

МЕТОД СЕГМЕНТАЦИИ СТРУКТУРЫ УРАГАНА (ТАЙФУНА) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

Пащенко Р. Э., Шульженко А. В.

*Национальный аэрокосмический университет
им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»,
Харьков, Украина, r.paschenko@i.ua, tamblgriz@gmail.com*

В настоящее время данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) используются при решении задач землепользования, картографии, геологии, экологического мониторинга, а также непрерывного наблюдения крупномасштабных атмосферных процессов [1]. Метеорологические и геодезические спутники используются для наблюдения за изменением облачности и развитием тропических циклонов, в том числе таких, как ураганы и тайфуны. Ураганы и тайфуны являются неотъемлемой частью общей циркуляции атмосферы и являются мощным и опасным природным явлением.

Термин «тропический» означает как географический район, где в подавляющем большинстве случаев возникают подобные циклоны, т. е. тропические широты, так и формирование этих циклонов в тропических воздушных массах. В зависимости от силы и района, где существует циклон, тропические циклоны получают названия «ураганов» – на Американских континентах и в Европе, «тайфунов» – в странах Азии [2]. В Северном полушарии из-за вращения Земли ураганы движутся к западу, от Африки в направлении США. В то же время, зона активного действия тайфунов расположена в районе побережья восточной части Азии, экватора на юге и линии смены даты на востоке.

В развитии любого тропического циклона прослеживаются четыре стадии [3]:

стадия формирования – неустойчивая погода, шквалистые ветры различных направлений. Намечается центр циклона. Сила ветра вблизи него (50–100 морских миль) не превышает 7 баллов;

молодой циклон – дальнейшее падение давления, образование вокруг центра циклона пояса ураганных ветров. Формирование в центре циклона ясной погоды со слабыми ветрами или штилем – «глаза» урагана;

зрелый ураган – прекращение падения давления и усиления ветра. Площадь, занятая ураганом, увеличивается до максимума, нарушается симметрия урагана. Плохая погода в правой его половине наблюдается на большей площади, чем в левой;

разрушение урагана – наступает, как правило, после поворота урагана через полярный курс к востоку. Интенсивность урагана ослабевает, «глаз» исчезает и ураган принимает черты обычного нетропического (фронтального) циклона. Точно так же тропические ураганы затухают и при переходе на сушу, когда прекращается приток влаги и увеличивается трение воздуха о подстилающую поверхность.

Исследование стадий развития циклона с использованием космических снимков позволило выделить еще один этап его развития, который получил название «след циклона». Наличие следа циклона указывает, что в центральной части прежнего циклона, невзирая на выравнивание полей давления и ветра, значения влажности и температуры еще продолжают значительно различаться от окружающих значений [4].

В структуре тропического циклона выделяют три концентрические части [5]:

наружная часть с внутренним радиусом 30–50 км, организованная в дождевые полосы – полосы плотных грозовых облаков, медленнодвигающиеся к центру циклона и сливающиеся со стеной «глаза». В дождевых полосах, как и в стене «глаза», воздух поднимается вверх, а в пространстве между ними, свободном от низких облаков, воздух опускается;

средняя часть – «стена глаза», которая окружает «глаз» урагана стеной облаков, и считается наиболее смертельной зоной урагана. Эта стена удаляет любой след бури из «глаза» урагана и создает смертельный ветер более 150 км/ч;

центральная часть диаметром 30–60 км – «глаз», здесь скорость ветра уменьшается, движение воздуха имеет преимущественно нисходящий характер, а небо часто остается ясным. В стадии затухания размер «глаза» стремительно растет и его диаметр достигает 70–90 км.

Для изучения структуры ураганов (тайфунов) чаще всего используется визуальный анализ их космических снимков, получаемых со спутников ДЗЗ. Такой анализ показывает, что на космическом снимке могут быть выделены некоторые особенности его структуры, в частности их три концентрические части. Весь ураган представляет собой компактный сплошной облачный массив в форме круга (на

снимке виден диск основной области урагана, рисунок 1, а). В центре урагана располагается его «глаз» (на снимке он представлен в виде светлого пятна с темной точкой в центре, рисунок 1, а). За ним наблюдается плотный покров облачности (отображается на снимке в виде более плотного пояса белого цвета вокруг «глаза», рисунок 1, а). Однако визуально определить его границы практически невозможно. Далее располагаются закручивающиеся полосы, отходящие от основного массива урагана (на снимке просматриваются спиралевидные полосы на периферии урагана, рисунок 1, а). Однако эти спиралевидные структуры отчетливо выделяются только на внешней области урагана, в средней части они не выделяются.

