

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2017.02.011>

УДК. 553.911.98

А. Д. Федоровский¹, А. В. Хижняк¹, Т. Н. Дьяченко²,
В. Г. Якимчук¹, Д. Л. Подгорняк¹, К. Ю. Суханов¹, О. В. Томченко¹

¹ Государственное учреждение «Научный центр аэрокосмических исследований Земли
Института геологических наук Национальной академии наук Украины», Киев

² Институт гидробиологии Национальной академии наук Украины, Киев

КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВОДНЫХ ПОТОКОВ УСТЬЕВЫХ ОБЛАСТЕЙ РЕК (НА ПРИМЕРЕ ДНЕПРА И ДУНАЯ)

Изложен способ оценки водных потоков устьевых областей рек по структурным характеристикам с использованием зависимости нормированной азимутальной спектральной плотности от углового направления. На основе информации космического мониторинга выполнен сравнительный анализ гидрологических характеристик устья Днепра и Килийской дельты Дуная за 1986 и 2015 гг. При этом было установлено, что спектры изображений устьевых участков Днепра за 1986 и 2015 годы практически не изменились ни по интенсивности, ни по азимутальному расположению, в отличие от дельты Дуная, где за исследуемый период наблюдаются существенные изменения водных потоков.

Ключевые слова: космический мониторинг, гидрологические характеристики, спектр Фурье.

Мониторинг и моделирование потоков реки является важным шагом в планировании и анализе водных ресурсов на основе наземной и космической информации. Для наземной информации анализ Фурье является инструментом в гидрологическом исследовании при прогнозировании гидрологических систем для анализа и проектирования водохозяйственных систем и управления речными бассейнами. В работах [7, 8] рассматривается моделирование течения реки с использованием моделей, основанных на рядах Фурье. Однако в этих работах рассматриваются временные ряды состояния потоков реки, а в данной статье исследуются пространственные характеристики водных объектов, которые определяются по космическим снимкам.

© А. Д. ФЕДОРОВСКИЙ, А. В. ХИЖНЯК, Т. Н. ДЬЯЧЕНКО,
В. Г. ЯКИМЧУК, Д. Л. ПОДГОРНЯК, К. Ю. СУХАНОВ,
О. В. ТОМЧЕНКО, 2017

При дешифрировании космических снимков наряду с оптическими спектральными признаками предлагается использовать структурные и текстурные параметры изображений, что позволяет извлекать больший объем информации [5]. Одним из информативных признаков структурных характеристик изображения объектов является их пространственно-частотный спектр (ПЧС) [6]. Изменению яркости и координат точек в плоскости изображения объекта в терминах спектрального анализа соответствует изменение амплитуды и фазы по пространственным частотам. Воспользуемся для оценки водных потоков устьевых областей методологией пространственно-частотного анализа.

Изображению водного объекта (ВО), имеющему определенную структуру, соответствует ПЧС, характеризующийся суммой пространственных составляющих (гармоник) с соответс-

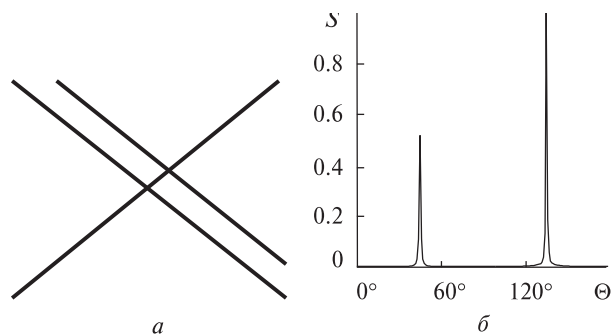


Рис. 1. Пересекающиеся линии (а) и график азимутальной спектральной плотности пересекающихся линий S в зависимости от углового направления Θ (б)

твующими амплитудами и фазовыми сдвигами между этими составляющими. Значения амплитуд определяют вклад соответствующих пространственных частот в формирование изображения ВО, а значения фазовых сдвигов определяют изменение координат отдельных точек в изображении относительно их положения в объекте. В качестве ПЧС наиболее часто используется двумерный спектр Фурье:

$$C(v_x, v_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L(x, y) \times \exp[-j2\pi (v_x x + v_y y)] \cdot dx \cdot dy, \quad (1)$$

где $L(x, y)$ — яркость изображения в точке (x, y) , v_x и v_y — значения пространственных частот по осям X и Y , $C(v_x, v_y)$ — пространственная гармоника по осям в точке (v_x, v_y) , $j = \sqrt{-1}$.

