

Фрактальный анализ и обработка данных дистанционного зондирования: от парадигмы к практике

В. Е. Архинчеев

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ)

Аннотация: Настоящая работа представляет собой обзор современного состояния и перспектив применения фрактального анализа в задачах обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Рассматривается эволюция научной парадигмы – переход от представлений о гладких, дифференцируемых функциях к фрактальной парадигме, описывающей сложные природные формы. Подробно анализируются теоретические основы фрактального подхода, включая концепции фрактальной размерности, самоподобия и аномальных стохастических процессов. Особое внимание уделяется методологии вычисления фрактальной размерности природных объектов по данным ДЗЗ: методу вариограмм, алгоритму Box Counting и триангуляционным методам. Рассматриваются прикладные аспекты применения фрактального анализа для классификации земных покровов, включая поляриметрические радиолокационные данные и мультиспектральные оптические изображения. Анализируется связь фрактальных характеристик с таксационными параметрами лесных массивов и структурными особенностями подстилающей поверхности. Обсуждаются перспективы развития направления, включая мультифрактальный анализ и учет искажающих факторов при съемке.

Ключевые слова: фрактальный анализ, дистанционное зондирование Земли, фрактальная размерность, метод вариограмм, классификация земных покровов, поляриметрические данные, аномальная диффузия, самоподобие.

Для цитирования: Архинчеев В. Е. Фрактальный анализ и обработка данных дистанционного зондирования: от парадигмы к практике // Вестник СибГУТИ. 2026. Т. 20, № 1. С. 71–80. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2026-20-1-71-80>.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Архинчеев В. Е., 2026

Статья поступила в редакцию 25.02.2026;
переработанный вариант – 05.03.2026;
принята к публикации 11.03.2026.

1. Введение: переход от парадигмы непрерывных гладких функций к фрактальной парадигме

В течение продолжительного периода времени основной парадигмой математической и теоретической физики была система представлений, основанная на непрерывном и гладком поведении физических параметров и возможности их описания в линейном приближении. Как следствие, доминировало использование линейных дифференциальных уравнений целого порядка для описания физических явлений. Классическим примером является описание механического движения посредством второго закона Ньютона [1, 2] электромагнитного поля посредством системы уравнений Максвелла [3, 4]. В основе квантовой механики также заложены представления о гладком поведении квадрата волновой функции как плотности вероятности [5, 6]. Однако в окружающем мире существует множество примеров негладкого, разрывного поведения. Более того, эти ситуации являются скорее типичными, нежели ис-

ключительными. В математике такие объекты известны давно: функции Вейерштрасса – непрерывные, но не имеющие производных; кривые Пеано, плотно заполняющие пространство; ковры Серпинского и канторовы множества [7–10]. Исследования Банаха [11] показали, что всюду недифференцируемых функций «много больше» – мера множества гладких функций равна нулю.

Термин «фрактал» (от лат. «fractus» – дробленный, сломанный) был введен Бенуа Мандельбротом в 1970-х годах при исследовании нелинейных отображений, порождающих хаотическое поведение [12]. Полученные объекты оказывались самоподобными на всех масштабах и имели сложную, но регулярную структуру.

Классическим физическим примером, с которого началось проникновение фрактальных представлений в науку, стала задача об определении длины береговой линии Британии, рассмотренная Ричардсоном [13]. Было обнаружено, что с уменьшением масштаба измерения длина береговой линии возрастает, подчиняясь степенному закону:

$$L(\varepsilon) = L_0 \varepsilon^{1-D_f},$$

где

$$L_0 = \exp(C), \quad (1)$$

где $L(\varepsilon)$ – измеренная длина при масштабе ε , D_f – фрактальная размерность. Это означало, что для природных объектов само понятие «длина» теряет смысл без указания масштаба измерений.

2. Теоретические основы фрактального анализа изображений

2.1. Фрактальная размерность как мера сложности

Фрактальная размерность является центральной конструкцией фрактальной геометрии, описывающей геометрическую сложность природных явлений и форм. Для математических объектов она рассчитывается на бесконечных масштабах, однако для физических объектов может быть оценена лишь на конечном интервале масштабов. В контексте анализа изображений фрактальная размерность позволяет количественно охарактеризовать текстурные свойства и степень неоднородности поверхности. Значения размерности лежат в следующих диапазонах:

- $1 < D < 2$: для кривых линий (периметры, границы);
- $2 < D < 3$: для поверхностей (рельеф, яркостные изображения).