При обработке космических снимков одной из важных задач является разработка эффективных методов сегментации изображений, содержащих различные природные объекты. Кроме того, большой объем получаемой информации требует создание методов, позволяющих автоматизировать процесс дешифрирования космических снимков. Наряду с традиционными методами, основанными на спектральном, корреляционном [6] и контурно-текстурном анализе [7], все большее распространение при решении задач сегментации изображений начали получать методы фрактального анализа [8–10].

Для исследования сложной структуры космического изображения урагана (тайфуна) предлагается использовать фрактальный метод сегментации, который основан на «оконной» обработке исходного изображения и расчета фрактальной размерности. Фрактальная размерность обычно является неотрицательным нецелым числом, а различная сложность частей урагана (тайфуна) на изображении приводит к различным значениям величин фрактальных размерностей. Данный факт позволяет использовать величину фрактальной размерности для сегментации космических изображений ураганов (тайфунов).

При реализации метода сегментации с использованием фрактального анализа вначале получают исходное космическое изображение, например, космический снимок со спутника NOAA-20 на сайте NASA Rapid Response [11]. Данное изображение сохраняется в цифровой форме в постоянной памяти компьютера и в дальнейшем обрабатывается. При этом цифровое изображение представляется в трех координатах: x и y – размеры исходного снимка по горизонтали и вертикали, а z – значения яркости пиксела синтезированного изображения. Далее исходное изображение преобразуется в другую плоскость анализа – осуществляется построение поля фрактальных

размерностей. При этом изображение обрабатывается с использованием «скользящего» или «скачущего» «окна», начиная с его левого верхнего угла. Размеры «окна» и шаг его перемещения могут изменяться в зависимости от размера изображения и необходимой скорости его обработки. Если шаг перемещения равен единице, то «окно» называется «скользящим», при другом шаге – «скачущим». Для каждого положения «окна» проводится расчет фрактальной (дробной) размерности [8]

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\lg N(\varepsilon)}{\lg(1/\varepsilon)},$$

где ε – размер ребра куба покрытия; $N(\varepsilon)$ – число кубов, покрывающих изображение в «окне».

Для определения фрактальной размерности наиболее часто используют метод покрытия [8] или метод призмы [10].

Полученные значения фрактальных размерностей D во всех «окнах» записываются в отдельную матрицу, которую называют полем фрактальных размерностей (ПФР). При этом величины фрактальных размерностей зависят от сложности перепадов яркости изображения в «окне» и могут принимать значения от $D = 2,0$ до $D = 3,0$. При близких структурах изображения в соседних «окнах» фрактальные размерности имеют близкие значения. «Окна» с близкими значениями фрактальной размерности могут быть объединены в отдельные сегменты, обеспечивающие сегментацию изображения.

После расчета ПФР проводится его анализ для решения задачи сегментации космического снимка. Для этого определяются минимальное и максимальное значения фрактальных размерностей ($D_{\text{мин}}$ и $D_{\text{макс}}$), которые присутствуют на ПФР, а также определяется диапазон изменения фрактальных размерностей на ПФР ($\Delta D = D_{\text{макс}} - D_{\text{мин}}$). Затем, если $D_{\text{мин}} = 2,0$ и $D_{\text{макс}} = 3,0$, то весь диапазон значений фрактальных размерностей $\Delta D = 1,0$ разбивается на 10 поддиапазонов первого уровня разбиения $\Delta D_1, \Delta D_2, \dots, \Delta D_{10}$. При этом значения фрактальных размерностей округляются до первого знака после запятой, а протяженность поддиапазона первого уровня будет равна 0,1. Если же $D_{\text{мин}} \neq 2,0$ и $D_{\text{макс}} \neq 3,0$, то число поддиапазонов первого уровня разбиения будет меньше. Для каждого поддиапазона первого уровня $\Delta D_1, \Delta D_2, \dots, \Delta D_{10}$ строятся селективные изображения, т. е. изображения на которых отмечены соответствующим цветом «окна», в которых фрактальные размерности соответствуют заданному диапазону