Для определения направления линейных элементов изображения используется зависимость нормированной азимутальной спектральной плотности (АСП) энергетического спектра от углового направления Θ . Вычисление АСП осуществляется по формуле [2]

$$S(\Theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{\Theta-\Delta\Theta}^{\Theta+\Delta\Theta} |C(\Theta, r)|^2 \cdot d\Theta \cdot dr,$$

где $|C(\Theta, r)|$ — амплитуда спектра изображения в точке (Θ, r) , Θ — угол направления двумерной частоты в полярных координатах, смещенный на 90° , r — модуль пространственной частоты, или ее радиус в полярных координатах.

Была выполнена программная реализация метода на языке python (<https://www.python.org>) с

модулем numpy (<http://www.numpy.org>) для вычисления дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и с модулем pillow (<https://python-pillow.org>) для работы с цифровыми изображениями.

Алгоритм. Для определения направления линейных элементов изображения производилось определение нормированной азимутальной спектральной плотности энергетического спектра в зависимости от углового направления Θ .

1. Вычисляется амплитудный спектр Фурье исследуемого фрагмента изображения в декартовой системе координат по формуле ДПФ:

$$C(m_x, m_y) = \frac{1}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} L(n_x, n_y) \times \exp[-j2\pi (n_x m_x + n_y m_y) / N],$$

где N — число отсчетов по вертикали и горизонтали квадратного цифрового изображения, n_x, n_y — номера отсчетов по вертикали и горизонтали, L — значение яркости пикселя, m_x, m_y — номера пространственных гармоник по вертикали и горизонтали, $C(m_x, m_y)$ — значение ДПФ.

2. Производится пересчет спектра изображения в полярную систему координат по формулам

- $r = \text{round}(\sqrt{m_x'^2 + m_y'^2})$ — для отсчета радиуса, где round — функция округления, $m_x' = m_x + N/2$, $m_y' = m_y + N/2$;
- $\Theta = \text{arctg}(m_y' / m_x') + \pi / 2$ — для угла направления.

3. Спектральная энергетическая плотность определяется по формуле

$$S(\Theta) = \sum_{r=0}^{N/2} |C(r, \Theta)|^2 \cdot r, \quad (2)$$

где r — номер отсчета (радиус), Θ — угол направления, N — число отсчетов, S — азимутальная спектральная плотность.

Суть метода определения направления русловых потоков объясняется рис. 1. На рис. 1, а изображены две параллельные линии, которые пересекает третья линия под некоторым углом, а на рис. 1, б — график нормированной азимутальной спектральной плотности $S(\Theta)$ для этого изображения, вычисленный в соответствии с (2). Максимумы АСП указывают положение линий в координатных осях, определяют угол между

ними, а также видно, что пик от двух параллельных линий больше по интенсивности пика одной линии.

Если в исходном изображении устьевых областей рек имеются протяженные рукава, косы и наносные острова, то будет наблюдаться расширение ПЧС в направлениях, перпендикулярных к направлению наибольшей их протяженности. В этом случае для амплитудного спектра, преобразованного в полярные координаты, определяется азимутальная спектральная плотность по направлениям. Углы, соответствующие направлениям с локальными максимальными значениями амплитудной составляющей, указывают доминирующие направления протяженных элементов. Это показывает возможность обнаружения с помощью двумерных преобразований Фурье направления развития много рукавного устья-дельты на цифровых изображениях рек.

