

PODNOSZENIE WIZUALNEJ CZYTELNOŚCI OBRAZÓW SATELITARNYCH PRZEZ ICH CYFROWE PRZETWORZENIE

Najpowszechniej wykorzystywane spośród obrazów satelitarnych są obrazy landsatowskie, wykonywane w systemie MSS¹. Każde z nich obejmuje obszar około 34 tys. km² (185 × 185 km) i jest zbudowane z około 8 mln elementarnych pól, zwanych pikselami². System MSS przekazuje obraz Ziemi w czterech zakresach (kanałach) spektralnych, a zatem pełny zbiór pikseli dla tej samej powierzchni objętej jedną sceną jest czterokrotnie większy i wynosi około 32 mln. Na obrazie każdy piksel jest reprezentowany przez liczbę o wartości od 0 do 63, będącą zakodowaną wielkością odbicia spektralnego w przyjętej 64-stopniowej skali odpowiadającej względnej rozpiętości intensywności tego odbicia od 1 do 100. Oznacza to, że najmocniejszy sygnał w danym kanale zostanie zakodowany jako liczba 63, a sygnały słabsze (aż do takich, które stanowią zaledwie 1% sygnału maksymalnego) otrzymają kody mniejsze, aż do zera włącznie. W ten sposób obraz wielospektralny zostaje zamieniony na wielomilionowy zbiór liczb i jest transmitowany na Ziemię.

Stacje odbiorcze na Ziemi przejmują transmisję z satelity i dokonują wstępnego przetworzenia danych, na co składa się m. in. ich dekompresja i kalibracja na podstawie charakterystyk detektorów skanera. W efek-

* Mgr inż. Jacek Drachal, Instytut Geodezji i Kartografii, ul. Jasna 2/4, 00-950 Warszawa

¹ MSS — (ang. Multispectral Scanner System) wielospektralny system skanerowy.

² Piksel — (ang. picture's element) skrót na określenie elementu obrazu w obrazach skanerowych.

cie, kodom obrazowym są nadawane nowe wartości, ze skali powiększonej do 256 stopni, i według tego standardu obraz zapisany na szpuli taśmy magnetycznej trafia do rąk użytkownika³.

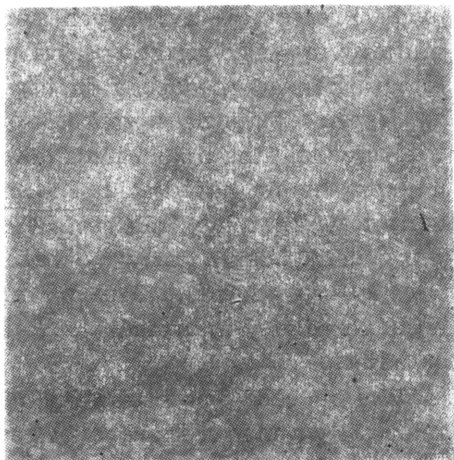
Do wyświetlenia obrazu jest konieczny zestaw urządzeń sterowanych przez komputer. Co najmniej jedno urządzenie zestawu jest typu analogowo-cyfrowego, tzn. ma możliwość zamiany danych cyfrowych na obraz tonalny. Do takich urządzeń należą m. in. monitor, drukarka mozaikowa i fotoploter, który utrwała obraz w postaci dobrej klasy zdjęcia fotograficznego, materiału najpowszechniej stosowanego w pracach interpretacyjnych.