ΔD . Таким образом производится первичная сегментация исходного изображения. Затем проводится анализ селективных изображений первого уровня разбиения. При этом визуально находится поддиапазон $\Delta D_1, \Delta D_2, \dots, \Delta D_{10}$, содержащий максимальное количество «окон» с фрактальными размерностями, например, это девятый поддиапазон ΔD_9 . В этом поддиапазоне фрактальные размерности изменяются от $D_{9\text{мин}} = 2,8$ до $D_{9\text{макс}} = 2,9$. Далее этот поддиапазон первого уровня $\Delta D_9 = 0,1$ разбивается на десять поддиапазонов второго уровня разбиения $\Delta D_{91}, \Delta D_{92}, \dots, \Delta D_{910}$, при этом протяженность поддиапазона второго уровня равна 0,01, т. е. значения фрактальных размерностей ПФР округляются до второго знака после запятой. Для каждого поддиапазона второго уровня разбиения $\Delta D_{91}, \Delta D_{92}, \dots, \Delta D_{910}$ строятся селективные изображения, т. е. производится дальнейшая сегментация исходного изображения. Затем снова визуально находится поддиапазон, содержащий максимальное количество «окон» с фрактальными размерностями, и обработка продолжается. Число этапов сегментации изображения будет зависеть от точности определения фрактальных размерностей (округления фрактальных размерностей) и необходимой степени детализации. Кроме того, в зависимости от решаемых задач, могут выбираться другие поддиапазоны, содержащие не максимальное количество «окон» фрактальных размерностей.

Таким образом, предлагаемый метод сегментации космических снимков позволяет выделять на изображениях кластеры, имеющие одинаковую фрактальную размерность, зависящую от сложности их структуры.

Рассмотрим возможность сегментации структуры урагана (тайфуна) с использованием фрактального анализа цифрового космического изображения. Например, получим на сайте NASA Rapid Response [11] синтезированный космический снимок (каналы П1-М4-М3) со спутника NOAA-20 с разрешением 750 м (ураган в Атлантическом океане 05 сентября 2021 года). Размер изображения составляет $x \times y = 3200 \times 3216$ пикселей.

Для полученного изображения строится ПФР с использованием «скользящего окна» размером 16×16 пикселей. Для расчета фрактальной размерности использовался метод покрытия, точность определения фрактальной размерности составляла четыре знака после запятой. На ПФР исходного изображения после округления: $D_{\text{мин}} = 2,0$ и $D_{\text{макс}} = 3,0$, т. е. диапазон изменения фрактальных размерностей в этом случае равен $\Delta D = 1,0$. Весь диапазон ΔD разбивается на десять поддиапазонов первого уровня разбиения ($\Delta D_1, \Delta D_2, \dots, \Delta D_{10}$),

после чего получаем: $\Delta D_1 = 2,0-2,1$; $\Delta D_2 = 2,1-2,2$; $\Delta D_3 = 2,2-2,3$; $\Delta D_4 = 2,3-2,4$; $\Delta D_5 = 2,4-2,5$; $\Delta D_6 = 2,5-2,6$; $\Delta D_7 = 2,6-2,7$; $\Delta D_8 = 2,7-2,8$; $\Delta D_9 = 2,8-2,9$; $\Delta D_{10} = 2,9-3,0$. Для каждого поддиапазона первого уровня разбиения строятся селективные изображения. На рисунке 1 показаны селективные изображения для трех из десяти поддиапазонов фрактальной размерности на первом уровне разбиения $\Delta D_1 = 2,0-2,1$ (а); $\Delta D_7 = 2,6-2,7$ (б); $\Delta D_{10} = 2,9-3,0$ (в). Данные селективные изображения характеризуют особенности исходного космического снимка. На рисунке красным цветом обозначены «окна» на исходном изображении, соответствующие, заданным поддиапазонам фрактальной размерности.