Предлагаемый подход был нами использован при анализе доминирующих направлений устьевых потоков Днепра и Дуная. На рис. 2, а, б изображены космические снимки устья Днепра за 1986 и 2015 гг. соответственно. На рис. 2, в показано азимутальное распределение пространственно-частотного спектра $S(\Theta)$ изображения водных потоков, вычисленное в соответствии с (2). Из рис. 2, в видно, что спектры изображений устьевых участков Днепра за 1986 и 2015 гг. практически не изменились ни по интенсивности, ни по азимутальному расположению ПЧС. В соответствии с рис. 1 максимумы в районе $150 \dots 175^\circ$ характеризуют основные потоки устьевых участков Днепра.

Объяснением полученного результата может быть работа [3], в которой указано, что Днепровский лиман является своеобразным продолжением каскада днепровских водохранилищ, его наиболее низкой ступенью, но созданной естественными факторами (подъемом уровня моря и затоплением) в условиях, аналогичных перекрытию долины Днепра плотинами ГЭС. Наблюдаемое поднятие спектра в области 0° и 180° отражает влияние на АСП изображения береговой линии и прибрежной зоны.

Дельта Дуная является примером одного из крупнейших в мире плавнево-литорального ланд-

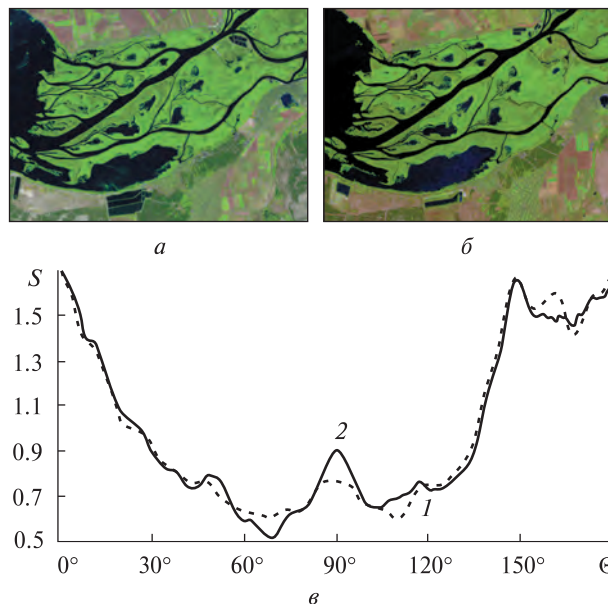


Рис. 2. Анализ доминирующих направлений устьевых потоков Днепра: а, б — космические снимки устья Днепра в 1986 г. («Ландсат 5») и в 2015 г. («Ландсат-8»), в — соответствующие азимутальные спектры (кривая 1 — 1986 г., кривая 2 — 2015 г.)

шафтного комплекса и при этом обладает целостным набором эколого-ценотических признаков, характеризующих ее как переходное природное образование — экотон типа «река — море». Как известно, такие функциональные объекты играют в биосфере одну из важнейших ролей как зоны контакта энергомассового взаимодействия и концентрации всех проявлений жизни, в т. ч. повышенного биоразнообразия, усиленной активности эколого-физиологических, биопродукционных и всех других процессов функционирования экосистем. При этом дельта Дуная, как и ряд других подобных ей объектов, находится в настоящее время под усиленным разнотипным антропогенным воздействием как на локальном, региональном, так и на глобальном уровнях. Такое сочетание биосферной роли этого уникального природного комплекса и его современного положения в природно-экосистемной хозяйственной структуре региона делает крайне необходимым ускоренное изучение этого комплекса на общеэкологическом уровне с выявлением максимально возможного количества эколого-ценотических взаимосвязей и закономерностей, с выходом на выработку

