

Фрактальная оценка паводковых затоплений

А. Н. Насонов¹, В. В. Кульнев² ✉, О. Н. Николаева³, Г. А. Анциферова⁴,
Е. С. Галкина⁴, И. В. Цветков⁵

¹Российский государственный аграрный университет –
Московская сельскохозяйственная академия им. К. А. Тимирязева, Российская Федерация
(127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49)

²Центрально-Черноземное межрегиональное управление
Федеральной службы по надзору в сфере природопользования, Российская Федерация
(394087, г. Воронеж, ул. Ломоносова, 105)

³Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Российская Федерация
(630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10)

⁴Воронежский государственный университет, Российская Федерация
(394068, г. Воронеж, ул. Хользунова, 40)

⁵Тверской государственный университет, Российская Федерация
(170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33)

Аннотация: Цель – повышение эффективности исследовательских работ, направленных на определение вероятного уровня подъема паводковых вод и оценку риска паводковых затоплений территорий.

Материалы и методы. При оценке риска паводковых затоплений территорий использовались методы мультифрактального анализа и специальное дополнение к геоинформационной системе, позволяющее анализировать картографические материалы для получения новых знаний о конфигурации речной сети и обусловленных этим особенностях пространственной локализации паводковых затоплений.

Результаты и обсуждение. Представлена модель оценки риска затопления пойменных территорий, которая основана на анализе фрактальной развитости речной сети. Детально изложена методика фрактального моделирования на основе свободно распространяемой географической информационной системой – QGIS. Полученные результаты выражены в картосхемах территорий с высоким риском паводкового затопления на примере Калужской области. Приведен перечень предлагаемых противопаводковых мер. **Выводы.** Применение фрактального моделирования гидрологических процессов в QGIS позволяет оценить уровень вероятного подъема паводковых вод на анализируемых территориях, избирательно оценить риски затопления и провести на них превентивные инженерно-мелиоративные мероприятия.

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

Для цитирования: Насонов А. Н., Кульнев В. В., Николаева О. Н., Анциферова Г. А., Галкина Е. С., Цветков И. В. Фрактальная оценка паводковых затоплений // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2021, №4, с. 13-23. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo.2021.4/3746>

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении тысячелетий люди борются с наводнениями, но никак не могут преуспеть в этом мероприятии. Наоборот, ущерб от наводнений, особенно в последние десятилетия,

растет с неимоверной быстротой. Суммарная площадь паводкоопасных территорий на земном шаре составляет ~ 3 млн. км², что сопоставимо с территориями всех государств Западной Европы. В районах, подверженных наводнени-



ям, проживает около 1 млрд. человек [1], из них в России – 4,5 миллиона [24].

По данным ООН, экономические потери от наводнений и затоплений составляют около 70% суммарного ущерба от воздействия природных катастроф и стихийных бедствий. В Российской Федерации угрозам наводнений разного характера подвержено 2,5% территории страны, более 40 крупных городов и населенных пунктов и около 500 тыс. га. площадей страдают от периодических паводковых подтоплений.

Структура речной сети формировалась под воздействием широкого комплекса параметров – рельефа и геологического строения, климатических условий, антропогенной деятельности и прочего. Соответственно, анализируя структуру речной сети, можно получить ценную информацию о характере речного стока.

Пространственный анализ гидрологических явлений с использованием ГИС (географических информационных систем) позволяет разработать новые подходы к пониманию пространственных зависимостей, которые могут быть ценным источником информации о свойствах исследуемых водных объектов [13], и, следовательно, расширить методический инструментарий экологического мониторинга [5, 6]. Так, например, исследования одесских ученых [10] показывают, что моделирование речного стока – важный элемент при планировании и управлении системами водоснабжения, а также при прогнозировании вероятности опасного гидрологического явления для потребителя. Казахскими исследователями выполнен анализ многолетних временных рядов данных космического мониторинга паводков в сочетании с данными дистанционного зондирования

Земли, и отмечено, что наиболее представительные результаты получаются при использовании данных низкого разрешения MODIS [3]. Вьетнамскими учеными приведена схема оценки риска наводнений, сочетающая оценку восприимчивости к наводнениям и оценку их последствий (здоровье человека и финансовые потери), для разработки окончательной карты оценки риска наводнений с использованием метода многокритериального анализа решений (MCDA) [26]. Карты риска наводнений на пойменных территориях р. Лимпопо, составленные танзанийскими специалистами в ArcGIS, позволили установить районы, подверженные риску затопления во время наводнений с периодом возврата 20, 50, 100 и 200 лет [27].

Данные о фрактальных параметрах гидрографических объектов, обработанные в ГИС, позволяют создать фрактальную модель речной сети, отражающую пространственную и временную динамику водного режима территории. В данной статье предпринята попытка использования геоинформационного моделирования для анализа фрактальной структуры речной сети с целью исследования рисков паводковых затоплений. В качестве модели выбрана Калужская область.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Калужская область располагается в центре Восточно-Европейской равнины в бассейне рек Оки, Болвы, Серены, Жиздры, Рессы, Угры, Шани, Лужи, Суходрев и по протяженности с севера на юг составляет 220 км, с запада на восток около 220 км.