Как видно на рисунке 1, а первому поддиапазону соответствуют незначительные особенности водной поверхности океана, но он не несет информации об урагане. Ураган остался не выделенными, не выделились и другие особенности океана, и облачного массива. На рисунке 1, б видно, что седьмой поддиапазон позволяет выделить большую часть водной поверхности океана и элементы облачного массива, не составляющие основу урагана. Десятый поддиапазон (рисунок 1, в) позволяет выделить весь ураган в целом, имеющий форму диска, от которого отходят отдельные спиралевидные полосы облаков. Также этому поддиапазону соответствуют другие элементы облачного массива и отражения от океана (блики), обусловленные условиями космической съемки (внизу посередине изображения). Таким образом, анализ селективных изображений, представленных на рисунке 1, показывает, что первый уровень разбиения позволяет осуществлять первичную сегментацию изображений и выделить ураган в целом. Однако на первом уровне разбиения не удается исследовать структуру урагана.

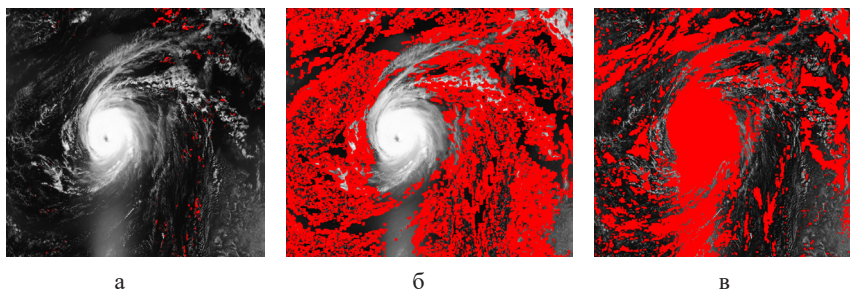


Рисунок 1 – Селективные изображения первого уровня разбиения:

$\Delta D_1 = 2,0-2,1$ (а); $\Delta D_7 = 2,6-2,7$ (б); $\Delta D_{10} = 2,9-3,0$ (в)

Для проведения дальнейшей сегментации выберем десятый поддиапазон первого уровня разбиения ΔD_{10} , так как он соответствует изображению урагана и содержит большое количество «окон» фрактальных размерностей. Ширина поддиапазона изменений фрактальных размерностей в этом случае равна $\Delta D_{10} = 0,1$. Весь поддиапазон ΔD_{10} разбивается на десять поддиапазонов второго уровня разбиения ($\Delta D_{101}, \Delta D_{102}, \dots, \Delta D_{1010}$), после чего получаем: $\Delta D_{101} = 2,90-2,91$; $\Delta D_{102} = 2,91-2,92$; $\Delta D_{103} = 2,92-2,93$; $\Delta D_{104} = 2,93-2,94$; $\Delta D_{105} = 2,94-2,95$; $\Delta D_{106} = 2,95-2,96$; $\Delta D_{107} = 2,96-2,97$; $\Delta D_{108} = 2,97-2,98$; $\Delta D_{109} = 2,98-2,99$; $\Delta D_{1010} = 2,99-3,00$. Для каждого поддиапазона второго уровня разбиения строятся селективные изображения. На рис. 2 показаны селективные изображения для трех поддиапазонов фрактальной размерности на втором уровне разбиения $\Delta D_{101} = 2,90-2,91$ (а); $\Delta D_{108} = 2,98-2,99$ (б); $\Delta D_{1010} = 2,99-3,00$ (в).

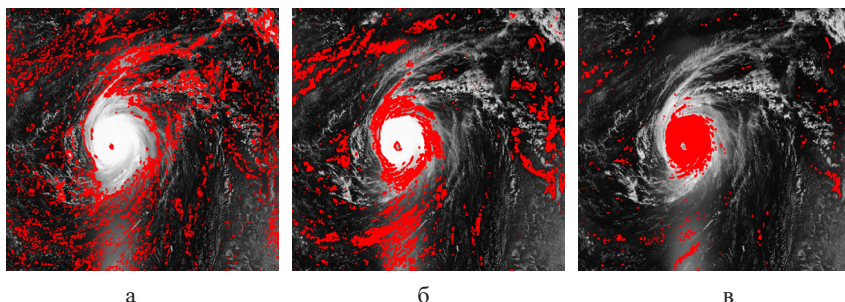


Рисунок 2 – Селективные изображения второго уровня разбиения: $\Delta D_{101} = 2,90-2,91$ (а); $\Delta D_{108} = 2,98-2,99$ (б); $\Delta D_{1010} = 2,99-3,00$ (в)