2.2. Методы вычисления фрактальной размерности

Все методы вычисления фрактальной размерности могут быть разделены на два семейства.

1. Методы, основанные на рекурсивном измерении длины или площади:

Метод Box Counting – наиболее распространенный, основан на подсчете количества ячеек сетки, покрывающих изображение, при различном масштабе ячеек [17, 18]. Фрактальная размерность определяется из соотношения $N(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-D_f}$, где $N(\varepsilon)$ – число ячеек размером ε , содержащих элементы изображения.

Метод триангуляции (Triangular Prism Method) – трехмерная версия метода «шагающего циркуля» [19, 20].

Метод призм и метод подсчета кубов используются в оптико-электронной спутниковой съемке.

2. Методы, основанные на статистических свойствах:

Метод вариограмм основан на аппроксимации поверхности случайным стохастическим процессом – фрактальным броуновским движением [21, 22]. Статистическое соотношение между расстоянием между пикселями и дисперсией их яркостей имеет вид:

$$\lg([g(x+\varepsilon) - g(x)]) = 2H \lg(\varepsilon) + \lg C \quad (2)$$

Фрактальная размерность вычисляется по тангенсу угла наклона линии регрессии.

Метод спектрального анализа – анализ частотной зависимости мощности сигнала.

Необходимо отметить, что большинство алгоритмов вычисления фрактальной размерности получено эмпирическим путем и может давать различные результаты для одинаковых изображений.

2.3. Модель фрактального броуновского движения

Для описания природных поверхностей широко используется модель фрактального броуновского движения (FBM – Fractional Brownian Motion) [14–16]. В этой модели предполагается, что изображение может быть аппроксимировано случайным стохастическим процессом, для которого среднеквадратичное смещение (дисперсия) связано с масштабом степенным образом:

$$\langle [X(t) - X(0)]^2 \rangle \propto t^{2H} \quad (3)$$

где H – показатель Херста (критический индекс аномальной диффузии), связанный с фрактальной размерностью соотношением:

$$D_f = 3 - H = 3 - B/2. \quad (4)$$

3. Применение фрактального анализа в дистанционном зондировании

3.1. Текстуальный анализ и классификация изображений

Одно из основных применений фрактального анализа в ДЗЗ – текстуальный анализ и классификация изображений [24–26]. Традиционные методы классификации, основанные только на спектральных признаках (например, метод максимального правдоподобия), часто дают недостаточно точные результаты. Комбинация спектральных признаков с текстурными характеристиками, описываемыми фрактальной размерностью, позволяет существенно повысить точность классификации.

Исследования на данных высокого пространственного разрешения (WorldView-2) показывают, что значения фрактальной размерности закономерно различаются для разных типов земного покрова:

- 1) водные поверхности – наименьшие значения (близки к монофрактальным);
- 2) сельскохозяйственные поля – промежуточные значения;
- 3) лесные массивы – высокие значения;
- 4) городские территории – наибольшие значения (наивысший уровень изрезанности, мультифрактальности).

3.2. Фрактальный анализ поляриметрических радиолокационных данных

Особый интерес представляет применение фрактального подхода к поляриметрическим радиолокационным данным. Исследования, проведенные по данным SIR-C (радар с синтезированной апертурой, L- и C-диапазоны, различные поляризации), демонстрируют высокую эффективность фрактального анализа для классификации природных сообществ [23–27].

Алгоритм построения фрактального изображения:

1. На исходном изображении выделяется скользящее окно (например, 25×25 пикселей).
2. Для всех пар пикселей вычисляются расстояния и дисперсии яркостей.
3. Строится зависимость логарифма дисперсии от логарифма расстояния.
4. По углу наклона регрессионной прямой вычисляется фрактальная размерность.
5. Полученное значение пересчитывается в яркость пикселя нового (фрактального) изображения.