В области протекает 2043 рек и общей протяженностью 11 670 км. Из них 280 рек имеют длину более 10 км, общей протяженностью 7455 км,

Таблица 1

Градации водотоков и характеристики водосборов России
[Table 1. Watercourse gradations and catchment characteristics of Russia]

Градация водотоков, км / Watercourse gradation, km	Площадь водосборов, км ² / Area of spillways, km ²	Европейская часть России, м / European part of Russia, m	Сибирь и Дальний Восток, м / Siberia and the Far East, m
<10	<35	439075	2029130
10-25	36-177	20785	79663
26-50	178-608	4573	16609
51-100	609-2090	1829	5780
101-200	2091-7180	631	1886
201-300	7181-14800	137	432
301-500	14801-36600	62	251
501-1000	36601-126890	37	130
>1000	>126890	11	40

а рек и ручьев длиной менее 10 км на территории области насчитывается 1763. Их общая протяжённость – 4215 км. Средняя густота речной сети – 0,35 км/км². Основа водной системы – река Ока, прочие крупные реки области – Угра, Жиздра, Болва, Протва, Воря, Ресса, Шаня, Яченка.

Традиционным методом исследования конфигурации речной сети является установление связи протяженности водотоков, их притоков и структуры водосборных бассейнов, которые обусловле-

ны различием географических характеристик [8]. Например, для речной сети России такая оценка может быть представлена в виде таблицы 1.

Так, для представленных данных Европейской части справедливо соотношение длины основного русла к его площади $L \approx 1,37 \cdot F^{0,57}$, а для Сибири и Дальнего Востока $L \approx 1,49 \cdot F^{0,5}$. Полученные зависимости свидетельствуют о том, что связь площади водосборных бассейнов и речных водотоков имеет степенной характер, т.е. самоподобны (рис. 1).

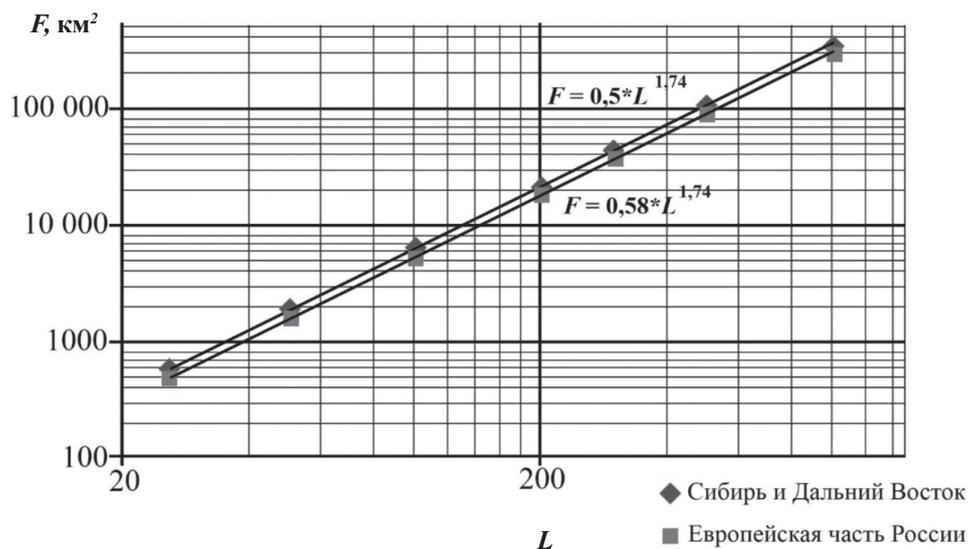


Рис. 1. Степенная зависимость площади водосбора F от длины водотоков L на территории России [Fig.1. Gradual dependence of spillway area F to the length of watercourses L in the territory of Russia]

Разным бассейнам свойственны свои типы структуры речной сети. Изменение гидрологических характеристик с ростом порядка реки называется масштабным эффектом, который как раз и описывается фракталами как мерой системной сложности [7, 12]. Максимально выраженными фрактальными свойствами обладает структура речных водотоков – в границах каждого речного бассейна они образуют иерархию стоков постепенно возрастающего размера. В результате возникает самоподобие, характерное для формирования речной сети в целом [2].

В основе фрактальной модели по прогнозированию затоплений лежит уровень подъема воды от ординара, основанный на анализе фрактальных показателей геометрии речной сети, которые могут варьироваться на фрактальной шкале $D \in (1;2)$, и вычисляется по формуле (1). Более подробно выведение формулы (1) показано в [18]:

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

где θ – фрактальный коэффициент затопления исследуемой территории, D – фрактальный показатель развитости речной сети. Параметр θ позволяет оценивать отношение уровня подъема паводковых вод на территории с фрактальной размерностью речной сети D_i к подъему паводковых вод на территории с минимальной фрактальной размерностью речной сети D_{min} .

Характеристика θ является количественным параметром паводка и зависит только от D , что позволяет трактовать фрактальную размерность водотока как меру сложности речной сети исследуемой территории. Причем устойчивая тенденция увеличения фрактальной размерности водотоков наблюдается с увеличением их плотности [17]. С системной точки зрения это объясняется «сжатием» объекта во внешней среде и уменьшением степеней свободы для регулирования стока в существующей конфигурации речной сети [20]. При существенных возмущениях внешних факторов изменяется и характер стока в динамике. Водные потоки ищут новые, энергетически более выгодные пути течения, что является

причиной затопления территории [11]. Напротив, уменьшение фрактальной размерности водотоков наблюдается, как правило, вблизи искусственных водоемов и водохранилищ, используемых в качестве противопаводковых объектов с целью срезки пика паводков [18, 23].

