формирования (оценки) критичности для анализа природных рисков затопления [5]

Table 1. Criticality formation (assessment) table for analyzing natural flood risks [5]

Уязвимость \ Опасность	1	2	3	4	5
5					
4					
3					
2					
1					

(Источник: авторский обзор литературы)

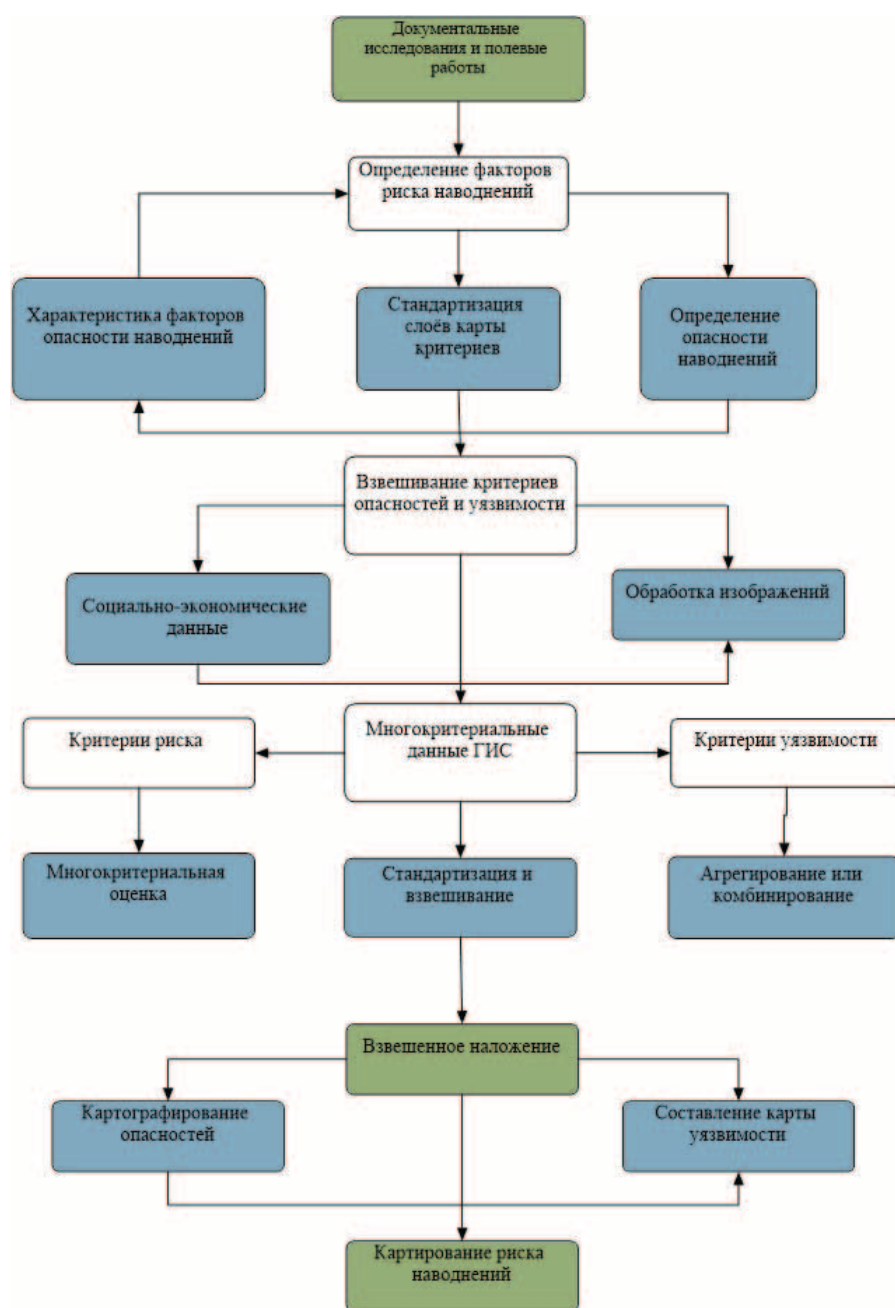


Рисунок 2. Методологическая схема многокритериального картирования риска наводнений
Figure 2. Methodological framework for multi-criteria flood risk mapping

(Источник: авторский анализ научной литературы и лабораторных исследовательских работ за 2024г.)



Шестой этап. Расчет интегрального показателя риска затопления, как функции комбинации показателей опасности (hazard) и уязвимости (vulnerability).

Интегральные факторы (взвешенное произведение факторов) опасности затопления и уязвимости территории классифицируются с применением таблицы критичности (табл. 1). Указанная таблица позволяет классифицировать зоны в соответствии с градациями тяжести потенциальных последствий и опасности паводковых событий.

