

Оценка и картографирование риска паводковых затоплений территории с применением фрактального анализа

А. Н. Насонов¹, О. Н. Николаева^{1,2,3}, В. В. Кульнев⁴, И. В. Цветков⁵*

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии, г. Москва, Российская Федерация

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

³ Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева, г. Москва, Российская Федерация

⁴ Центрально-Черноземное межрегиональное управление Федеральной службы по надзору в сфере природопользования, г. Воронеж, Российская Федерация

⁵ Тверской государственный университет, г. Тверь, Российская Федерация

* e-mail: onixx76@mail.ru

Аннотация. В статье охарактеризован ущерб, наносимый наводнениями мировому хозяйству. Обоснована роль ГИС-технологий и геоинформационного моделирования в получении новых знаний об особенностях пространственной локализации паводковых затоплений. Описаны примеры зарубежных исследований в данной области. Охарактеризованы гидрологические условия Калужской области, выбранной в качестве района работ. Представлена новая модель оценки риска затопления пойменных территорий, которая основана на анализе фрактальной развитости речной сети. Детально изложен процесс фрактального моделирования речной сети в среде свободно распространяемой ГИС – QGIS. Показано, что применение фрактального моделирования гидрологических процессов в QGIS позволяет избирательно оценить риски затопления территорий и заранее провести на них противопаводковые мероприятия. Представлены картосхемы паводковых затоплений. Перечислены мероприятия, рекомендованные для борьбы с паводками в Калужской области.

Ключевые слова: гидрологические процессы, паводковое затопление территорий, речная сеть, геоинформационное моделирование, ГИС-технологии, степенное распределение, фрактал, инженерно-мелиоративные мероприятия

A flood risk assessment and mapping using fractal analysis

A. N. Nasonov¹, O. N. Nikolaeva^{1,2,3}, V. V. Kulnev⁴, I. V. Tsvetkov⁵*

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russian Federation

² Siberian State University of Geosystems and Technology, Novosibirsk, Russian Federation

³ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Institute of Amelioration, Water Management and Construction named after A. N. Kostyakov, Moscow, Russian Federation

⁴ Central Black Earth Interregional Department of the Federal Service for Supervision of Natural Resources, Division of State Environmental Supervision for Voronezh region, Voronezh, Russian Federation

⁵ Tver` State University, Tver`, Russian Federation

* e-mail: onixx76@mail.ru

Abstract. The article describes damages caused by floods to the world economy. The role of GIS technologies and geoinformation modeling in obtaining new knowledge about the features of the spatial localization of floods is substantiated. Examples of foreign case-studies are described. The hydrological features of the Kaluga region, selected as the research area, are characterized. A new model for assessing the risk of flooding based on the analysis of fractal dimension of the river network is presented. The process of fractal modeling of the river network in Free and Open Source Desktop GIS - QGIS is described. It is shown that the fractal modeling of hydrological processes in QGIS makes it possible to selectively assess the risks of flooding and carry out flood prevention measures. Schematic maps of flood risks are presented. The flood prevention measures for the Kaluga region are listed.

Keywords: hydrological processes, flood, river network, geoinformation modeling, GIS technologies, power-law distribution, fractal, flood prevention measures

Введение

Глобальное изменение климата повлекло за собой значительное возрастание риска, обусловленного наводнениями и паводками. На сегодняшний день общая площадь паводкоопасных территорий на Земле составляет порядка 3 млн. км², на которых проживает около 1 млрд. человек [1]. В России около 2,5 % территории подвержено угрозам периодического паводкового затопления и подтопления (в том числе около 40 городов).

Решение задач по обеспечению безопасности населения требует совершенствования инструментария гидрологического и экологического мониторинга. В этом отношении обширные возможности предлагают современные ГИС, существенно упрощающие процесс установления новых пространственных закономерностей в области исследования водных объектов [2-4].

Так, например, в работе [5] раскрыт потенциал создания моделей речного стока для прогнозирования вероятности опасных гидрологических явлений. Свои достоинства имеет подход, при котором выполняется анализ многолетних временных рядов наблюдений за паводками в сочетании с данными дистанционного зондирования Земли MODIS [6]. Метод многокритериального анализа решений (МСДА) позволяет оценивать и картографировать риск наводнения с учетом последствий для здоровья населения и финансовых рисков [7]. Использование ГИС позволяет строить прогнозные карты риска наводнений на значительные промежутки времени (20, 50, 100 и 200 лет) [8].