Для оценки фрактальных характеристик водотоков исследуемой территории используется свободно распространяемая ГИС QGIS. Благодаря своей доступности она широко применяется во многих сферах для визуализации, картографии, ГИС-анализа и редактирования данных^{1,2} [16, 19], также она поддерживает большое количество растровых и векторных форматов геоданных, что упрощает процесс импорта и их обработки данных, хотя и созданных в других программных продуктах³. С позиций предлагаемого исследования наиболее важным является тот факт, что QGIS включает в себя специальный плагин – «Minkowski DimCalculator», позволяющий определять фрактальную размерность объектов и представлять полученные результаты в виде цифровых карт [25]. Исходные данные для использования этого плагина должны быть представлены в виде набора векторных объектов с линейным типом геометрии. Расчет фрактальной размерности выполняется в следующей последовательности: 1) выбор исследуемого векторного слоя; 2) ввод имени атри-

бута для сохранения результата; 3) выбирается тип построения сетки покрытия территории: (Layer Grid или Grid Feature). В первом случае будет построена единая сетка для всей исследуемой территории; во втором – для каждого линейного объекта будет создана своя сетка, которой можно будет присвоить уникальные параметры.

1. Выбранный тип сетки накладывается на территорию (или на отдельные объекты территории).

2. Автоматически подсчитывается количество ячеек, содержащих хотя бы один фрагмент исследуемого объекта.

3. Затем размер ячеек сетки изменяют (как правило, уменьшают), и вычисления выполняются заново. Процесс повторяется до тех пор, пока размер ячейки покрытия не станет равным пикселю изображения.

Для подсчета фрактальной размерности речной сети при создании сетки берутся не отдельные бассейны рек, а прямоугольные области по принципу районирования территории. Формально эта процедура может быть записана следующим соотношением:

$$\log N(\varepsilon) = -D \log(\varepsilon), \quad (2)$$

где D – фрактальный показатель развитости водотоков, N(ε) – размер исследуемой территории, (ε) – варьируемый масштаб измерения. Фрактальная размерность в соотношении (2) вычисляется как тангенс угла наклона логарифмической зависимости.

Таблица 2

Зоны возможных затоплений в половодье (по данным многолетних наблюдений)
[Table 2. Areas of possible flooding (based on multi-year records)]

№	Река / The river	Возможный уровень подъема воды, см / Possible water elevation level water level, cm	Уровни начального подтопления, см / Initial flooding levels, cm	Район подтопления / Waterlogged area	Объект подтопления / Waterlogged site	Повторяемость гидрологического явления / Repeatability of the hydrological phenomenon
1	Ока	700 – 1525	1100	г. Калуга	Жилые дома	Ежегодно
2	Жиздра	500 – 1050	850	Козельский р-н	Населенные пункты	14 раз за 46 лет
3	Угра	550 – 1125	750	Дзержинский р-н	Населенные пункты	2 раза за 46 лет
4	Протва	400 – 780	750	Жуковский р-н	Населенные пункты	13 раз за 46 лет

¹ 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.

² 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.

³ Цветков И. В., Насонов А. Н., Жогин И. М. PLUG-IN к GIS 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.

Важной особенностью работы с плагином Minkowski DimCalculator в структуре QGIS авторы считают его уточнение для компенсации систематических ошибок заложенного в нем клеточного метода (box-counting method). Это достигается нормировкой полученных значений фрактальной размерности к объектам с заранее известной фрактальной размерностью.

Для этого в программе символьно-численных вычислений Maple генерируется серия не

менее чем из трех фрактальных объектов с заранее известной размерностью (рис. 2–4). Затем вычисляется среднее арифметическое значение погрешности метода ΔD , которое в дальнейшем используется для нормировки результатов по формуле:

$$D = D_{\text{расч.}} \pm \Delta D, \quad (3)$$

где ΔD – среднее арифметическое ошибок, полученных при определении D клеточным методом в QGIS.

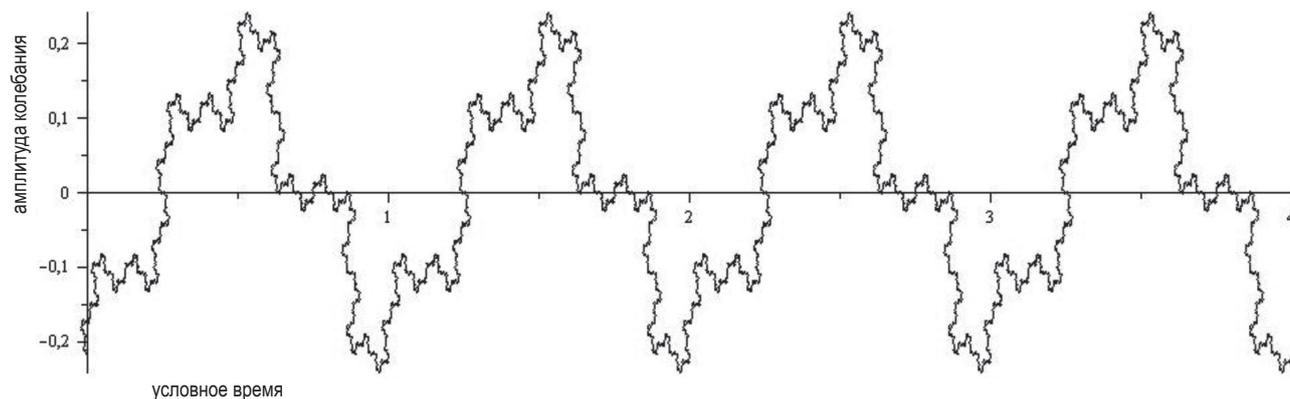


Рис. 2. Сгенерированный фрактальный объект с размерностью 1,34
[Fig. 2. Generated fractal object with dimension 1.34]

