

УДК 502/504

С. Л. Белопухов, И. М. Жогин, И. В. Цветков,  
А. Н. Насонов, В. И. Балабанов, В. И. Соколов, Н. И. Шералиев

## ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАБИЛИТАЦИИ ЗЕМЕЛЬ В ЮЖНОМ ПРИАРАЛЬЕ ФРАКТАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ

*Ключевые слова:* дистанционный мониторинг, фрактальные методы, деградация земель, текстура изображения.

*Предлагается фрактальный метод обработки результатов дистанционного мониторинга дна Аральского моря и дельт рек Амударья и Сырдарья для оценки пространственно-временной динамики деградации земель (опустынивания). Метод основан на обработке текстур изображений исследуемой территории, полученных из различных источников, в том числе аэрокосмических снимков, снимков, полученных с использованием малой авиации и беспилотных летательных аппаратов.*

*Key words:* remote monitoring, fractal methods, land degradation, image texture.

*A fractal method for processing the results of remote monitoring of the bottom of the Aral Sea and the deltas of the Amudarya and Syrdarya rivers is proposed to assess the spatiotemporal dynamics of the degradation of desert (desertification). The method is based on the processing of texture images of the study area, obtained from various sources, including aerospace images, images obtained with the use of small aircraft and unmanned aerial vehicles.*

Снижение уровня воды Аральского моря, начавшееся в 70-х годах XX века, вызвало процесс глубокой деградации земель в центре пояса великих пустынь Кызылкум и Каракумы. Это привело к образованию еще одной пустыни - «Аралкум». Опасность образования новой пустыни заключается в том, что морское дно, бывшее в естественном состоянии своеобразной опреснительной «фабрикой», теперь действует как искусственный «антропогенный вулкан», выбрасывая в атмосферу огромные массы солей и тонкодисперсной пыли. Эффект загрязнения усиливается за счет того, что Аральское море расположено на трассе мощного струйного течения воздуха, что способствует выносу аэрозолей в высокие слои и быстрому их распространению в атмосфере Земли [1].

Основная задача состоит в том, чтобы максимально сократить влияние Аральского кризиса на окружающую среду и проживающих в Приаралье людей. Для решения этой задачи необходим мониторинг территорий, ранее являющихся дном Аральского моря, а так же территорий дельт рек Амударья и Сырдарья.

Мониторинг территории заключается в сборе и обработке данных дистанционного зондирования, полученных из различных источников, в том числе аэрокосмических снимков и снимков, полученных с использованием малой авиации и беспилотных летательных аппаратов.

Обработка данных мониторинга состоит в дешифрировании снимков, что является сложной задачей, для решения которой необходимо выполнить ряд работ по определению качественных и количественных характеристик объектов на снимках. Задача заключается в определении контуров однородных по своим свойствам объектов или пространственных областей, которые выделяются цветом или маркировкой текстур изображений на снимках [2].

Вследствие слабой формализации в методах распознавания текстур природных объектов отсутствует четкий критерий однозначной идентификации, на роль которого традиционно предлагается цвет, по-

скольку он легко выделяется и поддается машинной обработке [3]. Однако для сложных природных объектов применение подобного критерия идентификации дает значительные ошибки.

К общим недостаткам существующих на сегодня методов идентификации природных объектов, можно отнести, либо разделение объекта на элементарные составляющие, либо усреднение свойств объекта. Поэтому необходим критерий, который бы позволял учитывать свойства объекта в целом. Для этого предлагается использовать фрактальную размерность текстур изображений объектов с целью их идентификации [4, 5]. Такой подход позволит учитывать не только отдельные элементы различных текстур, но и анализировать объекты со сложными текстурами как единое целое.

Требуется разработка методики, позволяющей не только идентифицировать типы земель, но и давать количественную оценку степени их деградации в динамике. В первую очередь, это касается анализа качественных изменений текстур природных объектов, что необходимо для определения мест и объема проведения восстановительных мероприятий и оценки их эффективности.