Однако значительная часть исследований в данной сфере проводится без учета того факта, что речная сеть как правило имеет фрактальную конфигурацию. Между тем современные ГИС обладают всем необходимым инструментарием для того, чтобы создать фрактальную модель речной сети, отражающую пространственную и временную динамику водного режима территории. Ниже будет описан опыт использования геоинформационного моделирования для фрактального анализа речной сети с целью изучения и картографирования рисков паводковых затоплений.

Материалы и методы

В качестве района работ была выбрана Калужская область, обладающая развитой гидрографической сетью. Она располагается в центре Восточно-Европейской равнины в бассейне реки Оки. Всего в области имеется около 2000 рек общей протяженностью порядка 12 000 км. Средняя густота речной сети составляет 0,35 км/км².

Начальным этапом исследования конфигурации речной сети являлось установление зависимости между длиной водотоков L и площадью водосбора F . В европейской части России для этих величин выполняется соотношение $L \approx 1,37 \cdot F^{0,57}$, а для Сибири и Дальнего Востока $L \approx 1,49 \cdot F^{0,5}$, что свидетельствует о степенном характере связи площади водосборных бассейнов и длины водотоков, и следовательно, об их самоподобии (см. рис. 1):

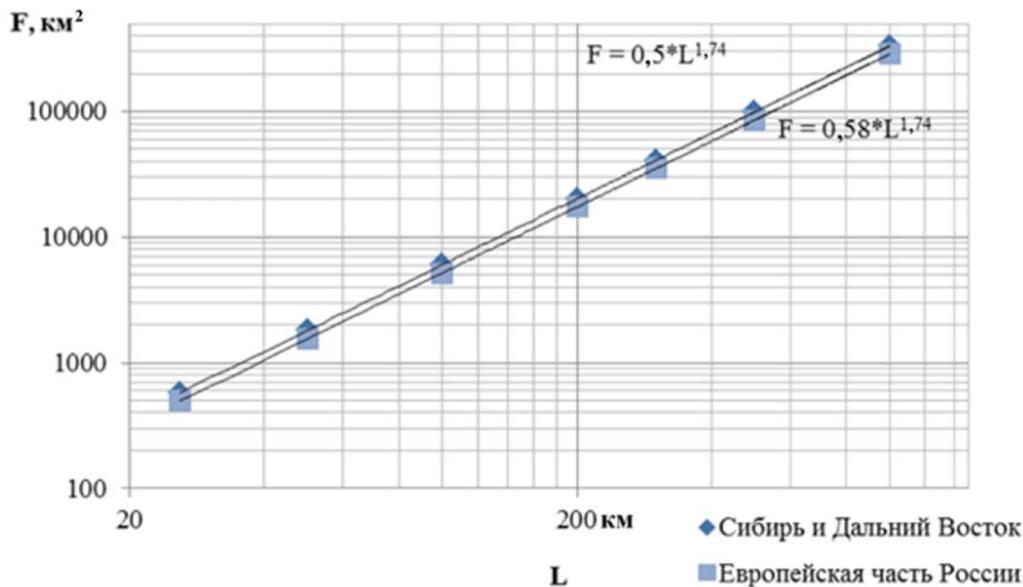


Рис. 1. Степенная зависимость площади водосбора F от длины водотоков L на территории России

Таким образом, водотоки на территории России характеризуются постоянным устойчивым режимом [9], который может резко измениться в зависимости от сезонного режима осадков [10, 11] или особенностей местного природопользования [12]. При рассмотрении речной сети как фрактала гидрологические характеристики рек будут меняться с ростом порядка реки. Это явление называется масштабным эффектом и описывается фракталами как мерой системной сложности [13, 14]. Максимальное самоподобие будет наблюдаться при анализе пространственной структуры водотоков на уровне речного бассейна.

В основе фрактальной модели по прогнозированию затоплений лежит уровень подъема воды от ординара, который на фрактальной шкале $D \in (1; 2)$, вычисляется по формуле (1) [15]:

$$\theta = \frac{D_i - 1}{D_{min} - 1}, \quad (1)$$

где θ – фрактальный коэффициент затопления исследуемой территории,

D – фрактальный показатель развитости речной сети.