We wszystkich urządzeniach typu analogowo-cyfrowego występuje problem właściwej prezentacji danych, związany z charakterystyką tych urządzeń. Urządzenia analogowe bowiem zwykle nie reagują „liniowo” na zmiany sygnału cyfrowego, stąd bardzo łatwo o zniekształcenie danych. Prezentacja cyfrowych danych obrazowych np. na zdjęciu fotograficznym jest dodatkowo utrudniona, gdyż poza znajomością materiału fotograficznego (będącego tu częścią „urządzenia analogowego”) wymaga jeszcze przyjęcia kompromisowego rozwiązania ze względu na niewielką, w stosunku do szczegółowości skali cyfrowej, faktyczną rozróżnialność tonów na zdjęciu. Zdjęcie, nawet poprawne pod względem fotograficznym, nigdy nie jest w stanie przedstawić w sposób zróżnicowany pełnej skali tonów „obrazu” cyfrowego. Dane cyfrowe wymagają więc stosownego przetworzenia, które z jednej strony dokonywałoby wyboru pożądanej informacji, a z drugiej — zapewniałoby jej utrwalenie na zdjęciu.

W tym celu jest stosowana technika tzw. rozciągania kontrastu. Jej zalety łatwo można przeanalizować na przykładzie.

Do przetworzenia wybrano fragment obrazu zarejestrowanego w kanale czerwonym sceny 203 — 25 LANDSAT z dnia 5 czerwca 1979 roku, obejmujący obszar 25×25 km, położony na wschód od Krakowa, z kompleksem leśnym Puszczy Niepołomickiej w centrum zdjęcia (fot. 1—8). Do zamiany obrazu cyfrowego na analogowy wykorzystano fotoploter firmy OPTRONICS o 256-stopniowej skali tonalnej. W zapisie cyfrowym na wybrany fragment składa się 250 tysięcy pikseli. Jakie są ich wartości, trudno przewidzieć, chociaż byłyby to bardzo cenna informacja przy naświetlaniu zdjęcia. Wiadomo, że mieszczą się w zakresie 0—255, ale czy przyjmują wszystkie wartości z tego zakresu? Raczej nie, o czym świadczy fot. 1. Zdjęcie ma niski kontrast i małe zróżnicowanie tonów, więc niewiele na nim widać.

³ Wybrane pozycje bibliograficzne dotyczące omawianej tematyki zestawiono na końcu pracy bez cytowania w tekście.

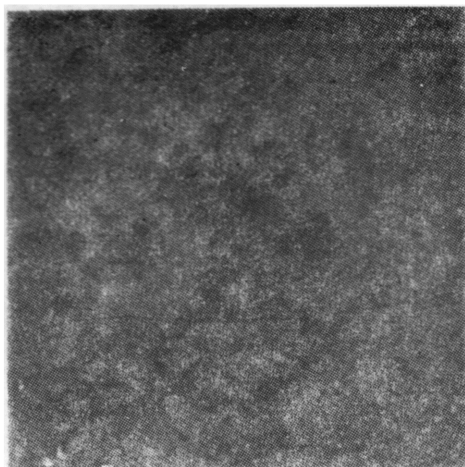
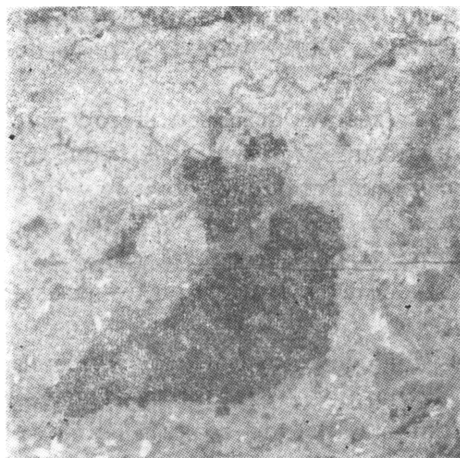