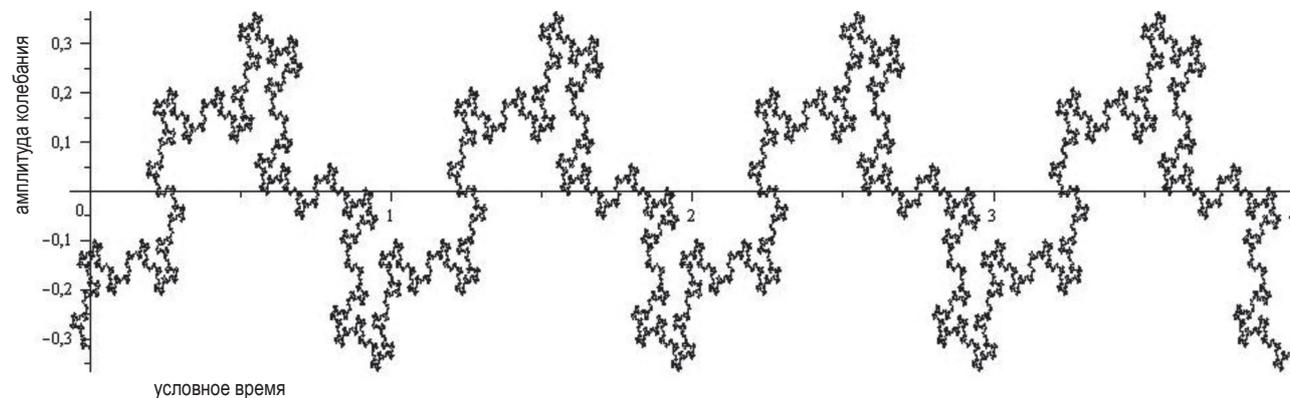


Рис. 3. Сгенерированный фрактальный объект с размерностью 1,45
[Fig. 3. Generated fractal object with dimension 1.45]

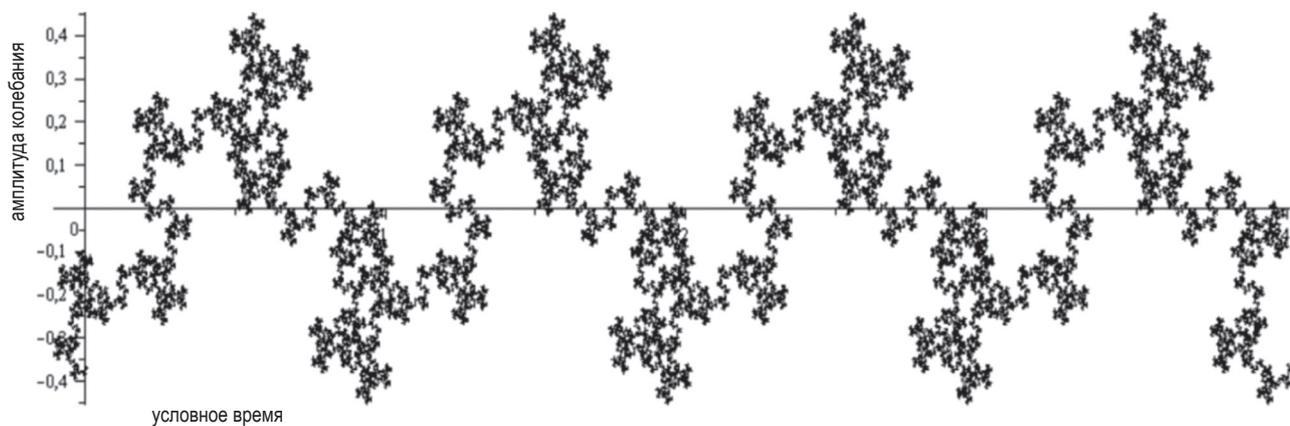


Рис. 4. Сгенерированный фрактальный объект с размерностью 1,63
[Fig. 4. Generated fractal object with dimension 1.63]

луга (1), Козельский (2), Дзержинский (3) и Жуковский (4) районы. Опасным в границах Калужской области оказывается весь бассейн реки Ока. В меньшей степени затоплениям подвержены Износковский, Юхновский и Думиничский районы). На севере области потенциальный уровень подъема воды значительно ниже, чем в центре области.

Полученный результат говорит о том, что максимальные значения коэффициентов затоплений $2,61 < \theta_i < 3,44$ покрывают статистику многолетних затоплений. Это означает, что используемая методика корректна и может применяться в практике прогнозирования паводковых затоплений.