Анализ данных на рисунке 2 показывает, что дальнейший анализ ПФР позволяет выделить более точно структурные особенности урагана. На рисунке 2, а видно, что первый поддиапазон второго уровня разбиения соответствует центру урагана – его «глазу», а также границе наружной (внешней) части урагана от которой расходятся полосы облаков в виде спиралей. Восьмой поддиапазон (рисунок 2, б) позволяет выделить стену «глаза» урагана и уточнить границу наружной (внешней) части. На рисунке 2, в видно, что десятый поддиапазон позволяет выделить среднюю (основную) часть урагана. Таким образом, с использованием селективных изображений второго уровня разбиения удастся выделить основные части урагана: «глаз», стену «глаза» и наружную часть от которой расходятся спиралевидные полосы облаков, а также хорошо определить границы этих частей. Од-

нако исследовать особенности средней части урагана на этом уровне разбиения не представляется возможным, поэтому для десятого поддиапазона второго уровня разбиения целесообразно провести еще одно разбиение.

Значения фрактальных размерностей ПФР анализируются до третьего знака после запятой. Ширина поддиапазона изменений фрактальных размерностей на третьем уровне равна $\Delta D_{1010} = 0,01$. Десятый поддиапазон второго уровня разбивается на десять поддиапазонов третьего уровня: $\Delta D_{10101} = 2,990-2,991$; $\Delta D_{10102} = 2,991-2,992$; $\Delta D_{10103} = 2,992-2,993$; $\Delta D_{10104} = 2,993-2,994$; $\Delta D_{10105} = 2,994-2,995$; $\Delta D_{10106} = 2,995-2,996$; $\Delta D_{10107} = 2,996-2,997$; $\Delta D_{10108} = 2,997-2,998$; $\Delta D_{10109} = 2,998-2,999$; $\Delta D_{101010} = 2,999-3,000$. Для каждого поддиапазона третьего уровня разбиения строятся селективные изображения. На рис. 3 показаны селективные изображения для трех поддиапазонов фрактальной размерности на третьем уровне разбиения $\Delta D_{10101} = 2,990-2,991$ (а); $\Delta D_{10106} = 2,995-2,996$ (б); $\Delta D_{10109} = 2,998-2,999$ (в).

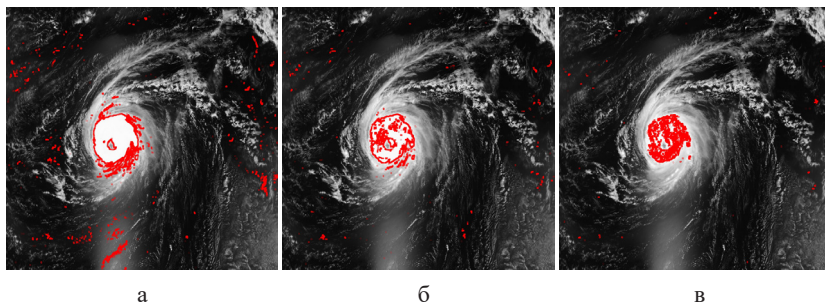


Рисунок 3 – Селективные изображения третьего уровня разбиения:
 $\Delta D_{10101} = 2,990-2,991$ (а); $\Delta D_{10106} = 2,995-2,996$ (б); $\Delta D_{10109} = 2,998-2,999$ (в)

Анализ селективных изображений на рисунке 3 показывает, что средняя часть урагана имеет некоторые особенности. Первый поддиапазон третьего уровня разбиения (рисунок 3, а) позволяет выделить плотную концентрацию облаков в нижней части урагана, а также более точно определить границу его центральной части. На рисунке 3, б (шестой поддиапазон третьего уровня разбиения) видно, что сверху над «глазом» располагается скопление облаков, которые, скорее всего, представляют наибольшую опасность. Селективное изображение девятого поддиапазона третьего уровня разбиения, показанное на рисунке 3, в, содержит большое количество «окон» близких фрак-

тальных размерностей, которые показывают среднюю часть урагана. Однако, детальный анализ структуры этой части урагана на третьем уровне разбиения невозможен. Проведем дальнейшую сегментацию данного поддиапазона.