Fot. 1. Wizualizacja oryginalnego zapisu cyfrowego LANDSAT

Phot. 1. Visualization of original digital LANDSAT record

Fot. 2. Liniowe rozciągnięcie kontrastu

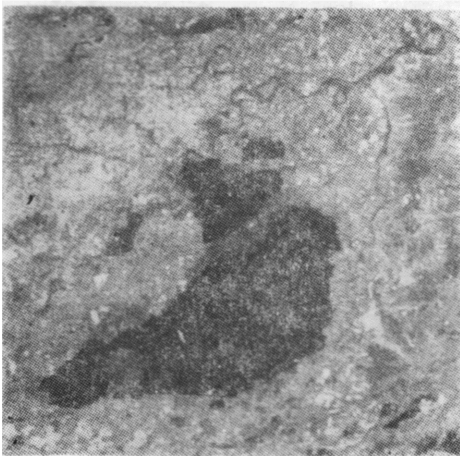
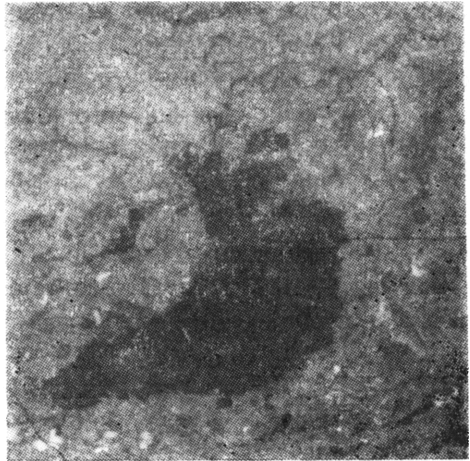
Phot. 2. Linear contrast stretch



Fot. 3. Przekształcenie kontrastu wg funkcji wykładniczej

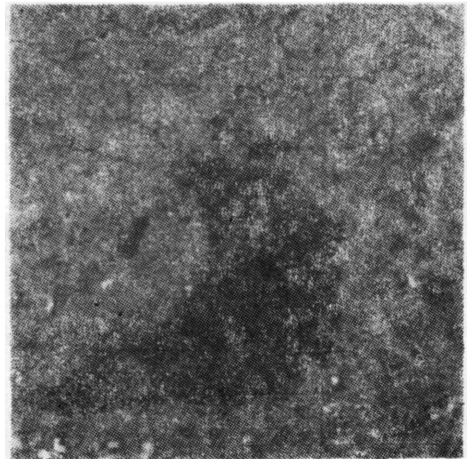
Phot. 3. Exponential contrast stretch

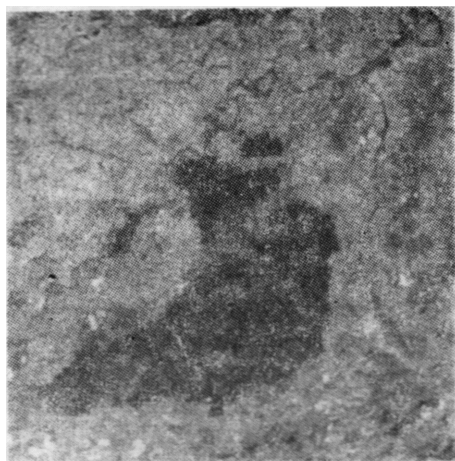
**Fot. 4. Przekształcenie kontrastu
wg funkcji kwadratowej**
Phot. 4. Quadratic contrast stretch