Интерпретация сетки критичности позволяет провести категоризацию территорий по степени подверженности риску и разделить её на три класса:

1. Красные зоны: территории, дренируемые первичными водотоками с углом наклона русла в диапазоне 0° — $1,98^\circ$.
2. Оранжевые зоны: территории, дренируемые вторичными водотоками, преимущественно с углом наклона русла $1,98^\circ$ — $3,50^\circ$. Для данных зон характерна повышенная повторяемость паводковых явлений, однако сопутствующий материальный ущерб характеризуется как умеренно приемлемый.
3. Зеленые зоны: территории, дренируемые прерывистыми (эфмерными) водотоками с углом наклона русла более $3,5^\circ$. Возникновение наводнений в пределах этих зон носит исключительный характер и преимущественно антропогенно обусловлено.

Обобщенная методологическая схема построения карты риска наводнений представлена на рисунке 2.

Представленное выше изложение методологической последовательности решения поставленных задач позволило также акцентировать внимание на точности терминологии, формализации и «академической строгости» формулирования излагаемого материала, а также ряде

других условий изложения научно-методологических структур что очень важно при их изучении в вузах и на производстве. Особенно важно для стран, не обладающих объемной лингвистической и терминологической базы для её использования. Ниже нами приводятся ключевые аспекты, обеспечивающие научный стиль изложения материала.

1. *Формализация описания зон:* четкая структура (1., 2., 3.), использование терминов «категоризация», «дренируемые», «угол наклона русла», «повторяемость паводковых явлений», «антропогенно обусловлено».

2. *Точность используемой терминологии:* «пространственное интегрирование», «кросс-корреляция», «пространственная репрезентация», «детерминанты опасности», «взвешенная интеграция», «альтиметрическая характеристика», «стратифицированная», «аккумуляционные равнины», «конвергенция», «инфильтрационная способность», «влагоудержание», «потенцирует», «евклидово расстояние», «экспозиция», «кригинг», «стратифицированная», «дифференцированная значимость», «генезис», «безразмерная шкала», «фокус риска», «косвенный индикатор», «тренд», «потенцировать», «верифицирована», «агрегация».

3. *Устранение разговорных выражений:* замена «мы можем разделить» на «позволяет провести категоризацию», «терпимый» на «умеренно приемлемый», «частые наводнения» на «повышенная повторяемость паводковых явлений».

4. *Структурность методологии:* явное выделение этапов (1., 2., 3., 4.) с подпунктами для факторов опасности и уязвимости.

5. *Уточнение на основе формул и условий:* формальное представление формул (1) и (2) с пояснением всех переменных (« $\lambda_{\max}$ », « n », « Cl », « Rl », « CR ») и строгим условием согласованности (« $CR < 0,1$ »).

6. *Использование пассивного залога и различные конструкции:* активное использование для придания объективности («осуществляется», «достигается», «рассчитан», «классифицирован», «установлена», «проведена», «выполнена»).

7. *Устранение избыточности и упрощение синтаксиса:* объединение связанных предложений, удаление повторов.

8. *Уточнение технических деталей:* «цифровая модель рельефа (ЦМР)», «разрешение 30 м, источник SRTM», «методом кригинга», «стандартная шкала сравнений АНР».

Результаты исследования.

Исследование осуществлялось в соответствии с предложенной методологией.

1.1. Оценка факторов паводка-образующей опасности

Нами были выделены 7 критериев с разными весами, что соответствует методу взвешенного наложения (Weighted Overlay Analysis) в ГИС с распределением их влияния:

- ✓ осадки (36%) — самый значимый фактор, что логично, так как интенсивные осадки часто являются триггером наводнений;
 - ✓ расстояние до воды (21%) — близость к рекам/водоемам увеличивает риск;
 - ✓ склон (14%) — крутизна склонов влияет на скорость стока воды;
 - ✓ тип почвы (12%) — водопроницаемость грунта важна для инфильтрации.
- Второстепенные, но все же значимые факторы:
- ✓ землепользование (8%);
 - ✓ гидрогеология (5%);
 - ✓ высота над уровнем моря (4%).

Проведена проверка согласованности данных (получен коэффициент когерентности = 0.063):

- ✓ по шкале Saaty (метод анализа иерархий, АНР), значение < 0.1 считается приемлемым, что подтверждает непротиворечивость ваших весовых коэффициентов;
- ✓ по учету условия: если использовался другой метод (например, экспертные оценки), необходимо уточнить, как именно рассчитывалась согласованность.

Стандартизация ключевых факторов риска позволила оценить влияние и значимость каждого слоя критериальной карты (их весовые коэффициенты для проведенной оценки представлены в таблице 2).