Количественная оценка качества классификации может быть выполнена с использованием показателя разнесенности кластеров:

$$S = \frac{1}{n-1} \sum_i^{n-1} \frac{d_{i,i+1}}{\delta_i + \delta_{i+1}},$$

где n – число кластеров, δ_i – среднеквадратические отклонения от центров кластеров, $d_{i,i+1}$ – расстояние между центрами соседних кластеров.

3.3. Классификация лесных массивов по полноте древостоя

Фрактальный анализ позволяет не только разделять лесные и безлесные участки, но и проводить более тонкую классификацию внутри лесных массивов. Исследования показывают, что фрактальная размерность лесных сообществ коррелирует с таксационным параметром – полнотой древостоя.

Данные, полученные по поляриметрическим радиолокационным изображениям, демонстрируют следующую картину:

L-диапазон:

- леса с полнотой $> 0.7-0.8$: размерность 2.74–2.76;
- леса с полнотой $< 0.7-0.8$: размерность, более близкая к 3.

C-диапазон:

- ровные однородные участки: размерность близка к 2;
- неоднородные шероховатые участки: размерность ~ 2.63 ;
- лесные массивы с полнотой $> 0.7-0.8$: 2.78–2.91 (более низкие значения);
- лесные массивы с полнотой $< 0.7-0.8$: более высокие значения.

Интересно, что лес с высокой плотностью древостоя характеризуется более низкой фрактальной размерностью, поскольку он более однороден и создает практически сплошной покров.

3.4. Поляризационные и частотные зависимости

Важной особенностью фрактального подхода является возможность анализа структуры природных объектов по различию фрактальных размерностей на разных поляризациях. Например, для участков с луговой растительностью и кустарником наблюдаются следующие закономерности:

1. На HH-поляризации: размерность близка к размерности ровных участков (~ 2.3).
2. На HV- и VV-поляризациях: размерность существенно выше (2.62–2.64), приближается к значениям объемных неоднородностей.

Это свидетельствует о том, что неоднородности имеют преимущественно вертикальную структуру (стебли растений), горизонтальные размеры которых существенно меньше вертикальных. Частотная зависимость также играет существенную роль. Размер неоднородностей, влияющих на обратное рассеяние, как правило, соизмерим с длиной волны. Поэтому для 3-сантиметрового радара значимыми являются мелкие шероховатости полей, тогда как для L-диапазона (длина волны 24 см) такие шероховатости не вносят существенного вклада в рассеяние.

3.5. Оценка информативности многоспектральных изображений

Фрактальный анализ применяется также для оценки информативности цифровых многоспектральных изображений [28–30]. Традиционная яркостная энтропия Шеннона не всегда позволяет адекватно оценить информативность, особенно при наличии шумов.

Проблема в том, что максимальная энтропия достигается для случайного сигнала (шума), что противоречит интуитивному пониманию полезной информации. Использование

морфологического и фрактального анализа позволяет оценивать не только яркость, но и форму объектов на изображениях.

4. Мультифрактальный подход

В последние годы все большее распространение получает мультифрактальный анализ. Мультифрактальный формализм исходит из предположения, что единичное изображение состоит из множества фракталов с различной размерностью. Это позволяет проводить детальную локальную и глобальную характеристику изображений.

Мультифрактальный подход особенно эффективен для анализа гетерогенных структур, типичных для спутниковых изображений. Исследования показывают, что обобщенные размерности, вычисленные для фрагментов изображений с разными типами земного покрова, существенно различаются, что позволяет проводить автоматическую классификацию.

5. Проблемы и ограничения фрактального подхода, перспективы развития

5.1. Чувствительность к искажающим факторам

Качество фрактального анализа существенно зависит от качества исходных изображений. Исследования влияния искажающих факторов (расфокусировка, шум) на применимость фрактальных преобразований показывают:

1. Существует зависимость качества получаемой фрактальной размерности от степени искажения исходного изображения.
2. Различные методы фрактального анализа обладают разной чувствительностью к искажениям.