Поскольку коэффициент затопления есть линейная функция фрактальной размерности, измеряемая в диапазоне $1 < D < 2$, то можно сделать вывод, что интервал $2,61 < \theta_i < 3,44$ характеризует напряженность в динамике процессов водоотвода на территории Калужской области. Нарушение баланса процессов притока воды и ее водоотвода на выделенных территориях начинается со значения $\theta_i = 2,61$. По мере возрастания коэффициента нарушаются процессы водоотвода. Вода заполняет околорусловые пространства и происходит затопление, вызванное количеством выпавших осадков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При изучении структуры речной сети были использованы методы фрактального анализа. Разветвленная речная сеть формируется под воздействием широкого комплекса параметров – рельефа и геологического строения, климатической зоны, антропогенной деятельности и прочего. Соответственно, анализируя фрактальные параметры речной сети можно получить ценную информацию о характере речного стока.

Рассмотренные в статье методы выявляют неявные статистические закономерности подъема воды на фоне выпадения осадков, активного снеготаяния в весенний период, возникновения подпорных явлений, позволяют моделировать характер речного стока и уровни подъема паводковых вод при изменениях в его структуре.

Использованный фрактальный подход позволяет расширить арсенал методов, используемых в географических информационных системах, и решать геоэкологические задачи по выработке реабилитационных мероприятий окружающей среды [14, 15, 21] и гасить конфликты при водопользовании в речных бассейнах [4, 22].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авакян А. Б., Истомина М. Н. Паводнения как глобальная проблема // *Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования*, 2013, № 1, с. 180-193.
2. Алексеевский Н. И., Косицкий А. Г., Христофоров А. В. Фрактальные свойства речных систем и их использование в гидрологических расчетах // *Вестник Томского государственного университета*, 2013, № 371, с. 167-170.
3. Архипкин О. П., Сагатдинова Г. Н., Бралинова Ж. А. Анализ многолетних временных рядов данных космического мониторинга паводков // *Материалы VII Международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли»*, 2020, с. 161-164.
4. 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.
5. Бедарев А. В., Репина Е. М., Кульнев В. В. Метрологическое обеспечение экологического мониторинга водных объектов // *Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы гидрогеологических, инженерно-геологических и геоэкологических исследований»*, Воронеж, 2020, с. 58-67.
6. Березовой В. В., Кульнев В. В. Экологическая безопасность гражданского строительства // *Сборник материалов II Международной конференции «Трансграничное сотрудничество в области экологической безопасности и охраны окружающей среды»*, 2020. с. 23-30.
7. Божокин С. В., Паршин Д. А. *Фракталы и мультифракталы*. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 128 с.
8. Бураков Д. А. О влиянии испарения на сток весеннего половодья в лесной зоне // *Метеорология и гидрология*, 1968, № 12, с. 55-61
9. Владимиров А. М. Факторы формирования экстремального стока в маловодный сезон // *Ученые Записки РГГМУ*, 2008, № 7, с. 13-22.
10. Докус А. А., Шакирзанова Ж. Р. Прогнозирование и оценка гидрологических рисков в период весеннего половодья // *Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова «Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии»*, 2018, с. 711-716.
11. Дьяконова Т. А., Писарев А. В., Хоперсков А. В., Храпов С. С. Математическая модель динамики поверхностных вод // *Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика*, 2014, № 1. с. 35-44.
12. Жиков В. В. Фракталы // *Соросовский образовательный журнал*, 1996, №12, с. 109-117.
13. Звягинцева А. В., Кульнев В. В., Кульнева В. В. Экологический мониторинг опасных гидрологических явлений // *Экология и развитие общества*, 2018, № 3 (26), с. 62-66.

14. Кульнев В. В., Базарский О. В. Комплексная методика геоэкологической оценки территории горнодобывающих предприятий // *Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки*, 2011, № 2, с. 142-147.
15. Кульнев В. В., Почечун В. А. Применение альголизации питьевых водоемов Нижнетагильского промышленного узла // *Медицина труда и промышленная экология*, 2016, № 1, с. 20-21.
16. Кулыгин В. В. Совместное использование байесовских сетей и ГИС для оценки рисков штормовых нагонов в дельте р. Дон // *Вестник СГУГиТ*, 2018, т. 23, № 2, с. 92-107.
17. Насонов А. Н., Кульнев В. В., Цветков И. В., Насонов С. Н. О применении фрактальных методов в дистанционном мониторинге очагов опустынивания в южном Приаралье // *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 Роголева «Экология и развитие общества»*, 2019, с. 25-30.
18. 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.
19. Непоклонов В. Б., Хабаров Д. А., Хабарова И. А. Применение геоинформационных технологий при исследовании изменений структуры землепользования территорий по материалам многозональной космической съемки // *Вестник СГУГиТ*, 2020, т. 25, № 2, с. 151–159.
20. Полуниин А. Я. О моделировании процесса поступления воды на водосбор для краткосрочных прогнозов стока // *Труды Гидрометцентра*, 1988, вып. 295. с. 69-79.
21. Почечун В. А., Кульнев В. В. Геосистемное районирование как основа для реабилитационных мероприятий окружающей среды горно-металлургического комплекса (на примере металлургического комбината) // *Медицина труда и промышленная экология*, 2016, № 10, с. 36-39.
22. Сагова З. М., Межова Л. А., Кульнев В. В., Луговской А. М. Причины геоэкологических конфликтов природопользования в международных речных бассейнах и пути их урегулирования // *Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки*, 2018, т. 12, № 3, с. 114-121.
23. 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 // *Природообустройство*, 2013, № 5, с. 54-59.
24. Хмелев В. А., Турбинский В. В., Самшорина А. А., Суворова А. В., Колосницына В. В., Че-чек И. Геоинформационные технологии в санитарно-гигиенической оценке последствий наводнений в населенных пунктах (на примере бассейна реки Оби Алтайского края в 2014-2015 гг. // *Вестник СГУГиТ*, 2015, № 4 (32), с. 153-168.
25. Яковченко С. Г., Постнова И. С., Жоров В. А., Ловцкая О. В. Опыт использования ГИС для оценки зон затопления, ГИС для устойчивого развития территорий // *Материалы международной конференции. Владивосток-Чанчунь*, 2004, с. 574-577.
26. 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 [Electronic recourse]. *Journal of Hydrology*, 2021, vol. 592.
27. Badana Ntanganedzeni, Joel Nobert. Flood risk assessment in Luvuvhu river, Limpopo province, South Africa [Electronic recourse]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102959>.
- Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.
- Поступила в редакцию 21.04.2021
Принята к публикации 23.11.2021