В таблице 2 представлена стандартизация классов (подкритериев) для каждого параметра по непрерывной шкале пригодности в диапазоне от 0 (минимальная пригодность) до 10 (максимальная пригодность). Ранжирование классов осуществляется на основе их вклада в потенциал возникновения наводнений. Наибольшие ранги присваиваются классам, характеризующимся наиболее высокой вероятностью формирования опасных гидрологических явлений. К числу таких классов относятся: территории с крайне низкими значениями углов наклона ($< 1^\circ$), приуроченные к низким гипсометрическим уровням (0–23 м), обладающие минимальным расстоянием до водных объектов, сложенные гидроморфными почвами и подверженные воздействию поверхностных вод.

Проведенная стандартизация тематических слоев картографической модели оценки критериев опасности позволила нам осуществить пространственное распределение индикаторов риска затопления (рис. 3).

Проведен расчет интегрального показателя риска затопления (рис. 4).

Таблица 2. Стандартизация факторов опасностей для каждой критериальной карты
Table 2. Layer standardization for each criterion map

Критериальные факторы	Классы / подкритерии	Влияние слоев	Категоризация
Уклоны (%)	1,7 — 6,7	3	Низкий
	1 — 1,6	5	Умеренный
	0 — 0,9	9	Высокий
Высота (m)	36,55 — 70	3	Низкий
	23,34 — 36,24	6	Умеренный
	0 — 23,33	9	Высокий
Пространственное распределение осадков (mm)	1101,41	3	Низкий
	1101,42 — 1121,87	6	Умеренный
	1121,88 — 1148,41	9	Высокий
Расстояние до воды (m)	25-75	9	Высокий
	75-150	5	Умеренный
	> 150	2	Низкий
Педология	Ферралитные/феррагиновые почвы	3	Низкий
	Незастроенные почвы барьерного пляжа	5	Умеренный
	Влаголюбивые почвы / поверхностные воды	10	Высокий
Гидрогеология	Прибрежный бассейн	3	Низкий
	Белый песок и глина	5	Умеренный
	Песчано-глинистый аллювий и лагуна	10	Высокий
Землепользование	Естественная лесная, кустарниковая и луговая растительность	3	Низкий
	Плантации, посевы и голая почва	6	Умеренный
	Заболоченные, переувлажненные и застроенные территории	10	Высокий

(Источник: авторский обзор литературы и полевые исследования, 2021 г.)



1.2. Оценка факторов уязвимости территории

Для комплексной оценки уязвимости территорий, подверженных затоплению, был применен метод взвешенного анализа на основе трех ключевых критериев: плотности населения, характера землепользования и удаленности от транспортной инфраструктуры.

Установленные весовые коэффициенты для указанных критериев составили 57%, 33% и 10% соответственно.

Корректность весовых коэффициентов подтверждена расчетом индекса согласованности ($CR = 0,021$), значение которого не превышает допустимого порога ($CR < 0,10$).

Результаты стандартизации элементов уязвимости систематизированы в таблице 3. Критерии плотности застройки и характера землепользования были систематизированы в соответствии с трехуровневой классификационной шкалой. Весовые коэффициенты воздействия варьиру-

ются в диапазоне от 1 до 10 в зависимости от рангового положения и значимости различных тематических слоев.

Визуализация критериальных карт и пространственного распределения уровней уязвимости представлена на рисунке 5.

В результате пространственного распределения и агрегации ключевых критериев была разработана интегральная карта, отражающая состояние уязвимости на исследуемой территории (рисунок 6). Анализ выявил повышенный уровень уязвимости в районе Котону, южной части Абомей-Калави, а также в отдельных населенных пунктах округов Агблангандан и Экпе. Данные зоны характеризуются высокой степенью урбанизированности либо находятся в процессе активной урбанизации.

1.3. Классификация территорий агломерации Гранд-Нокую по степени риска.

Исследуемые территории были классифицированы на три категории в соответствии

с уровнем потенциальной опасности: низкий, умеренный и высокий. Результаты анализа пространственного распределения показали, что зоны с умеренной степенью уязвимости занимают 64% от общей площади, тогда как участки с низким и высоким уровнями уязвимости составляют 21% и 15% соответственно.

Формирование риска затопления обусловлено взаимодействием двух независимых компонентов: опасности (гидрологической угрозы) и уязвимости (степени подверженности территории негативным последствиям). При этом риск реализуется исключительно в случаях, когда зона потенциальной опасности совпадает с уязвимыми территориями, то есть участками, где социально-экономические или экологические

Таблица 3. Стандартизация факторов уязвимости по каждому критерию

Table 3. Standardization of layers by each criterion

Критериальные факторы	Класс / под-критерий	Категоризация классов	Влияние слоев
Плотность населения 2013 г. (чел./км ²)	7246 — 16210	Высокий	9
	1668 — 7245	Умеренный	5
	242 — 1667	Низкий	3
Землепользование	Здания, поля и посевы	Высокий	9
	Голые земли и зоны затопления	Умеренный	5
	Водоем	Низкий	3
Дорожная сеть	0 — 75	Высокий	8
	75,01 — 150	Умеренный	5
	>150	Низкий	1

(Источник: Авторский обзор литературы и полевые исследования, 2021 г.)