5.2. Методологические проблемы

Сравнительные исследования различных методов вычисления фрактальной размерности показывают:

1. Производительность алгоритмов существенно варьируется.
2. Некоторые методы могут давать систематически ошибочные значения.
3. Выбор метода должен определяться спецификой решаемой задачи и характеристиками изображения.

5.3. Перспективы развития

Интеграция с методами машинного обучения.

Перспективным направлением является комбинирование фрактального анализа с нейросетевыми методами. Фрактальные признаки могут использоваться как дополнительный вход для нейронных сетей, повышая точность классификации.

5.4. Связь фрактального анализа с аномальной диффузией

Интересные перспективы открывает связь фрактального анализа с теорией аномальной диффузии [27]. Исследования показывают, что диффузионное поведение атмосферных загрязнителей в различных географических морфологиях может быть описано в рамках фрактальных представлений.

5.5. Трехмерный анализ

Развитие методов трехмерного фрактального анализа открывает новые возможности для исследования рельефа и объемных структур природных объектов. Метод вариограмм и триангуляционные методы могут быть расширены на трехмерный случай.

6. Заключение

Фрактальный анализ стал не просто математическим инструментом, но новой парадигмой описания природных объектов и процессов. В области дистанционного зондирования Земли он позволяет:

- 1) количественно характеризовать текстурные свойства изображений;
- 2) проводить классификацию природных сообществ по степени неоднородности;
- 3) оценивать таксационные параметры лесных массивов (полноту древостоя);
- 4) анализировать структуру рассеивающих объектов на основе поляризационных зависимостей;
- 5) оценивать информативность многоспектральных данных с учетом структурных особенностей.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием мультифрактального подхода, интеграцией с методами машинного обучения, учетом искажающих факторов и расширением на трехмерный анализ.

Литература

1. *Ньютон И.* Математические начала натуральной философии / пер. с лат. и коммент. А. Н. Крылова; под ред. Л. С. Полака. М.: Наука, 1989. 687 с.
2. *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. М.: Мир, 1982. Т. 1. 337 с.
3. *Maxwell J. C.* A Treatise on Electricity and Magnetism. Oxford: Clarendon Press, 1873. Vol. 1. 425 p.; Vol. 2. 444 p.
4. *Арешкин А. Г., Федоров Д. Л., Комарова О. С.* [и др.]. Уравнения Максвелла. СПб.: Изд-во БГТУ «Военмех», 2024. 98 с.
5. *Фок В. А.* Начала квантовой механики. Л.: Кубуч, 1932. 364 с.
6. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Квантовая механика (нерелятивистская теория). 4-е изд., испр. М.: Наука, 1989. 767 с.
7. *Weierstrass K.* Mathematische Werke. Berlin: Mayer & Müller, 1895. Bd. 2. 352 S.
8. *Peano G.* Sur une courbe, qui remplit toute une aire plane // *Mathematische Annalen*. 1890. Vol. 36, № 1. P. 157–160.
9. *Sierpinski W.* Sur une courbe dont tout point est un point de ramification // *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*. 1915. Т. 160. P. 302–305.
10. *Cantor G.* On a Property of the Class of all Real Algebraic Numbers // *Crelle's Journal for Mathematics*. 1874. Vol. 77. P. 258–262.
11. *Banach S., Steinhaus H.* Sur le principe de la condensation de singularités // *Fundamenta Mathematicae*. 1927. Vol. 9. P. 50–61.
12. *Mandelbrot B.* How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension // *Science*. 1967. Vol. 156, № 3775. P. 636–638.
13. *Richardson L. F.* The problem of contiguity: an appendix to statistics of deadly quarrels // *General System Yearbook*. 1961. Vol. 6. P. 139–187.
14. *Mandelbrot B. B., Van Ness J. W.* Fractional Brownian Motions, Fractional Noises and Applications // *SIAM Review*. 1968. Vol. 10, № 4. P. 422–437.