Девятый поддиапазон третьего уровня разбивается на десять поддиапазонов четвертого уровня: $\Delta D_{101091} = 2,9980-2,9981$; $\Delta D_{101092} = 2,9981-2,9982$; $\Delta D_{101093} = 2,9982-2,9983$; $\Delta D_{101094} = 2,9983-2,9984$; $\Delta D_{101095} = 2,9984-2,9985$; $\Delta D_{101096} = 2,9985-2,9986$; $\Delta D_{101097} = 2,9986-2,9987$; $\Delta D_{101098} = 2,9987-2,9988$; $\Delta D_{101099} = 2,9988-2,9989$; $\Delta D_{1010910} = 2,9989-2,9990$. Для каждого поддиапазона четвертого уровня разбиения строятся селективные изображения. На рисунке 4 показаны селективные изображения для трех поддиапазонов фрактальной размерности на четвертом уровне разбиения $\Delta D_{101091} = 2,9980-2,9981$ (а); $\Delta D_{101096} = 2,9985-2,9986$ (б); $\Delta D_{101099} = 2,9988-2,9989$ (в).

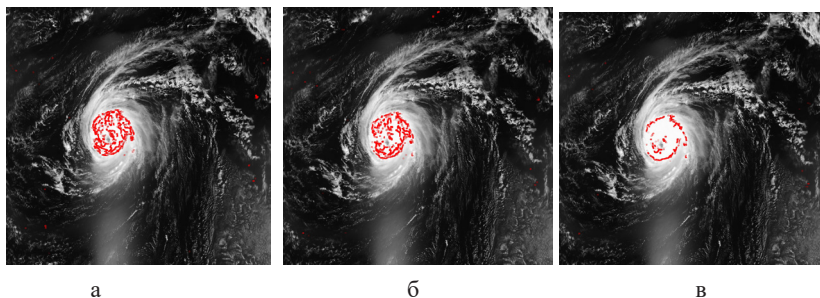


Рисунок 4 – Селективные изображения четвертого уровня разбиения:

$\Delta D_{101091} = 2,9980-2,9981$ (а); $\Delta D_{101096} = 2,9985-2,9986$ (б); $\Delta D_{101099} = 2,9988-2,9989$ (в)

На рисунке 4 видно, что средняя часть урагана имеет спиралевидную структуру, а близкие фрактальные размерности, представленные на селективных изображениях, позволяют визуализировать данную структуру.

Таким образом, предложенный метод может быть использован для автоматизированной обработки космических изображений. Многоуровневое разбиение диапазонов изменения фрактальных размерностей позволяет выделить все части урагана (тайфуна) и исследовать особенности его структуры. Представление структуры урагана (тайфуна) с помощью цветовой визуализации дает возможность оценить особенности его строения и произвести качественный анализ его особенностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кашкин В. Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений / Кашкин В. Б., Сухинин А. И. – М.: Логос, 2001. – 264 с.
2. Урагани. Причины виникнення, сезони. Правила присвоєння назв ураганам. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://compas.ucoz.com/news/2009-08-21-42-0>.
3. Тропические циклоны. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/5648131/page:29/>.
4. Циклон. Структура. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B8%D0%BA%D0%BB%D0%BE%D0%BD#%D0%9A%D0%BB%D0%B0%D1%81%D0%B8%D1%84%D1%96%D0%BA%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F>.
5. Облачные системы тропических циклонов (тайфунов, ураганов). – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://meteoweb.ru/phen057-6.php>.
6. Янутш Д. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков / Янутш Д. А. – М.: Недра, 1992. – 249 с.
7. О классификации изображений по их текстурным признакам / [Андреев Г. А., Потапов А. А., Галкина Т. В. и др.] // Исследование Земли из Космоса. – 1990. – №2. – С. 91–96.
8. Feder J. Fractals / J. Feder. – New York: Plenum Press, 1988. – 283 p.
9. Falconer K.J. Fractal Geometry. Mathematical Foundations and Applications / Falconer K. J. – Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2003. – 337 p.
10. Clarke K. C. Computation of the Fractal Dimension of Topographic Surface Using the Triangular Prism Surface Area Method / Clarke K. C. // Computers & Geosciences. – 1986. – v. 12, № 5. – P. 713–722.
11. NASA Rapid Response. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lance4.modaps.eosdis.nasa.gov/cgi-bin/imagery/noaa20.cgi>.