Для идентификации объектов и оценки их параметров, нами предлагается использовать метод, основанный на определении фрактальных характеристик текстур. На сегодняшний день существует множество работ, посвященных фрактальной структуре ландшафтов. При этом, все исследователи сходятся к тому, что различным ландшафтными образованиям соответствуют свои фрактальные параметры [6-9].

Согласно первичным исследованиям, общая площадь зоны высокого риска экологической опасности в 2006 г. составляла 785 тыс. га осушенного дна моря, которая к 2015 году увеличилась еще на 500 тыс. га [1]. Задачи настоящего времени – сократить негативное воздействие Аральского кризиса на окружающую среду за счет целевых природоохранительных мероприятий, эффективность которых необходимо соотносить с динамикой распространения кризиса (рис. 1).



Рис. 1 – Динамика деградации земель

Эффективным методом борьбы с солепереносом, а также для закрепления движущихся песков, локализации их отрицательного воздействия на окружающую среду является высадка защитных насаждений с использованием местных древесно-кустарниковых растений, способных произрастать в тяжелых почвенно-климатических условиях пустынь.

За это время выполнены лесомелиоративные работы на площади 282 тыс. га. В настоящее время имеется еще около 350 тыс. гектаров территории высохшего дна моря, пригодных для лесных насаждений и закрепления подвижных барханных песков.

В состав Комплексной программы 2015-2018 входят также два проекта «Создание защитных лесных насаждений на участке «Ахантай» и на гряде «Аккун» осушенного дна Аральского моря из местных древесно-кустарниковых растений».

В этих условиях необходима разработка методов и средств дистанционного мониторинга осушенного дна моря и особо дельт рек Амударья и Сырдарья, в связи с организацией управления этой сложной антропогенно-природной системой.

Фрактальные методы являются принципиально новыми методами обработки сигналов и изображений. В основе методов лежит близость фрактальных размерностей текстур однородных по природе объектов.

Фрактальная размерность является основной характеристикой фрактального объекта, а ее величина представляет собой характеристику сложности поверхности: меньшим значениям фрактальной размерности соответствуют гладкие, а большим - более сложные, изрезанные поверхности [10]. Для плоских изображений размерность колеблется в диапазоне от 1 до 2, характеризуя степень самоподобия и меру заполнения объектами того пространства, в которое он вложен. В случае аэрокосмических снимков базовое пространство – плоскость и его размерность равна 2.

Базовой характеристикой фрактала является его самоподобие, (инвариантность по отношению к масштабу), и даже небольшие изменения данного свойства сильно влияют на величину фрактальной размерности. Основным методом определения фрактальной размерности геометрических объектов является классический «клеточный» метод, известный как box-counting [10]. Для определения фрактальной размерности этим методом на объект накладывается серия сеток с изменяющимся шагом от  $\delta_{min}$  до  $\delta_{max}$ , (рис.2).

Наибольший размер клетки рекомендуется выбирать в пределах: 10 – 5 % от общего размера объекта.  $\delta_{min}$  выбирается сопоставимой по размеру с минимальными составляющими объекта. Затем производится подсчет количества ячеек сетки, в которые попадают элементы объекта. Фрактальная размерность  $D$  определяется по классическому методу как:

$$D = \lim_{\delta \rightarrow \infty} \frac{\ln N(\delta)}{\ln \left(\frac{1}{\delta}\right)} \quad (1)$$

где  $N$  – число клеток, занятых объектом,  $\delta$  – варьируемый размер клетки.

Соответственно, если изучаемый объект близок к фракталу, то зависимость количества ячеек сетки, занятых объектом от размера ее элементарной ячейки будет расти в степенной зависимости. А в дважды логарифмических координатах данная зависимость будет стремиться к прямой линии регрессии, тангенс угла наклона которой численно равен фрактальной размерности объекта, формально определяющей его геометрическую сложность.