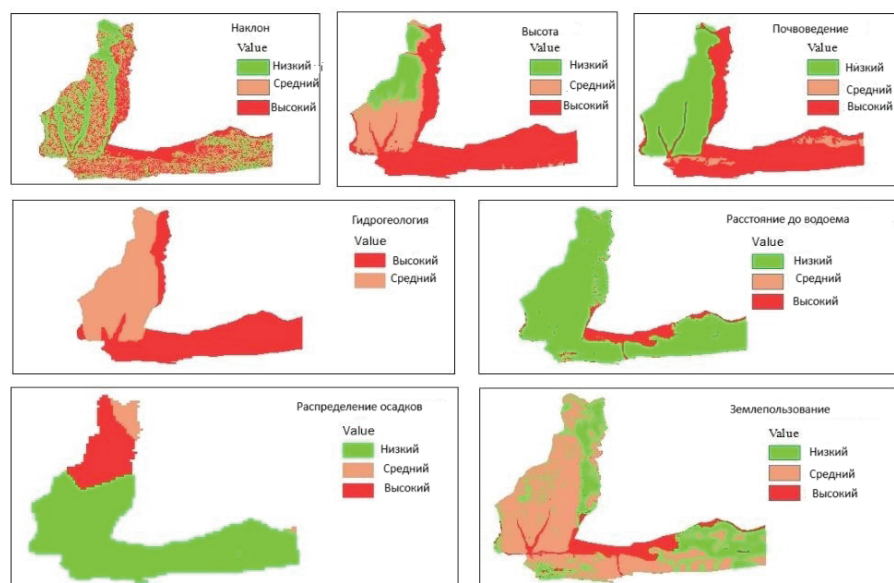


Рисунок 3. Карты критериев опасности наводнений (агломерация района Котону)

Figure 3. Flood Hazard Criteria Maps (Cotonou Metropolitan Area)

(Источник: Авторский материал)

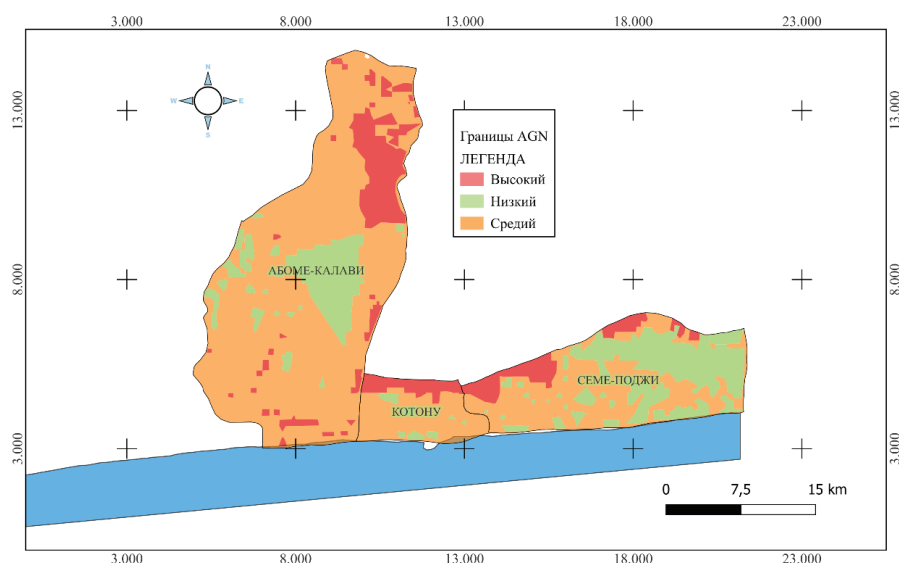


Рисунок 4. Карта подверженности наводнениям в агломерации Гранд Нокую

Figure 4. The flood susceptibility map in the Grand-Nokoué agglomeration

(Источник: Авторский материал)