Следует заметить, что характеристики θ и D зависят только друг от друга, что дает возможность рассматривать фрактальную размерность водотока как меру водонасыщенности исследуемой территории. Тенденция увеличения фрактальной размерности водотоков становится устойчивой по мере увеличения их плотности [16]. Это обусловлено уменьшением степеней свободы для регулирования стока в существующей конфигурации речной сети [17]. На территориях вблизи искусственных водоемов, используемых как противопаводковые объекты для срезки пика паводка, напротив, наблюдается уменьшение фрактальной размерности водотоков [15, 19]. Также на рисунок и фрактальную размерность речной сети могут существенно повлиять мелиоративные мероприятия (спрямление речных русел, обустройство дренажных систем и пр.) [18].

Результаты и их обсуждение

Основная часть исследования и оценки фрактальных характеристик водотоков Калужской области выполнялась в свободно распространяемой ГИС QGIS. Благодаря своей доступности она широко применяется во многих сферах для визуализации, картографии, ГИС-анализа и редактирования данных [19-21]. Использовался плагин «Minkowski DimCalculator», входящий в состав QGIS, который позволяет определять фрактальную размерность объектов и представлять результаты в виде цифровых карт [22]. Основные этапы расчета фрактальной размерности включали в себя:

1. Формирование векторного слоя с исследуемыми объектами (водотоками), выбор типа построения сети ячеек, на которые будет разбиваться исследуемая территория.

2. Автоматическое построение сети и подсчет количество ячеек, которые содержат хотя бы один фрагмент исследуемого объекта (в данном случае – участок речного русла).

3. Изменение (как правило - уменьшение) размера ячеек сети и повторение операций, выполненных на этапе 2.

Вышеописанные действия повторяются до тех пор, пока размер ячейки сети не станет равным размеру пикселя изображения.

Следует отметить, что плагин Minkowski DimCalculator позволяет компенсировать систематические ошибки с помощью клеточного метода (box-counting method). В процессе полученные значения фрактальной размерности к нормируются объектам с заранее известной фрактальной размерностью.

В целом фрактальную модель затоплений территории Калужской области можно представить соотношением:

$$\theta_i = 3,55(D_i - 1), \quad (2)$$

где D_i – распределение фрактальной размерности речной сети Калужской области, характеризующее меру ее обводненности.

На рисунке 2 представлено распределение фрактальных мер для различных участков речной сети Калужской области. Дополнительно на картосхеме показаны голубым цветом и пронумерованы места наиболее значительных паводков в 2015-2017 гг., выявленные по данным Калужского ЦГМС – филиала ФГБУ «Центральное УГМС» по Калужской области [23].