Fractal Assessment of Flooded Areas

A. N. Nasonov¹, V. V. Kulnev² ✉, O. N. Nikolaeva³, G. A. Antsiferova⁴,
E. S. Galkina⁴, I. V. Tsvetkov⁵

¹Russian State Agrarian University – Moscow agricultural academy named after K. A. Timiryazev, Russian Federation (49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127550)

²Central Black Earth Interregional Department Federal Service for Supervision of the Use of Natural Resources, Russian Federation. (105, Lomonosov Str., Voronezh, 394087)

³Siberian State University Geosystems and Technologies, Russian Federation (10, Plakhotny Str., Novosibirsk, 630108)

⁴Voronezh State University, Russian Federation (40, Kholzunov Str., Voronezh, 394068)

⁵Tver State University, Russian Federation (33, Zhelyabov Str., Tver, 170100)

Abstract: The purpose of the study is to increase the efficiency of research work aimed at determining the likely level of flood water rise and assessing the risk of flooding of areas.

Materials and methods. Multifractal analysis methods and a special add-on to a geographic information system were used to assess the risk of flooding of territories, allowing the analysis of cartographic materials to obtain new knowledge about the configuration of the river network and the resulting features of the spatial localization of flooding.

Results and discussion. The floodplain flood risk assessment model based on the analysis of fractal development of the river network is presented. The methodology of fractal modelling based on freely distributed geographical information system - QGIS is described in detail. The obtained results are expressed in cartograms of territories at high risk of flooding by the example of the Kaluga region. A list of proposed anti-flooding measures is given.

Conclusions. Application of fractal modelling of hydrological processes in QGIS allows to estimate the level of probable flood water rise in the analysed areas, to selectively assess flood risks and to carry out preventive engineering and reclamation measures on them.

Key words: geo-information modelling, hydrological processes, GIS technologies, flood inundation of areas, river network, steppe distribution, fractal.

For citation: Nasonov A. N., Kulnev V. V., Nikolaeva O. N., Antsiferova G. A., Galkina E. S., Tsvetkov I. V. Fractal Assessment of Flooded Areas. *Vestnik Voronezskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologia*, 2021, no. 4, pp. 13-23. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo.2021.4/3746>

REFERENCES

1. Avakyan A. B., Istomina M. N. Navodneniya kak global'naya problema [Floods as a global problem]. *Strategiya grazhdanskoj zashchity: problemy i issledovaniya*, 2013, no. 1, pp. 180-193. (In Russ.)

2. Alekseevskij N. I., Kosickij A. G., Hristoforov A. V. Fraktal'nye svojstva rechnyh sistem i ih ispol'zovanie v gidrologicheskikh raschetah [Fractal properties of river systems and their use in hydrological calculations]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013. no. 371. pp. 167-170. (In Russ.)

3. Arhipkin O. P., Sagatdinova G. N., Bralinova Zh. A. Analiz mnogoletnih vremennyh ryadov dannyh kosmicheskogo monitoringa pavodkov [Analysis of long-term time series of space flood monitoring data]. *Materialy VII Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Regional'nye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli»*, 2020, pp. 161-164. (In Russ.)

4. Barsukova M. V., Korol' T. S., Lagutina N. V., Nasonov A. N. *Kurs lekcij po ekologicheskoj bezopasnosti v prirodobustrojstve i vodopol'zovanii: uchebno-metodicheskoe posobie* [A course of lectures on environmental safety

© Nasonov A. N., Kulnev V. V., Nikolaeva O. N., Antsiferova G. A., Galkina E. S., Tsvetkov I. V., 2021

✉ Vadim V. Kulnev, e-mail: kulnev@rpn36.ru



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

in environmental management and water use: an educational and methodological guide]. M.: Izd-vo «DPK-Press», 2020. 132 p. (In Russ.)

5. Bedarev A.V., Repina E.M., Kul'nev V.V. Metrologicheskoe obespechenie ekologicheskogo monitoringa vodnyh ob"ektov [Metrological support of environmental monitoring of water bodies]. *Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Aktual'nye problemy gidrogeologicheskikh, inzhenerno-geologicheskikh i geoekologicheskikh issledovanij»*, 2020, pp. 58-67. (In Russ.)

6. Berezovoj V.V., Kul'nev V.V. Ekologicheskaya bezopasnost' grazhdanskogo stroitel'stva [Environmental safety of civil engineering]. *Cbornik materialov «Transgranichnoe sotrudnichestvo v oblasti ekologicheskoy bezopasnosti i ohrany okruzhayu-shchej sredy»*, 2020, pp. 23-30. (In Russ.)