15. *Wawrzaszek A., Krupinski M., Drzewiecki W., Aleksandrowicz S.* Multifractal analysis of very high resolution satellite images // 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Melbourne, 21–26 July 2013. P. 1254–1257.
16. *Qin Q., Lu R.* Satellite Image Classification Based on Fractal Dimension and Neural Networks // Journal of Peking University (Natural Science). 2000. Vol. 36, № 6. P. 858–863.
17. *Ling F. H., Schmidt G.* Box-counting algorithm and dimensional analysis of a pulsar // Journal of Computational Physics. 1992. Vol. 99, № 2. P. 196–202.
18. *Malleswar S. D., Isoda Y., Nakaya T.* Box Height-Independent Differential Bar Cumulation (DBC) for 3D Raster Surface Fractal Dimension Analysis // Journal of Geovisualization and Spatial Analysis. 2025. Vol. 9, № 1. P. 1–18.
19. *De Santis A., Fedi M., Quarta T.* A revisit of the triangular prism surface area method for estimating the fractal dimension of fractal surfaces // Annali di Geofisica. 1997. Vol. 40, № 4. P. 811–821.
20. *Ju W., Lam N. S. N.* An improved algorithm for computing local fractal dimension using the triangular prism method // Computers & Geosciences. 2009. Vol. 35, № 6. P. 1224–1233.
21. *Демьянов В. В., Каневский М. Ф., Савельева Е. А., Чернов С. Ю.* Вариография: исследование и моделирование пространственных корреляционных структур // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 1999. № 11. С. 33–54.
22. *Oliver M. A., Webster R.* Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging. Cham: Springer, 2015. 100 p.
23. *Чимитдоржиев Т. Н., Архинчеев В. Е., Дмитриев А. В.* Поляриметрическая оценка пространственных флуктуаций радиолокационной фазы для классификации земных покровов // Исследование Земли из космоса. 2008. № 1. С. 24–30.
24. *Чимитдоржиев Т. Н., Архинчеев В. Е., Дмитриев А. В., Цыдыпов Б. З.* Фрактальный анализ поляриметрических радиолокационных данных // Исследование Земли из космоса. 2007. № 4. С. 27–33.
25. *Чимитдоржиев Т. Н., Архинчеев В. Е., Дмитриев А. В.* Поляриметрическая оценка пространственных флуктуаций радарных изображений для восстановления лесного полога // Исследование Земли из космоса. 2007. № 5. С. 80–82.
26. *Никитин О. Р., Кисляков А. Н.* Анализ информационного содержания цифровых многоспектральных изображений земной поверхности // Электромагнитные волны и электронные системы. 2015. Т. 20, № 10. С. 61–68.
27. *Архинчеев В. Е.* Введение в теорию стохастических процессов. Улан-Удэ: Изд-во БГУ, 2025. 167 с.
28. *Sun W., Xu G., Gong P., Liang S.* Fractal analysis of remotely sensed images: A review of methods and applications // International Journal of Remote Sensing. 2006. Vol. 27, № 22. P. 4963–4990.
29. *Ramstein G., Raffy M.* Analysis of the structure of radiometric remotely-sensed images // International Journal of Remote Sensing. 1989. Vol. 10, № 6. P. 1049–1073.
30. *Андрусенко А. С., Григорьев А. Н., Зуев Л. Г.* Оценки влияния факторов функционирования оптико-электронной системы спутникового мониторинга на применимость фрактальных преобразований для анализа искаженных изображений местности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 3. С. 9–21.
31. *Pacheco P. [et al.].* Urban Meteorology, Pollutants, Geomorphology, Fractality, and Anomalous Diffusion // Fractal and Fractional. 2024. Vol. 8, № 4. 204.

Архинчев Валерий Ефимович

доктор физико-математических наук, Бурятский институт инфокоммуникаций
СибГУТИ (670031 , Россия, Улан-Удэ, ул Трубочеева 152), e-mail: varkhin@mail.ru .

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

Fractal Analysis and Remote Sensing Data Processing: From Paradigm to Practice

Valery E. Arkhincheev

Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS)

Abstract: This paper provides an overview of the current state and prospects for applying fractal analysis to Earth remote sensing (ERS) data processing. It examines the evolution of the scientific paradigm—the transition from the concept of smooth, differentiable functions to a fractal paradigm that describes complex natural forms. The theoretical foundations of the fractal approach are analyzed in detail, including the concepts of fractal dimension, self-similarity, and anomalous stochastic processes. Particular attention is paid to the methodology for calculating the fractal dimension of natural objects using ERS data: the variogram method, the Box Counting algorithm, and triangulation methods. Applied aspects of fractal analysis for land cover classification, including polarimetric radar data and multispectral optical imagery, are also considered. The relationship between fractal characteristics, forest inventory parameters, and underlying surface structural features is analyzed. Further development prospects are discussed, including multifractal analysis and consideration of distorting factors during surveying.