**Fot. 5. Przekształcenie kontrastu
wg funkcji pierwiastka kwadratowego**
Phot. 5. Square root contrast stretch

**Fot. 6. Przekształcenie kontrastu
wg funkcji logarytmicznej**
Phot. 6. Logarithmic contrast stretch



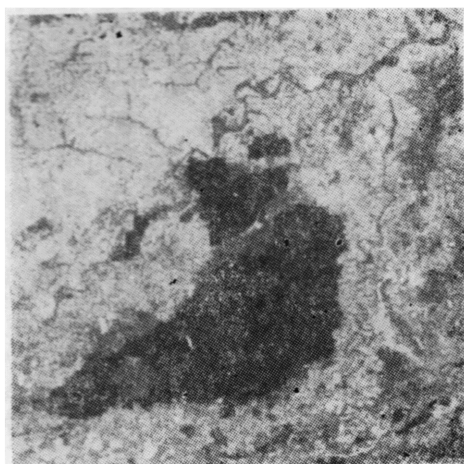


Fot. 7. Efekt zastosowania kryterium „zrównoważonego” histogramu

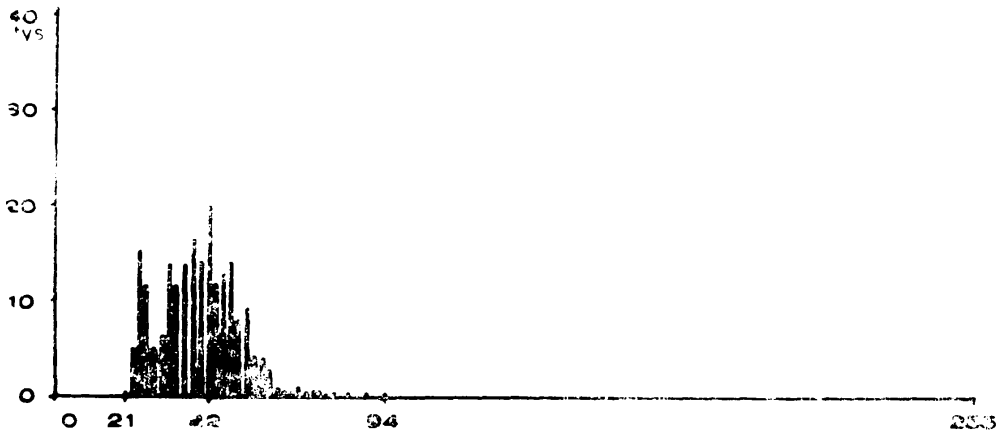
Phot. 7. Result of „balancing” the histogram

Fot. 8. Efekt „wyrównania” histogramu

Phot. 8. Result of „equalizing” the histogram



Spróbujmy poznać strukturę zbioru pikseli tworzących to zdjęcie. Skoro nie występuje na nim ani ton biały, ani zdecydowanie czarny, oznacza to, że prawdopodobnie liczb 255 i 0 wcale w zbiorze nie ma. Przekonujemy się o tym, oglądając histogram, czyli wykres ilustrujący, jakie wartości pikseli są w zbiorze i jak licznie występują (rys. 1). Okazuje się, że rzeczywiście 0 nie występuje w zbiorze, liczbą najmniejszą jest dopiero 21, a największą — 94. Najwięcej jest liczb o wartości 42, a 98% liczb zbioru mieści się w zakresie 22—58, co stanowi ledwie siódmą część 256-stopniowej skali. Wobec tak dużego niedopasowania zakresu (obrazu cyfrowego i urządzenia analogowego) nie da się wykonać dobrego zdjęcia, mimo iż obraz cyfrowy jest zróżnicowany „tonalnie” — ma zarejestrowane 74 wartości, czyli i tak zdecydowanie więcej niż może oddać odbitka fotograficzna. Nasuwa się tedy wniosek, że źródłem

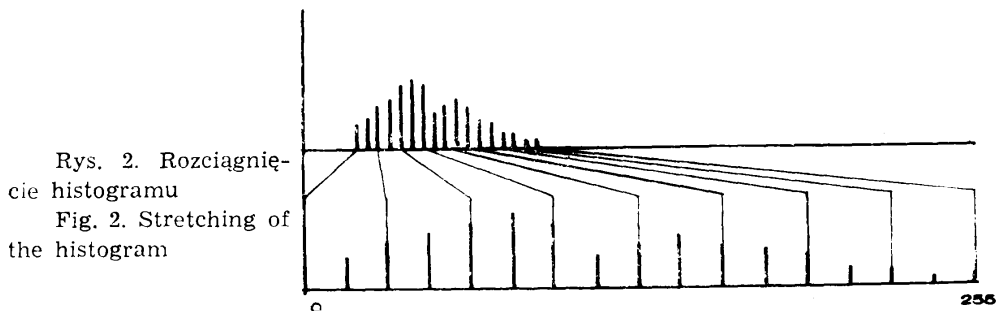


Rys. 1. Histogram oryginalnego zapisu cyfrowego LANDSAT
 Fig. 1. Histogram of original digital LANDSAT record

małej czytelności zdjęcia jest właśnie skupienie wszystkich wartości tworzących go pikseli na małym odcinku skali tonalnej.