7. Bozhokin S.V., Parshin D.A. *Fraktaly i mul'tifraktaly* [Fractals and multifractals]. Izhevsk: NIC «Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika», 2001. 128 p. (In Russ.)

8. Burakov D.A. O vliyani i spareniya na stok vesnengo polovod'ya v lesnoj zone [On the effect of evaporation on the runoff of the spring flood in the forest zone]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 1968, no. 12, pp. 55-61. (In Russ.)

9. Vladimirov A.M. Faktory formirovaniya ekstremalnogo stoka v malovodnyj sezon [Factors of formation of extreme runoff in the low-water season]. *Uchenye Zapiski RGGMU*, 2008, no. 7, pp. 13-22. (In Russ.)

10. Dokus A.A., Shakirzanova Zh.R. Prognozirovani e oценка gidrologicheskikh riskov v period vesennego polovod'ya [Forecasting and assessment of hydrological risks during the spring flood]. *Sbornik dokladov mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii pamyati vydayushchegosya russkogo gidrologa YUriya Borisovicha Vinogradova «Tret'i Vinogradovskie chteniya. Grani gidrologii»*, 2018, pp. 711-716. (In Russ.)

11. D'yakonova T.A., Pisarev A.V., Hoperskov A.V., Hrapov S.S. Matematicheskaya model' dinamiki poverhnostnyh vod [Mathematical model of surface water dynamics]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1: Matematika. Fizika*, 2014, no. 1, pp. 35-44. (In Russ.)

12. Zhikov V.V. Fraktaly [Fractals]. *Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal*, 1996, no. 12, pp. 109-117. (In Russ.)

13. Zvyaginceva A.V., Kul'nev V.V., Kul'neva V.V. Ekologicheskij monitoring opasnyh gidrologicheskikh yavlenij [Environmental monitoring of dangerous hydrological phenomena]. *Ekologiya i razvitie obshchestva*, 2018, no. 3 (26), pp. 62-66. (In Russ.)

14. Kul'nev V.V., Bazarskij O.V. Kompleksnaya metodika geokologicheskoy ocenki territorii gornodobyvayushchih predpriyatij [Complex methodology of geoecological assessment of the territory of mining enterprises]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki*, 2011, no. 2, pp. 142-147. (In Russ.)

15. Kul'nev V.V., Pochechun V.A. Primenenie al'golizacii pit'evykh vodoemov Nizhnetagil'skogo promyshlennogo uzla [Application of algolization of drinking reservoirs of the Nizhny Tagil industrial hub]. *Medicina truda i promyshlennaya ekologiya*, 2016, no. 1, pp. 20-21. (In Russ.)

16. Kulygin V.V. Sovmestnoe ispol'zovanie bajesovskikh setej i GIS dlya ocenki riskov shtormovyh nagonov v del'te r. Don [Joint use of Bayesian networks and GIS to

assess the risks of storm surges in the delta. Don]. *Vestnik SGUGiT*, 2018, vol. 23, №2, pp. 92-107. (In Russ.)

17. Nasonov A.N., Kul'nev V.V., Cvetkov I.V., Nasonov S.N. O primenenii fraktal'nyh metodov v distanционном monitoringe ochagov opustynivaniya v yuzhnom Priaral'e [On the application of fractal methods in remote monitoring of desertification foci in the southern Aral Sea region]. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya, posvyashchennaya pamyati pervogo Prezidenta Mezhdunarodnoj akademii nauk ekologii, bezopasnosti cheloveka i prirody Zasluzhennogo ekologa Rossijskoj Federacii, doktora tekhnicheskikh nauk, professora Viktora Antonovicha Rogaleva «Ekologiya i razvitie obshchestva»*, 2019, pp. 25-30. (In Russ.)

18. Nasonov A.N., Cvetkov I.V., Zhogin I.M., Kul'nev V.V., Repina E.M., Kirnosov S.L., Zvyaginceva A.V., Bazarskij O.V. *Fraktaly v naukah o Zemle: uchebnoe posobie* [Fractals in Earth Sciences: a textbook]. Voronezh: Izd-vo «Kovcheg», 2018. 82 p. (In Russ.)

19. Nepoklonov V.B., Habarov D.A., Habarova I.A. Primenenie geoinformacionnyh tekhnologij pri issledovanii izmenenij struktury zemlepol'zovaniya territorij po materialam mnogoazonal'noj kosmicheskoy s'emki [Application of geoinformation technologies in the study of changes in the structure of land use of territories based on the materials of multi-zonesatellite imagery]. *Vestnik SGUGiT*, 2020, vol. 25, v. 2, pp. 151-159. (In Russ.)

20. Polunin A.Ya. O modelirovanii processa postupleniya vody na vodosbor dlya kratkosrochnnyh prognozov stoka [On modeling the process of water supply to the catchment area for short-term runoff forecasts]. *Trudy Gidrometcentra*, 1988, v. 295, pp. 69-79. (In Russ.)

21. Pochechun V.A., Kul'nev V.V. Geosistemnoe rajonirovani e kak osnova dlya reabilitacionnyh meropriyatij okruzhayushchej sredy gorno-metallurgicheskogo kompleksa (na primere metallurgicheskogo kombinata) [Geosystem zoning as a basis for environmental rehabilitation measures of the mining and metallurgical complex (on the example of a metallurgical combine)]. *Medicina truda i promyshlennaya ekologiya*, 2016, no. 10, pp. 36-39. (In Russ.)