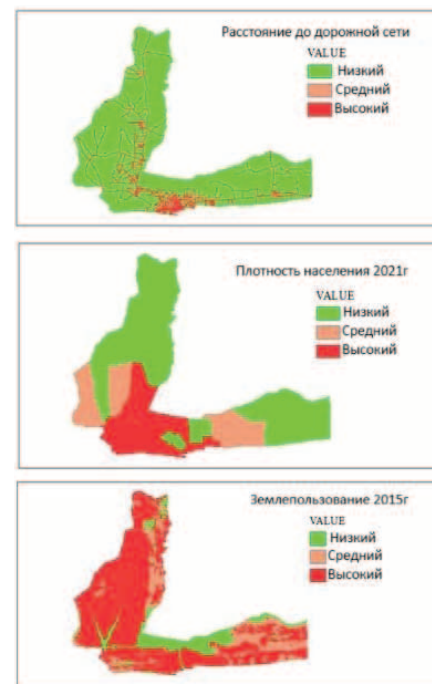


Рисунок 5. Степень оценки уязвимости территорий подверженных затоплению для агломерации Гранд-Нокую по трем дополнительно анализируемым факторам

Figure 5. Assessment of the vulnerability of flood-prone areas for based агломерации Гранд-Нокую on three additional factors

(Источник: Разработка автора)



факторы могут быть существенно нарушены в результате затопления. Пространственная дифференциация риска затопления в конурбации Гранд-Нокую визуализирована на рисунке 7.

Проведение картографирования зон риска затопления в конурбации Гранд-Нокую позволило осуществить пространственную дифференциацию территорий в соответствии с присвоенными категориями риска. Наибольшая подверженность затоплениям выявлена в округах Котону № 1, 4, 6, 9, 12 и 13, а также в административных единицах Годомей и Калави. Указанные территории характеризуются высоким уровнем риска, занимая совокупную площадь порядка 164,35 км², что составляет 19,97% от общей площади исследуемого региона.

Умеренный уровень риска затопления зафиксирован в округах Котону № 2, 3, 7, 8, 10 и 11, а также в населенных пунктах Агблангандан и Экпе (коммуна Семе-Поджи). Аналогичный уровень угрозы наблюдается в районах Хевье, Тогба, Глоджи-Гбе, Зинвье и Акассато. Совокупная площадь территорий с умеренным риском достигает 413,5 км², что соответствует 50,25% от общей площади конурбации Гранд-Нокую.

Пространственное распределение зон умеренного риска носит дисперсный характер, охватывая различные участки агломерации, в отличие от зон низкого риска, которые демонстрируют выраженную концентрацию в пределах коммуны Семе-Поджи (районы Дрежгбе, Ахолуиме и Тохуэ), а также в локациях Кпанрун, Зинвье, Акассато и Гло-Джигбе (Абомей-Калави). Площадь территорий с низким уровнем риска оценивается в 245 км², что составляет 29,77% от общей площади конурбации Гранд-Нокую.

Таким образом, проведенное исследование позволило установить пространственную неоднородность распределения риска затопления, что имеет важное значение для разработки превентивных мер и стратегий адаптации.

1.4. Рекомендации по улучшению методологии

- ✓ использовать анализ чувствительности — проверку влияния изменения каждой весовой характеристики (оценки) на результаты итоговой карты;
- ✓ добавление гидрологических данных (например, истории паводков, расхода рек);
- ✓ учет антропогенных факторов — дренажные системы, дамбы, которые могут снижать риск;
- ✓ валидация (проверка соответствия модели установленным требованиям, стандартам и критериям качества) — сравнение с историческими наводнениями для оценки точности.

Обсуждение. Понятие риска интерпретируется как вероятностное возникновение неблагоприятных событий на территориях, характеризующихся повышенной уязвимостью. Формирование риска обусловлено не только природными факторами, но и совокупностью антропогенных элементов, включая население, инфраструктуру и хозяйственную деятельность, подверженных негативному воздействию. В рамках настоящего исследования проведена комплексная оценка риска затопления в конурбации Гранд-Нокую на основе интегрального анализа критериев опасности и уязвимости. Методологическая основа исследования базируется на применении геоинформационных систем (ГИС) и метода АНР (анализа иерархических процессов), что позволило осуществить