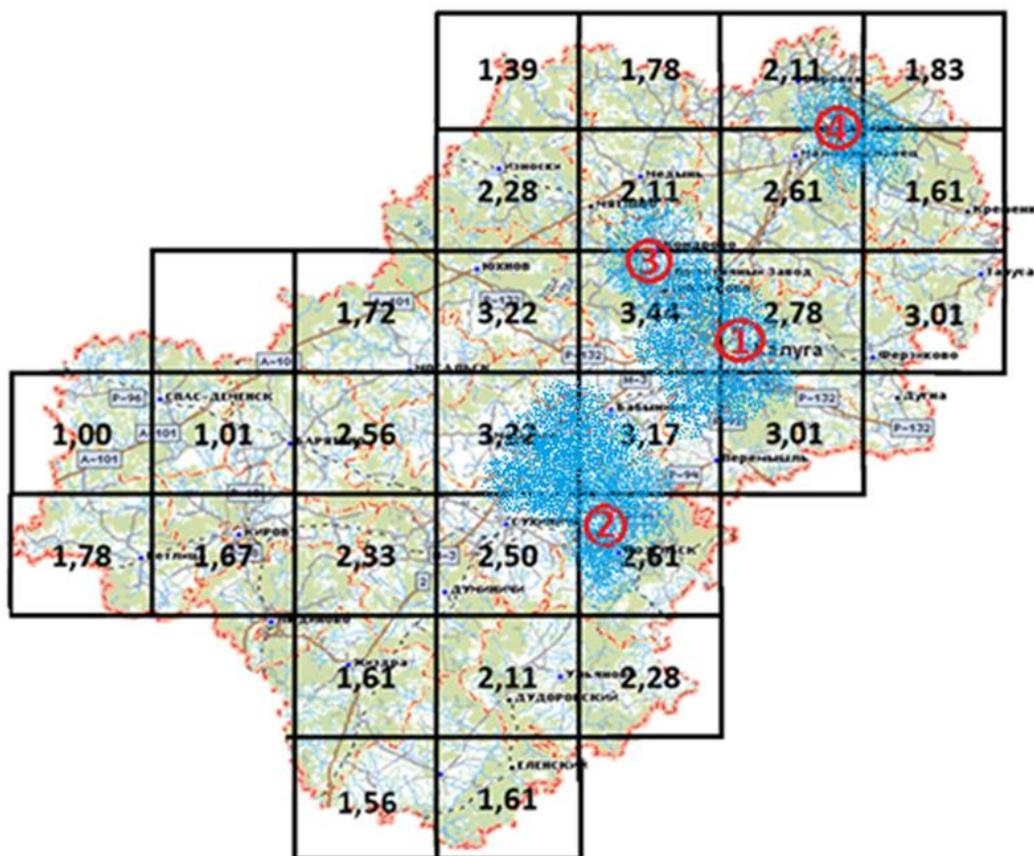


Рис. 2. Фрактальная модель паводковых затоплений Калужской области

Пространственное распределение коэффициентов затопления по территории Калужской области, установленное с использованием модели, описанной формулой (2), свидетельствует о наличии существенной (более чем в 3,4 раза) разницы потенциальных уровней подъема паводковых вод. Минимальный уровень подъема воды характерен для юго-запада области (Спасо-Демянский, Кировский, Жиздровский и Хвастовичский районы). Наиболее подвержены паводковым затоплениям зоны со значениями, лежащими в интервале $2,61 < \theta_i < 3,44$ (рисунок 2).

Как видно из сопоставления модельных данных с фактической статистикой (рисунок 2), результаты моделирования коррелируют с данными многолетних наблюдений. Таким образом, описанная методика является корректной и может применяться в практике прогнозирования паводковых затоплений.

Заключение

Использование фрактального подхода позволяет расширить арсенал географических информационных систем, позволяя, помимо прочего решать геоэкологические задачи по выработке реабилитационных мероприятий окружающей среды [24] и разрешению геоэкологических конфликтов природопользования в речных бассейнах [25]. Картографическое представление полученных результатов обеспечивает оптимальный выбор мест проведения инженерно-технических мероприятий по защите территории от наводнений (строительство новых защитных сооружений и реконструкция существующих; расчистка и углубление речных русел для увеличения их пропускной способности; перемещение важных социально-культурных или экологически опасных объектов за границы подтопляемой территории и пр.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авакян А.Б., Истомина М.Н. Наводнения как глобальная проблема / А.Б. Авакян, М.Н. Истомина // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. – 2013. – №1. – С. 180–193.
2. Бедарев А.В., Репина Е.М., Кульнев В.В. Метрологическое обеспечение экологического мониторинга водных объектов / А.В. Бедарев, Е.М. Репина, В.В. Кульнев // Актуальные проблемы гидрогеологических, инженерно-геологических и геоэкологических исследований. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Кафедра гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии ВГУ. – Воронеж. – 2020. – С. 58–67.
3. Березовой В.В., Кульнев В.В. Экологическая безопасность гражданского строительства / В.В. Березовой, В.В. Кульнев // Трансграничное сотрудничество в области экологической безопасности и охраны окружающей среды. сборник материалов. Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины. Гомель. – 2020. – С. 23–30.
4. Звягинцева А.В., Кульнев В.В., Кульнева В.В. Экологический мониторинг опасных гидрологических явлений / А.В. Звягинцева, В.В. Кульнев, В.В. Кульнева // Экология и развитие общества. – 2018. – № 3 (26). – С. 62–66.
5. Докус А.А., Шакирзанова Ж.Р. Прогнозирование и оценка гидрологических рисков в период весеннего половодья / А.А. Докус, Ж.Р. Шакирзанова // Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии. Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова. Под редакцией О.М. Макарьевой. С.-Пб.: Изд-во «Наукоемкие технологии». – 2018. – С. 711–716.
6. Архипкин О.П., Сагатдинова Г.Н., Бралинова Ж.А. Анализ многолетних временных рядов данных космического мониторинга паводков / О.П. Архипкин, Г.Н. Сагатдинова, Ж.А. Бралинова // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Материалы VII Международной научной конференции. Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий. – Красноярск. – 2020. – С. 161–164.
7. Binh Thai Pham, Chinh Luu, Tran Van Phong, Huu Duy Nguyen, Hiep Van Le, Thai Quoc Tran, Huong Thu Ta, Indra Prakash Flood risk assessment using hybrid artificial intelligence models integrated with multi-criteria decision analysis in Quang Nam Province, Vietnam, Journal of Hydrology, Vol. 592. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125815>.
8. Badana Ntanganedzeni, Joel Nobert Flood risk assessment in Luvuvhu river, Limpopo province, South Africa Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102959>.
9. Бураков Д.А. О влиянии испарения на сток весеннего половодья в лесной зоне / Д.А. Бураков // Метеорология и гидрология. – 1968. – №12. – С.55–61