Keywords: fractal analysis, Earth remote sensing, fractal dimension, variogram method, land cover classification, polarimetric data, anomalous diffusion, self-similarity.

For citation: Arkhincheev V. E. Fractal Analysis and Remote Sensing Data Processing: From Paradigm to Practice. [Paper Preparation Manual for Vestnik SibGUTI]. *Vestnik SibGUTI*, 2026, vol. 20, no. 1, pp. 71-80. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2026-20-1-71-80>.



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Arkhincheev V. E., 2026

The article was submitted: 25.02.2026;
revised version: 05.03.2026;
accepted for publication 11.03.2026.

References

1. Newton I. Matematicheskie nachala natural'noi filosofii [Mathematical Principles of Natural Philosophy]. Moscow, *Nauka*, 1989. 687 p.
2. Feiman R., Leiton R., Sands M. Feimanovskie lektzii po fizike [The Feynman Lectures on Physics]. Moscow, *Mir*, 1982. Vol. 1. 337 p.
3. Maxwell J. C. A Treatise on Electricity and Magnetism. Oxford, *Clarendon Press*, 1873. Vol. 1. 425 p.; Vol. 2. 444 p.
4. Areshkin A. G., Fedorov D. L., Komarova O. S., et al. Uravneniya Maksvella [Maxwell's Equations]. Saint Petersburg, Izdatel'stvo BGTU "Voenmekh", 2024. 98 p.
5. Fok V. A. Nachala kvantovoi mekhaniki [Fundamentals of Quantum Mechanics]. Leningrad, Kubuch, 1932. 364 p.