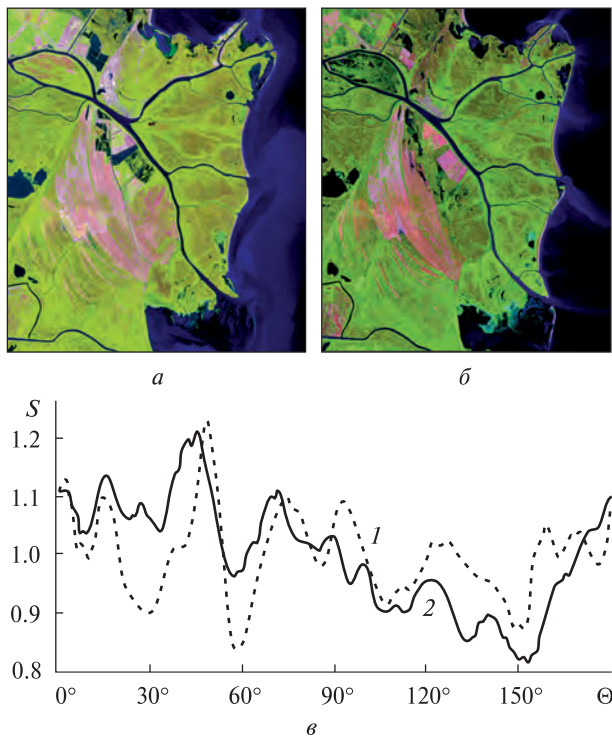


Рис. 3. Анализ доминирующих направлений устьевых потоков Дуная: *a, б* — космические снимки Килийской дельты Дуная в 1986 г. («Ландсат-5») и в 2015 г. («Ландсат-8»), *в* — соответствующие азимутальные спектры (кривая 1 — 1986 г., кривая 2 — 2015 г.)

системы практических мер по поддержанию экосистемной устойчивости.

На рис. 3, *a, б* изображены космические снимки устья Дуная за 1986 и 2015 гг. соответственно. На рис. 3, *в* показан график азимутального распределения пространственно-частотного спектра $S(\theta)$ изображения в соответствии с водными потоками, вычисленный в соответствии с (2).

В отличие от Днепра АСП Килийской дельты Дуная за 2015 г. (рис. 3, *в*) значительно изменилась по сравнению с 1986 г. как по уменьшению интенсивности, так и по азимутальному расположению пиков ПЧС.

При сопоставлении графика рис. 3, *в* с изображением дельты Килийского рукава Дуная на космическом снимке можно отметить, что основным потокам соответствуют пики ПЧС под углами 30°, 65° и 130°... 170°, причем энергетически достаточно насыщенные, что указывает на

преобладание более низких частот. Пик ПЧС в районе 90° ... 100°, очевидно, соответствует вертикально расположенной на космическом снимке береговой линии.

Выявленные изменения в Килийской дельте Дуная, которые согласуются с результатами работы [2], можно объяснить тем, что в связи с сокращением за последние 10 лет твердого стока Дуная из-за строительства плотин на реке и ее притоках, с перераспределением стока воды и наносов из Килийского рукава в Тульчинский и выходом Килийской дельты на большие глубины, интенсивность ее выдвигания в море сократилась (по сравнению с началом XX века) почти в десять раз. Определенную роль сыграло и повышение уровня Черного моря. Образование новых рукавов в дельте прекратилось. Наоборот, наблюдается отмирание многих боковых водотоков. При этом из двух смежных рукавов, как правило, активизируется более водоносный и короткий рукав.

Следствием перераспределения стока между рукавами, отмиранием одних и активизацией других, является поперечное смещение русла главного рукава в каждом узле разветвления, поскольку по мере отмирания бокового рукава угол его отделения быстро увеличивается, а угол продолжения главного русла уменьшается. В результате русло главного рукава ниже узла разветвления смещается в сторону берега, от которого отходит отмирающий рукав, а выше узла разветвления — в противоположную сторону. К искривлению русел приводит и смещение вниз по течению боковых перекатов, находящихся в истоках небольших рукавов.

Кроме сравнительного анализа русловых потоков Днепра и Дуная, был выполнен анализ динамики водных потоков Килийской дельты Дуная для семи месяцев 2015 г. с мая по ноябрь (рис. 4). Видно, что при практической неизменности расположения интенсивность водного потока существенно изменялась по месяцам. Так, самыми полноводными были октябрь и май, а маловодными — ноябрь и июль, что характерно для рассматриваемых времен года.