10. Дьяконова Т.А., Писарев А.В., Хоперсков А.В., Храпов С.С. Математическая модель динамики поверхностных вод / Т.А. Дьяконова, А.В. Писарев, А.В. Хоперсков, С.С. Храпов // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика. – 2014. – №1. – С. 35–44.
11. Сметанин В.И., Насонов А.Н., Жогин И.М., Цветков И.В. Определение территориальных зон возведения защитных противопаводковых дамб с использованием фрактального анализа речной системы / В.И. Сметанин, А.Н. Насонов, И.М. Жогин, И.В. Цветков // Природообустройство. – 2013. – №5. – С. 54–59.
12. Владимиров А.М. Факторы формирования экстремального стока в маловодный сезон / А.М. Владимиров // Ученые Записки РГГМУ. – № 7. – Санкт-Петербург. – 2008. – С. 13–22.
13. Божокин С.В., Паршин Д.А. Фракталы и мультифракталы / С.В. Божокин, Д.А. Паршин // Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». – 2001. – 128 с.
14. Жиков В.В. Фракталы / В.В. Жиков // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – №12. – С.109–117.
15. Насонов А.Н., Цветков И.В., Жогин И.М., Кульнев В.В., Репина Е.М., Киринос С.Л., Звягинцева А.В., Базарский О.В. Фракталы в науках о Земле: учебное пособие. Воронеж: Изд-во «Ковчег». – 2018. – 82 с.
16. Насонов А.Н., Кульнев В.В., Цветков И.В., Насонов С.Н. О применении фрактальных методов в дистанционном мониторинге очагов опустынивания в южном Приаралье / А.Н. Насонов, В.В. Кульнев, И.В. Цветков, С.Н. Насонов // Экология и развитие общества. Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти первого Президента Международной академии наук экологии, безопасности человека и природы Заслуженного эколога Российской Федерации, доктора технических наук, профессора Виктора Антоновича Рогалева. Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы (МАНЭБ). – 2019. – С. 25–30.
17. Полуниин А.Я. О моделировании процесса поступления воды на водосбор для краткосрочных прогнозов стока // Труды Гидрометцентра. – 1988. – Вып. 295. – С. 69–79.
18. Барсукова М.В., Король Т.С., Лагутина Н.В., Насонов А.Н. Курс лекций по экологической безопасности в природообустройстве и водопользовании: учебно-методическое пособие. М.: Изд-во «ДПК-Пресс», 2020. – 132 с.
19. Цветков И.В., Насонов А.Н., Жогин И.М. PLUG-IN к ГИС QGIS по фрактальному анализу природных объектов (программа для ЭВМ). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016615029, от 13.05.2016 в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.
20. Цветков И.В., Насонов А.Н., Жогин И.М. Фрактальная идентификация природных объектов (программа для ЭВМ). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016615027, от 13.05.2016 в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.
21. Цветков И.В., Насонов А.Н., Жогин И.М. Фрактальный мониторинг природных объектов (программа для ЭВМ). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016612322 от 17.03.2016 в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.
22. Яковченко С.Г., Постнова И.С., Жоров В.А., Ловцкая О.В. Опыт использования ГИС для оценки зон затопления, ГИС для устойчивого развития территорий / С.Г. Яковченко, И.С. Постнова, В.А. Жоров, О.В. Ловцкая // Материалы международной конференции. Владивосток-Чанчунь. – 2004. – С. 574–577.
23. Официальный сайт Росгидромета. Весеннее половодье 2020 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.meteorf.ru/press/polovod2020/>.

24. Почечун В.А., Кульнев В.В. Геосистемное районирование как основа для реабилитационных мероприятий окружающей среды горно-металлургического комплекса (на примере металлургического комбината) / В.А. Почечун, В.В. Кульнев // Медицина труда и промышленная экология. – 2016. – № 10. – С. 36–39.

25. Сагова З.М., Межова Л.А., Кульнев В.В., Луговской А.М. Причины геоэкологических конфликтов природопользования в международных речных бассейнах и пути их урегулирования / З.М. Сагова, Л.А. Межова, В.В. Кульнев, А.М. Луговской // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. – 2018. – Т. 12. – №3. – С. 114–121.

© А. Н. Насонов, О. Н. Николаева, В. В. Кульнев, И. В. Цветков, 2022