6. Landau L. D., Lifshits E. M. *Kvantovaya mekhanika (nerelyativistskaya teoriya)* [Quantum Mechanics (Non-Relativistic Theory)]. 4th ed. Moscow, *Nauka*, 1989. 767 p.
7. Weierstrass K. *Mathematische Werke*. Berlin, Mayer & Müller, 1895. Bd. 2. 352 S.
8. Peano G. Sur une courbe, qui remplit toute une aire plane. *Mathematische Annalen*, 1890, vol. 36, no. 1, pp. 157-160.
9. Sierpinski W. Sur une courbe dont tout point est un point de ramification. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, 1915, t. 160, pp. 302-305.
10. Cantor G. On a Property of the Class of all Real Algebraic Numbers. *Crelle's Journal for Mathematics*, 1874, vol. 77, pp. 258-262.
11. Banach S., Steinhaus H. Sur le principe de la condensation de singularités. *Fundamenta Mathematicae*, 1927, vol. 9, pp. 50-61.
12. Mandelbrot B. How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension. *Science*, 1967, vol. 156, no. 3775, pp. 636-638.
13. Richardson L. F. The problem of contiguity: an appendix to statistics of deadly quarrels. *General System Yearbook*, 1961, vol. 6, pp. 139-187.
14. Mandelbrot B. B., Van Ness J. W. Fractional Brownian Motions, Fractional Noises and Applications. *SIAM Review*, 1968, vol. 10, no. 4, pp. 422-437.
15. Wawrzaszek A., Krupinski M., Drzewiecki W., Aleksandrowicz S. Multifractal analysis of very high resolution satellite images. 2013 *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Melbourne, 21-26 July 2013, pp. 1254-1257.
16. Qin Q., Lu R. Satellite Image Classification Based on Fractal Dimension and Neural Networks. *Journal of Peking University (Natural Science)*, 2000, vol. 36, no. 6, pp. 858-863.
17. Ling F. H., Schmidt G. Box-counting algorithm and dimensional analysis of a pulsar. *Journal of Computational Physics*, 1992, vol. 99, no. 2, pp. 196-202.
18. Malleswar S. D., Isoda Y., Nakaya T. Box Height-Independent Differential Bar Cumulation (DBC) for 3D Raster Surface Fractal Dimension Analysis. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 2025, vol. 9, no. 1, pp. 1-18.
19. De Santis A., Fedi M., Quarta T. A revisit of the triangular prism surface area method for estimating the fractal dimension of fractal surfaces. *Annali di Geofisica*, 1997, vol. 40, no. 4, pp. 811-821.
20. Ju W., Lam N. S. N. An improved algorithm for computing local fractal dimension using the triangular prism method. *Computers & Geosciences*, 2009, vol. 35, no. 6, pp. 1224-1233.
21. Dem'yanov V. V., Kanevskii M. F., Savel'eva E. A., Chernov S. Yu. Variografiya: issledovanie i modelirovanie prostranstvennykh korrelyatsionnykh struktur [Variography: Study and Modeling of Spatial Correlation Structures]. *Problemy okruzhayushchei sredy i prirodnnykh resursov*, 1999, no. 11, pp. 33-54.
22. Oliver M. A., Webster R. *Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging*. Cham, Springer, 2015. 100 p.
23. Chimitdorzhiev T. N., Arkhincheev V. E., Dmitriev A. V. Polyarimetriceskaya otsenka prostranstvennykh fluktuatsii radiolokatsionnoi fazy dlya klassifikatsii zemnykh pokrovov [Polarimetric Assessment of Spatial Fluctuations of the Radar Phase for Land Cover Classification]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2008, no. 1, pp. 24-30.
24. Chimitdorzhiev T. N., Arkhincheev V. E., Dmitriev A. V., Tsydyrov B. Z. Fraktal'nyi analiz polyarimetriceskikh radiolokatsionnykh dannykh [Fractal Analysis of Polarimetric Radar Data]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2007, no. 4, pp. 27-33.
25. Chimitdorzhiev T. N., Arkhincheev V. E., Dmitriev A. V. Polyarimetriceskaya otsenka prostranstvennykh fluktuatsii radarnykh izobrazhenii dlya vosstanovleniya lesnogo pologa [Polarimetric Assessment of Spatial Fluctuations of Radar Images for Forest Canopy Reconstruction]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2007, no. 5, pp. 80-82.
26. Nikitin O. R., Kislyakov A. N. Analiz informatsionnogo sodержaniya tsifrovnykh mnogospetral'nykh izobrazhenii zemnoi poverkhnosti [Analysis of the Information Content of Digital Multispectral Images of the Earth's Surface]. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*, 2015, vol. 20, no. 10, pp. 61-68.
27. Arkhincheev V. E. *Vvedenie v teoriyu stokhasticheskikh protsessov* [Introduction to the Theory of Stochastic Processes]. Ulan-Ude, *Izdatel'stvo BGU*, 2025. 167 p.
28. Sun W., Xu G., Gong P., Liang S. Fractal analysis of remotely sensed images: A review of methods and applications. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, vol. 27, no. 22, pp. 4963-4990.

29. Ramstein G., Raffy M. Analysis of the structure of radiometric remotely-sensed images. *International Journal of Remote Sensing*, 1989, vol. 10, no. 6, pp. 1049-1073.
30. Andrusenko A. S., Grigor'ev A. N., Zuev L. G. Otsenki vliyaniya faktorov funktsionirovaniya optiko-elektronnoi sistemy sputnikovogo monitoringa na primenimost' fraktal'nykh preobrazovaniy dlya analiza iskazhennykh izobrazhenii mestnosti [Assessments of the Influence of Operational Factors of an Optoelectronic Satellite Monitoring System on the Applicability of Fractal Transformations for the Analysis of Distorted Terrain Images]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 9-21.
31. Pacheco P., et al. Urban Meteorology, Pollutants, Geomorphology, Fractality, and Anomalous Diffusion. *Fractal and Fractional*, 2024, vol. 8, no. 4, 204.

Arkhinchev Valery Efimovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Buryat Institute of Infocommunications SibSUTIS (670031, Russia, Ulan-Ude, Trubacheeva St. 152), e-mail: varkhin@mail.ru.