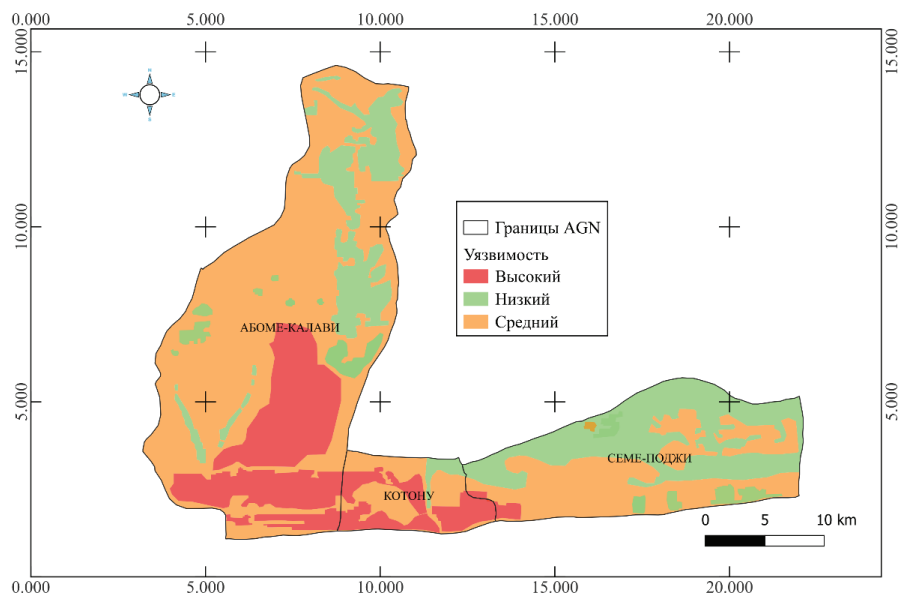


Рисунок 6. Обобщенная карта уязвимости территории от наводнения в агломерации Гранд-Нокую
Figure 6. Generalized map of flood vulnerability in the Grand-Nokoué metropolitan area

(Источник: Авторский материал)

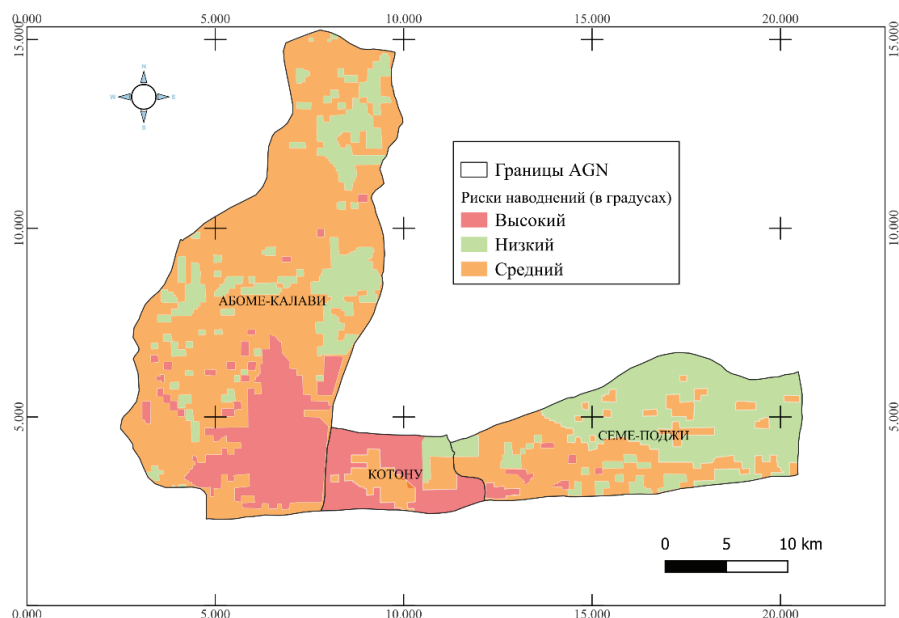


Рисунок 7. Картирование риска наводнений в районе Гранд Нокую
Figure 7. Flood risk mapping in the Grand-Nokoué area

(Источник: Авторский материал)

пространственную характеристику риска наводнений в изучаемом регионе.

АНР представляет собой инструмент многокритериального принятия решений, обеспечивающий ранжирование факторов риска посредством определения весовых коэффициентов для каждого из рассматриваемых параметров. Данный метод нашел широкое применение в научных исследованиях, что подтверждается работами [7, 13–15]. Помимо классического АНР, в мировой практике используются его модифицированные версии, такие как стохастическое моделирование методом Монте-Карло (МС-АНР) и нечеткий анализ риска наводнений (FFA) [15]. Однако следует отметить, что традиционные критерии оценки риска, включая топографические уклоны и водосборные площади [5], не учитывают специфику урбанизированных территорий, в частности агломерации

Гранд-Нокую. В связи с этим для идентификации зон потенциального затопления были интегрированы дополнительные параметры: удаленность от водных объектов, интенсивность осадков, литологический состав грунтов и характер землепользования.

Результаты исследования демонстрируют, что ряд административных районов (1-й, 4-й, 6-й, 9-й, 12-й, 13-й, Калави и Годомей) в пределах конурбации Гранд-Нокую характеризуются повышенным уровнем риска затопления. Кроме того, зоны значительной опасности выявлены в населенных пунктах Хевиз, Агблангандане и Экпе. Полученные данные согласуются с выводами предыдущих исследований [16, 17], согласно которым районы Агблангандан и Годомей, а также отдельные кварталы Котону (1-й, 3-й, 6-й, 9-й, 12-й и 13-й) регулярно подвергаются негативному воздействию паводковых явлений.