Для определения фрактальной размерности в данном случае используются дважды логарифмические координаты, чтобы в наглядной и простой для анализа линейной форме проявилось основное свойство фрактальных объектов – степенная зависимость сложности структуры от масштаба [10].

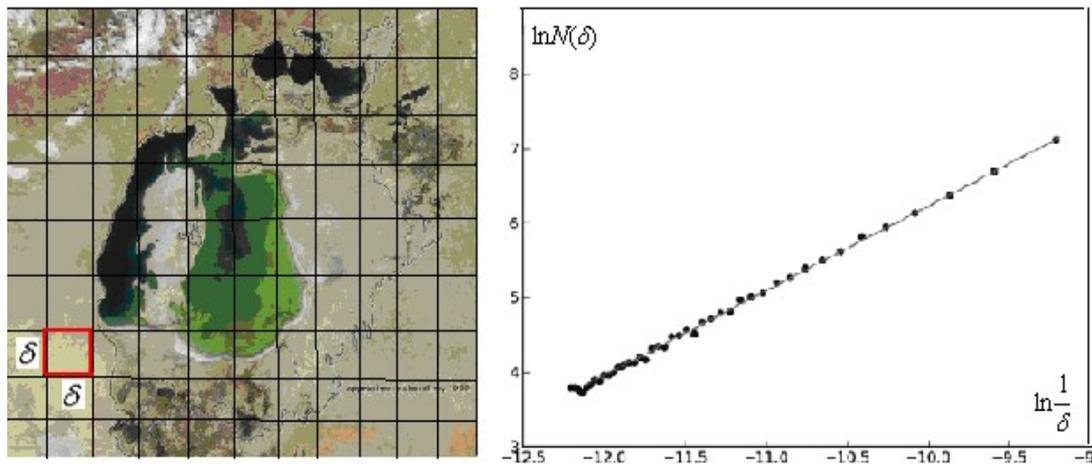


Рис. 2 - Определение фрактальной размерности объекта клеточным методом

Для анализа текстур сложных природных объектов с разветвленной структурой предлагается метод на основе представления объекта в виде канторов-

ского множества, подробно изложенный в работе [5].

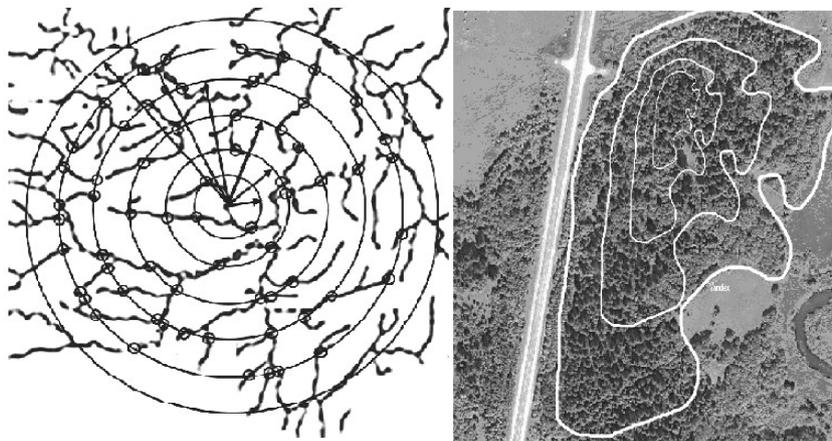


Рис. 3 - Канторовский метод определения фрактальной размерности разветвленной структуры

Если посмотреть на границу замкнутой области внутри разветвленной структуры изучаемого объекта, то образуются точки пересечения, число которых увеличивается с увеличением радиуса покрывающей окружности.

Фрактальной моделью разветвленной структуры объекта будем называть его развертку в канторовское множество, устанавливающую логарифмическую зависимость числа пересечений элементов системы окружностями заданного радиуса (рис. 3).