Таким образом, использование двумерных пространственно-частотных спектров Фурье

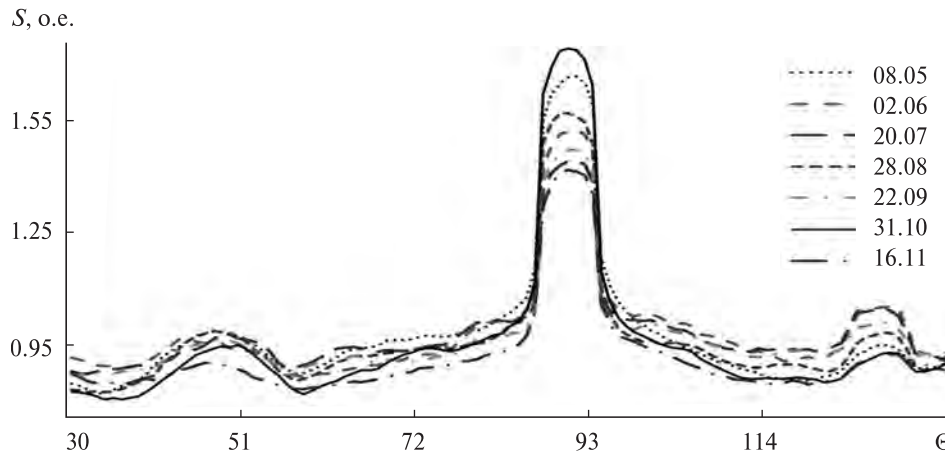


Рис. 4. Азимутальные спектры $S(\theta)$ водных потоков береговой линии Килийской дельты Дуная для семи дат с мая по ноябрь 2015 г.

позволяет значительно увеличить объем получаемой информации по гидрологическим параметрам водных масс, в частности характеру доминирующих течений и их интенсивности, наличию подпора водохранилища, особенностях перераспределения водных потоков и приносимых ими в устьевые области загрязнений.

1. Бермант А. Ф., Араманович И. Г. Краткий курс математического анализа для вузов: Учеб. пособие для вузов. — М.: Наука, 1971. — 736 с.
2. Гидрология дельты Дуная / Под ред. В. Н. Михайлова. — М.: ГЕОС, 2004. — 448 с.
3. Дубняк С. С. Эколого-гидроморфологический анализ биотопической структуры крупных равнинных водохранилищ // Географ. вестник. — 2013. — № 3 (26). — С. 107—120.
4. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. — М., 1978. — 848 с.
5. Федоровский А. Д., Сиренко Л. А., Суханов К. Ю., Якимчук В. Г. Спектральные и пространственно-частотные информативные признаки дешифрирования водных ландшафтов на аэрокосмических снимках // Гидробиол. журн. — 2002. — 38, № 1. — С. 87—95.
6. Янутш Д. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. — М: Недра, 1991. — 240 с.
7. Ali Saremi, Mohammad Hossein Karimi Pashaki, Hosein Sedghi, Amin Rouzbahani, Amin Saremi. Simulation of river flow using Fourier series models // Int. Conf. on Environmental and Computer Science IPCBEE. — Singapore: IACSIT Press, 2011. — 19. — P. 133—138.
8. Soheil Ghareaghaji Zare, Mohammad Hossein Karimi Pashaki, Hosein Sedghi. Fourier analysis models and

their application to river flow's prediction // The 1st Int. Applied Geological Congress. — Mashad Branch, Iran: Department of Geology, Islamic Azad University, 2010. — P. 510—514.