Научная новизна настоящей работы заключается в комплексной оценке риска затопления, учитывающей как сезонные разливы озера Нокуэ, так и пиковые гидрологические нагрузки в период муссонов. В отличие от исследований, ограничивающихся анализом исключительно факторов опасности [18], в данном проекте реализован интегральный подход, объединяющий критерии опасности и уязвимости, что позволило получить более репрезентативную модель риска. Картографическая визуализация результатов способствует совершенствованию систем мониторинга, управления и повышения осведомлённости о рисках наводнений [19].

Вместе с тем, применение методики сопряжено с определёнными методологическими ограничениями, в частности, с субъективностью присвоения весовых коэффициентов в рамках многокритериального анализа. Несмотря на это, комбинация ГИС-технологий и АНР представляет собой эффективный инструмент для разработки стратегий адаптации и минимизации последствий наводнений. Таким образом, предлагаемая методология, сочетающая синтетический, инновационный и универсальный подходы, может быть использована органами управления для пространственного планирования и реализации превентивных мер.

Заключение. Наводнения в пределах агломерации Гранд Нокуэ демонстрируют тенденцию к интенсификации, что обусловлено возрастающим антропогенным воздействием. Проведённое исследование позволило установить, что анализируемый сектор относится к зоне повышенной подверженности наводнениям, что связано как с его физико-географическими особенностями, так и с антропогенной деятельностью, включая урбанизационные процессы.

К числу ключевых физических факторов, детерминирующих возникновение паводковой опасности, относятся: абсолютная высота территории, градиент уклона, литолого-почвенные характеристики, гидрогеологические условия, дистанция до ближайшего водотока, интенсивность атмосферных осадков, а также характер землепользования. При этом антропогенные параметры, такие как структура землепользования, конфигурация дорожной сети и плотность населения, оказывают существенное влияние на уровень уязвимости исследуемой территории.

Результаты геоинформационного моделирования, выполненного с применением метода аналитической иерархии (АНР), свидетельствуют о том, что 19,97% площади агломерации характеризуются крайне высокой степенью риска наводнений, тогда как 29,97% территории относятся к зоне умеренного риска. Напротив,

участки с низкой вероятностью затопления занимают 50,25% площади конурбации.

Картографирование паводкового риска в агломерации Гранд-Нокуэ осуществлялось посредством интеграции статистических и геомашиных методов, что позволило синтезировать серию тематических карт. Комплексное, лаконичное и дидактически выверенное представление результатов подчеркивает пространственную неоднородность распределения паводковой опасности, а также дифференциацию уровня уязвимости населения.

Следует особо отметить, что антропогенные факторы, в частности динамика демографических процессов, характер освоения и эксплуатации земельных ресурсов, могут выступать катализатором увеличения риска наводнений в районе Гранд-Нокуэ.

В перспективе детализация оценки паводкового риска может быть достигнута за счёт включения дополнительных параметров, характеризующих уязвимость материально-технической инфраструктуры и экологических систем.

Список источников (References)

1. M. TANGUY, «Développement d'une méthode de caractérisation et d'évaluation du risque humain lié aux inondations en milieu urbain». Thèse de Doctorat en Sciences de l'Eau, Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau Terre Environnement, (2016) 429 p.
2. C. LOKOSSOU, «Cadastre et inondations cycliques dans la ville de Cotonou». Mémoire de DEA, Ecole Doctorale Pluridisciplinaire, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, (2012) 78 p.
3. C.P. BLALOGUE, «Stratégies de lutte contre les inondations dans le Grand Cotonou : diagnostic et alternative pour une gestion durable». Thèse de doctorat en Géographie et Gestion de l'Environnement, Ecole Doctorale Pluridisciplinaire, Université d'Abomey-Calavi, (2014) 242 p.
4. T.L. SAATY, «How to Make a Decision : The Analytic Hierarchy Process». European Journal of Operational Research, Decision making by the analytic hierarchy process: Theory and applications, 48, N° 1 (1990) 9-26, [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057I).
5. M. TCHINDJANG, «Paradoxes et risques dans les Hautes terres camerounaises. Multifonctionnalité naturelle et sous valorisation humaine». HDR, Université Paris Diderot, Paris 7, Vol. 3, (2012) 266 p.
6. C. FAYE, S. DIEYE, A. FALL, B. SOLLU, «Cartographie des risques d'inondation à l'échelle du bassin fluvial à l'aide de l'indice de potentiel d'inondation: Cas du sous-bassin du Niéri-Ko (Bassin de la Gambie)». Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement, Vol. N° 1 (2021) 40-51.
7. M.O. ZOGNING MOFFO, «Contribution des Systèmes d'Information Géographique pour la cartographie des zones à risques d'inondation à Yaoundé : application au bassin versant du Mfoundi». Master de spécialisation en gestion des risques et des catastrophes, Liège Université, Arlon Campus Environnement, Faculté des Sciences, Département des Sciences et Gestion de l'Environnement, (2017) 71 p.