При этом, связь между числом пересечений  $N$  и радиусом покрывающей окружности  $R$  будет выражаться степенной зависимостью  $N \approx R^h$ . Степенной показатель  $h$  называют размерностью блуждания.

Для объектов на плоскости связь между размерностью блуждания и фрактальной размерностью определяется соотношением:

$$h = 2(D - 1) \quad (2)$$

Применение канторовского метода позволяет определять фрактальную размерность объектов сложной формы, причем, при замене круговых контуров на контуры неправильной формы величина размерности по однородным участкам изменяется незначительно. Для повышения точности измерений необходимо применять нормировку фрактальной размерности по искусственно сгенерированному геометрическому объекту с заранее известной фрактальной размерностью.

Для подтверждения возможности использования фрактальной размерности при группировке и идентификации объектов по аэрокосмическим снимкам, проведен ряд сравнительных измерений размерности текстур одних и тех же объектов, взятых из разных источников и в разное время года (табл.1).

Таблица 1 - Фрактальные размерности текстур объектов из разных источников

Вид объекта	Yandex Map	Аэрофотосъемка локатором бокового обзора	LandSat
Кустарник	1,65	1,64	1,68
Участок леса	1,72	1,71	1,73
Озеро	1,68	1,69	1,71
Мелиоративная система	1,15	1,18	1,21

Как видно из таблицы 1, текстуры, взятые из различных источников и отражающие один и тот же объект, имеют фрактальные размерности с разницей 1 – 3 %. Текстуры, взятые с сайта LandSat имеют несколько большую размерность, что может быть объяснено более лучшим разрешением представленных там космических снимков. Все проведенные сравнительные измерения говорят о схожести фрактальных размерностей текстур, полученных из разных источников с точностью до 5 %. Кроме того, анализ серии снимков одной территории, выполненных в разных спектральных зонах, позволяет по снимку с наибольшей размерностью, сделать вывод об участке спектра, несущем максимальную информацию о характере текстуры объекта.

Для территорий Аральского моря предложенный метод может быть использован в ходе мониторинга земель, возникших после отступления моря и для прилегающих участков на предмет оценки степени их деградации, а также развития процесса опустынивания.

Текстура образуемых на дне Арала солончаков сильно отличается от текстур окружающих объектов, и, соответственно, их фрактальных размерностей [11]. Анализ серии пространственно-временных снимков высоко разрешения позволит установить корреляцию между проводимыми природоохранными мероприятиями (создание защитных лесных и кустарниковых насаждений) и фрактальной размерностью процессов солепереноса и распространения песков. Понижение фрактальной размерности этих процессов будет означать, что защитные насаждения системно снижают активность деградации и препятствуют ее распространению.

### Выводы

1. Развитие процессов деградации земель в Южном Приаралье показывает, что природная среда вышла из режима саморегуляции своих состояний. Основной задачей является локализация процессов солепереноса из дна Арала и распространения песков на соседние территории. В этих условиях важно, чтобы программа целевых защитных мероприятий, действующая в настоящее время, была эффективна в плане достижения природно-антропогенного баланса территорий Южного Приаралья.

2. Особенностью предлагаемого метода дистанционного мониторинга является оценка фрактальной размерности, как показателя структуры природно-антропогенной системы, позволяющая через разделение текстур составляющих элементов (солонча-

ки, песчаники, вода, кустарники, каналы и т.д.) оценивать пространственно-временную динамику развития качественно разных природно-антропогенных процессов.

3. Предлагаемый в статье метод дистанционного мониторинга земель с использованием фрактальных методов позволит оценить системную эффективность защитных лесных насаждений на участке «Ахантай» и на гряде «Аккум» осушенного дна Аральского моря из местных древесно-кустарниковых растений. Понижение фрактальной размерности текстур почв будет означать, что при имеющейся антропогенной нагрузке, защитные насаждения системно снижают активность деградации земель и препятствуют ее распространению.