22. Sagova Z.M., Mezhova L.A., Kul'nev V.V., Lugovskoj A.M. Prichiny geokologicheskikh konfliktov prirodopol'zovaniya v mezhdunarodnyh rechnykh bassejnakh i puti ih uregulirovaniya [Causes of geo-ecological conflicts of nature management in international river basins and ways of their settlement]. *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennye i tochnye nauki*, 2018, vol. 12, no. 3, pp. 114-121. (In Russ.)

23. Smetanin V.I., Nasonov A.N., Zhogin I.M., Cvetkov I.V. Opredelenie territorial'nyh zon vozvedeniya zashchitnyh protivopavodkovykh damb s ispol'zovaniem fraktal'nogo analiza rechnoj sistemy [Determination of territorial zones for the construction of protective flood dams using fractal analysis of the river system]. Determination of territorial zones for the construction of protective flood dams using fractal analysis of the river system]. *Prirodoobustrojstvo*, 2013, no. 5, pp. 54-59. (In Russ.)

24. Hmelev V.A., Turbinskij V.V., Samshorina A.A., Suvorova A.V., Kolosnicyna V.V., CHEchek I. Geoinfor-

macionnye tekhnologii v sanitarno-gigienicheskoj ocenke posledstvij navodnenij v naselennyh punktah (na primere bassejna reki Obi Altajskogo kraya v 2014-2015 gg. [Geoinformation technologies in the sanitary and hygienic assessment of the consequences of floods in settlements (on the example of the Ob River basin of the Altai Territory in 2014-2015)]. *Vestnik SGUGiT*, 2015, no. 4 (32), pp. 153-168. (In Russ.)

25. Yakovchenko S. G., Postnova I. S., Zhorov V. A., Lovckaya O. V. Opyt ispol'zovaniya GIS dlya ocenki zon zatopleniya, GIS dlya ustojchivogo razvitiya territorij [Experience in using GIS to assess flood zones, GIS for sustainable development of territories]. *Materialy mezhdunarodnoj konferencii. Vladivostok-CHanchun'*, 2004, pp. 574-577. (In Russ.)

Насонов Андрей Николаевич
доцент кафедры организации и технологии строительства объектов природообустройства Института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева», кандидат технических наук, г. Москва, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-4927-2192, e-mail: adn22@yandex.ru

Кульнев Вадим Вячеславович
ведущий специалист-эксперт отдела государственного экологического надзора по Воронежской области Центрально-Черноземного межрегионального управления Федеральной службы по надзору в сфере природопользования, кандидат географических наук, г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-1646-9183, e-mail: kulnev@rpn36.ru

Николаева Ольга Николаевна
профессор кафедры экологии и природопользования ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», доктор технических наук, г. Новосибирск, Российская Федерация, ORCID: 0000-0001-5871-6966, e-mail: onixx76@mail.ru

Анциферова Галина Аркадьевна
доктор географических наук, профессор кафедры природопользования факультета географии, геоэкологии и туризма Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-0040-6564, e-mail: g_antsiferova@mail.ru

Галкина Екатерина Станиславовна
аспирант кафедры природопользования факультета географии, геоэкологии и туризма ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-9384-4020, e-mail: korotkova.es@gmail.com

Цветков Илья Викторович
профессор кафедры экономики предприятия и менеджмента Института экономики и управления ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», доктор технических наук, г. Тверь, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-5284-880X, e-mail: mancu@mail.ru

26. 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 [Electronic recourse]. *Journal of Hydrology*, 2021, vol. 592.

27. Badana Ntanganedzeni, Joel Nobert. Flood risk assessment in Luvuvhu river, Limpopo province, South Africa [Electronic recourse]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102959>.

Conflict of interests: The authors declare no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 21.04.2021

Accepted: 23.11.2021

Andrey N. Nasonov
Associate Professor of the Department of Organization and Technology of Environmental Facilities Construction, A.N. Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction, Russian State Agrarian University – K.A. Timiryazev Moscow Agricultural Academy, Cand. Sc. (Tech.), Moscow, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-4927-2192, e-mail: adn22@yandex.ru

Vadim V. Kulnev
Leading specialist-expert of the Voronezh Region State Environmental Supervision Department of the Central Black Earth Interregional Directorate of the Federal Service for Supervision of Natural Resources, Cand. Sci. (Geogr), Voronezh, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-1646-9183, e-mail: kulnev@rpn36.ru

Olga N. Nikolaeva
Professor of the Department of Ecology and Nature Management, Siberian State University Geosystems and Technologies, Dr. Sc. (Tech.), Novosibirsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-5871-6966, e-mail: onixx76@mail.ru

Galina A. Antsiferova
Dr. Sci. (Geogr.), Professor of the Department of nature management, Faculty of Geography, Geoecology and Tourism, Voronezh State University, Voronezh, Russia Federation, ORCID: 0000-0003-0040-6564, e-mail: g_antsiferova@mail.ru

Ekaterina S. Galkina
Postgraduate student of the Department of Nature Management, Faculty of Geography, Geoecology and Tourism, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-9384-4020, e-mail: korotkova.es@gmail.com,

Ilya V. Tsvetkov
Professor of the Department of Enterprise Economics and Management, Institute of Economics and Management, Tver State University, Dr. Sc. (Tech.), Tver, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-5284-880X, e-mail: mancu@mail.ru