Стаття надійшла до редакції 08.12.16

REFERENCES

1. Bermant A. F., Aramanovich I. G. A short course of mathematical analysis for technical schools: Textbook for higher technical schools, 736 p. (Nauka, Moscow, 1971) [in Russian].
2. Hydrology of the Danube Delta / Ed. by V. N. Mikhailov, 448 p. (GEOS, Moscow, 2004) [in Russian].
3. Dubnyak S. S. Ecological-hydromorphological analysis of the biotopic structure of large plain reservoirs [Jekologogidromorfologicheskij analiz biotopicheskoy struktury krupnyh ravninnyh vodohranilishh]. Geographical Bull., 3 (26), 107—120 (2013) [in Russian].
4. Rabiner L., Gould B. Theory and application of digital signal processing, 848 p. (Moscow, 1978) [in Russian].
5. Fedorovsky A. D., Sirenko L. A., Sukhanov K. Yu., Yakimchuk V. G. Spectral and spatial-frequency informative features of interpretation of water landscapes on aerospace photographs [Spektral'nye i prostranstvenno-chastotnye informativnye priznaki deshifrirovaniya vodnyh landshaftov na ajerokosmicheskikh snimkah]. Hydrobiol. J., 38 (1), 87—95 (2002) [in Russian].
6. Yanutsh D. A. Decoding aerospace images, 240 p. (Subsoil, Moscow, 1991) [in Russian].
7. Ali Saremi, Mohammad Hossein Karimi Pashaki, Hosein Sedghi, Amin Rouzbahani, Amin Saremi. Simulation of river flow using Fourier series models. Int. Conf. on Environmental and Computer Science IPCBEE, 19, 133—138 (2011).

8. *Soheil Ghareaghaji Zare, Mohammad Hossein Karimi Pashaki, Hosein Sedghi*. Fourier analysis models and their application to river Flow's prediction. The 1st International Applied Geological Congress, 510—514, (Mashad Branch, Iran, Department of Geology, Islamic Azad University, 2010).

О. Д. Федоровский¹, А. В. Хижняк¹,
Т. М. Дьяченко², В. Г. Якимчук¹, Д. Л. Підгорняк¹,
К. Ю. Суханов¹, О. В. Томченко¹

¹ Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», Київ

² Інститут гідробіології Національної академії наук України, Київ

КОСМІЧНИЙ МОНІТОРИНГ ВОДНИХ ПОТОКІВ ГИРЛОВИХ ОБЛАСТЕЙ РІЧОК (НА ПРИКЛАДІ ДНІПРА ТА ДУНАЮ)

Викладено спосіб оцінки водних потоків гирлових областей річок за структурними характеристиками з використанням залежності нормованої азимутальної спектральної щільності від кутового напрямку. На основі інформації космічного моніторингу виконано порівняльний аналіз гідрологічних характеристик гирла Дніпра і Кілійської дельти Дунаю за 1986 і 2015 рр. При цьому було встановлено, що спектри зображень гирлової ділянки Дніпра за 1986 і 2015 роки практично не змінилися ні за інтенсивністю, ні по азимутальному розташуванню, на відміну від дельти Дунаю, де за досліджуваний період спостерігаються істотні зміни водних потоків.

Ключові слова: космічний моніторинг, гідрологічні характеристики, спектр Фур'є.

О. Д. Федоровский¹, А. В. Хижняк¹,
Т. Н. Диаченко², В. Г. Якимчук¹, Д. Л. Підгорняк¹,
К. Ю. Суханов¹, О. В. Томченко¹

¹ State Institution «Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine», Kyiv

² Institute of Hydrobiology of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

SPACE MONITORING OF WATER STREAM IN ESTUARIAL AREAS (BY THE EXAMPLE OF THE DNIEPER AND THE DANUBE)

We propose a new method of estimation of river estuary water stream by structure characteristic. The method is based on the dependence of normalized azimuthal spectral density on the angular direction. We applied this method to a space monitoring data and conducted a comparative analysis of hydrological characteristics of the Dnieper estuary and the Kilia Danube Delta in a period from 1986 to 2015. It was found that the image spectra of the Dnieper mouth area from 1986 to 2015 have not changed either in intensity or in azimuth location, as opposed to the Danube delta, where the water flows have endured significant changes during the analyzed period.

Keywords: space monitoring, hydrological characteristics, Fourier spectrum.