4. Практическую реализацию предлагаемого метода планируется осуществить на основе геоинформационной системы Q-GIS, что позволит оперировать различными слоями, содержащими текстуры составляющих элементов и картографические данные природно-антропогенной системы земель Южного Приаралья.

### Литература

1. О.С. Галаева, О.Е. Семенов, *Гидрометеорология и экология*, 2, 116 – 121 (1997).
2. А.М. Чандра, С.К. Гош, *Дистанционное зондирование и географические информационные системы*, Техносфера, М., 2008. 312 с.
3. И.А. Лабутина, *Дешифрирование аэрокосмических снимков: Учеб. пособие для студентов вузов*, Аспект Пресс, 2004. 184 с.
4. А.П. Тищенко, И.В. Цветков, *Фрактальная размерность текстур природных объектов и их идентификация методами фрактального анализа. Моделирование сложных систем*, Тверь, 1998, Выпуск 1, С. 156-161.
5. В.К. Балханов, *Основы фрактальной геометрии и фрактального исчисления*, Изд-во Бурятского государственного университета, Улан-Удэ, 2013. 224 с.
6. Б. Мандельброт, *Фрактальная геометрия природы*, Ин-т компьютерных исследований, М., 2002. 856 с.
7. С.С. Крылов, Н. Ю. Бобров, *Фракталы в геофизике: Учеб. Пособие*, Издательство С.-Петербургского университета, СПб., 2004. 138 с.
8. D.L. Turcotte, *“Fractals and chaos in geology and geophysics”*. Cambridge University Press, Cambridge, 1997
9. C.G. Sammis., R. Osborne, J.L. Anderson, M. Banerdt, P. White, *PAGEOPH.*, 124, 53-78 (1986).
10. Р.М. Кроновер, *Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории*, М., 2000. 352 с.
11. А.П. Тищенко, И.В. Цветков, *Фрактальная размерность текстур природных объектов и их идентификация методами фрактального анализа. Моделирование сложных систем*, Тверь, 1998, Выпуск 1, С. 156-161.

© С. Л. Белопухов – д.с.-х.н., проф., проректор по науке и инновационному развитию, Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева, belopuhov@mail.ru; И. М. Жогин - зав. лаб. кафедры машин и оборудования природообустройства и защиты в чрезвычайных ситуациях того же вуза; И. В. Цветков – д.т.н., проф. той же кафедры; А. Н. Насонов - к.т.н., доцент кафедры организации и технологии строительства объектов природообустройства того же вуза; В. И. Балабанов – д.т.н., проф., декан факультета «Процессы и машины в агробизнесе» того же вуза; В. И. Соколов – к.г.н., директор Агентства по реализации проектов Международного фонда спасения Арала; Н. И. Шералиев - к.т.н., представитель Узбекистана в Исполкоме Международного фонда спасения Арала.

© S. L. Belopukhov - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Vice-Rector for Science and Innovation Development, Russian State Agrarian University - MAAA named after K.A. Timiryazeva, belopuhov@mail.ru; I. M. Zhogin - head of the laboratory of the chair of machinery and equipment for environmental engineering and protection in emergency situations of the same university; I. V. Tsvetkov – Ph.D., Professor of the Department of Machinery and Equipment for Environmental Engineering and Protection in Emergency Situations of the same university; A. N. Nasonov - Ph.D., Associate Professor of the Department of Organization and Technology of Construction of Environmental Facilities of the same University; V. I. Balabanov – Ph.D., Professor, Dean of the Faculty of Processes and Machines in Agribusiness of the same University; V. I. Sokolov - Ph.D., Director of the Agency for the Implementation of the International Fund for Saving the Aral Sea; N. I. Sheraliev - Ph.D., representative of Uzbekistan in the Executive Committee of the International Fund for Saving the Aral Sea.