8. G.M. OULAI, «Approche SIG pour la cartographie du risque et prévention des inondations pluviales à Cotonou (Bénin)». Mémoire d'Ingénieur en Topographie, Ecole Supérieure des Ingénieurs Géomètres Topographe, (2016) 74 p.

9. A. RAMOS, L. CUNHA, P. CUNHA, «Application de la Méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique à l'étude des glissements de terrain dans la région littorale du centre du Portugal : Figueira da Foz — Nazaré ». Geo-Eco-Trop, 38, 1 (2014) 33-44.

10. GUEDSON, «5e. Méthodes et outils Aide multicritère à la décision-Comparaison de Saaty». Université LAVAL, (2011) 24 p.

11. J-B. RAKOTOARIVELLO, «Aide à la décision Multicritère pour la gestion des risques dans le domaine financier». Université Paul Sabatier de Toulouse, Thèse de doctorat, (2018) 358 p.

12. Z.A. ROUKH, A. NADJI, «Cartographie de la susceptibilité aux inondations par la méthode de l'analyse multicritère et SIG : Cas de la wilaya d'Oran Nord-Ouest de l'Algérie». Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement ISSN : 1737-9350 ; Vol.3, N°1 (2018) 67-73.

13. A.A. AKINDELE, L. TODOME, «Evaluation du risque d'inondation par une analyse spatiale multicritère dans les communes de Pobè et d'Adja-Ouèrè». International Journal of English Literature and Social Sciences, Vol. 6, Issue-3 (2021) 12 p. ISSN : 2456- 7620, <http://dx.doi.org/10.22161/ijels.63.20>.

14. F. DIEUBON, «Analyse par Système d'Information Géographique (SIG) du risque d'inondation dans la ville de Gros-Morne en aval du bassin versant de la Rivière Mancelle, Haïti». Master de Spécialisation en Gestion des Risques et des Catastrophes, Université de Liège, Faculté des Sciences, Département des Sciences et Gestion de l'Environnement, (2020) 79 p.

15. A. ZOUGGARI, «Une approche couplant logique floue et capitalisation des connaissances pour la résolution du problème de choix des fournisseurs». Thèse de Doctorat en UFR Mathématique, Informatique et Mécanique, Université Paul Verlaine — Metz, (2018) 107 p.

16. L. WALLEZ, «Inondations dans les villes d'Afrique de l'ouest : diagnostic et éléments de renforcement des capacités d'adaptation dans le Grand Cotonou». Mémoire de Maîtrise en environnement; Mémoire de Master en Ingénierie et Management de l'Environnement et du Développement Durable, Centre Universitaire de Formation en Environnement de l'Université de Sherbrooke et Université de Technologie de Troyes, (2010) 78 p.

17. CREDEL, «Protection de la Communauté Urbaine de Grand Cotonou face aux Changements Climatiques (PCUG3C) ». Rapport technique final, (2012) 50 p.

18. G. WERREN, M. LASRI, «Cartographie du danger d'inondation, Guide pratique pour l'application de la méthode Suisse au Maroc». Institut de géographie et durabilité de l'Université de Lausanne, Laboratoire d'analyses géo-environnementales et aménagement de l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Fès, (2014) 28 p.

19. G. FORTIN, C. POIRIER, F. DUHAMEL, D. GERMAIN, «Risques d'inondation et vulnérabilité: l'exemple du bassin versant de la rivière Kennebecasis, Nouveau Brunswick, Canada». IDEAS, (2020) 17 p. DOI : <https://doi.org/10.4000/ideas.7999>.

Информация об авторах:

Вершинин Валентин Валентинович, доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой геоэкологии и природопользования, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9046-827X>, Scopus ID: 57190580623, Researcher ID: O-1151-2017, SPIN-код: 2842-5125, v.vershinin.v@mail.ru

Муссе Смаила Рауфу, аспирант кафедры геоэкологии и природопользования, ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-2056-8333>, SPIN-код: 1295-0688, sr.mousse@gmail.com

Information about the authors:

Valentin V. Vershinin, doctor of economic sciences, professor, head of the department of geoecology and environmental management, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9046-827X>, Scopus ID: 57190580623, Researcher ID: O-1151-2017, SPIN-code: 2842-5125, v.vershinin.v@mail.ru

Smaila Raufu Musse, postgraduate student of the department of geoecology and environmental management, ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-2056-8333>, SPIN-code: 1295-0688, sr.mousse@gmail.com