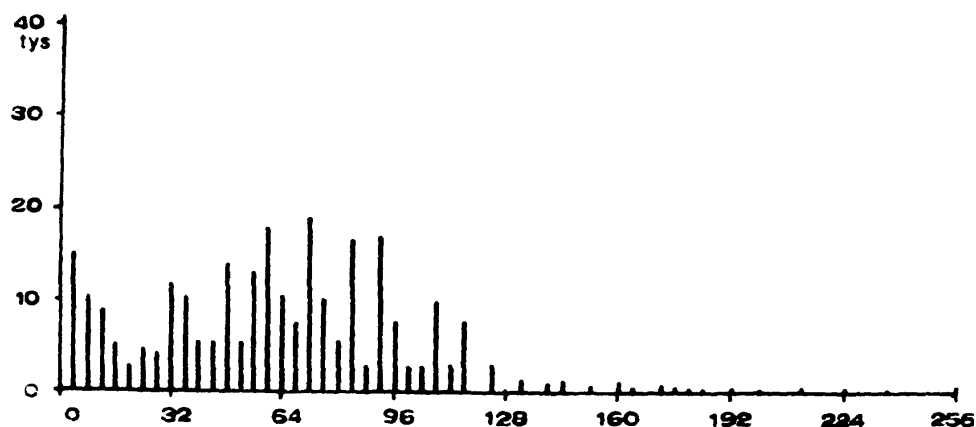
Z uwagi na fakt, że obraz w postaci cyfrowej stanowią liczby, których bezwzględne wartości brane pojedynczo nie mają ścisłego odniesienia do rzeczywistości, a stanowią informację jedynie jako uporządkowany, wewnątrznie zróżnicowany zbiór, przeto przeskalowanie takiego zbioru z zachowaniem pewnych reguł jest logicznie uzasadnione, a w naszym przypadku może znacznie poprawić jakość zdjęcia.

Poszczególne wartości zbioru, skupione na małym odcinku ciemnych tonów, należałoby „rozrzucić” po całej skali, nie zmieniając liczby pikseli mających daną wartość, ani nie zmieniając ich wzajemnej kolejności (rys. 2). Uzyskamy w ten sposób dopasowanie zakresów, co z kolei powinno objawić się wystąpieniem na zdjęciu większego zróżnicowania tonów oraz pojawieniem się tonów skrajnych: czarnego i białego. Najłatwiej wykonać przeskalowanie najpierw wartości pikseli przez współczynnik zmiany skali (tu wynosi on $255/74$), a następnie odjąć od nich pewną stałą, tak aby wartości pikseli znalazły się w zakresie 0—255. Te



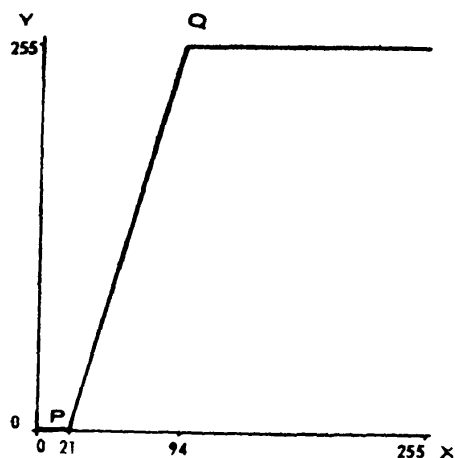
Rys. 2. Rozciągnięcie histogramu
 Fig. 2. Stretching of the histogram

dwa proste działania arytmetyczne można zinterpretować jako „rozciągnięcie” histogramu.



Rys. 3. Histogram zbioru obrazowego po liniowym rozciągnięciu kontrastu
Fig. 3. Histogram of image file after linear contrast stretching

Histogram tak przekształconego zbioru przedstawia rys. 3. Ze względu na wiele obliczeń (oba działania należy powtórzyć w naszym przykładzie 250 tysięcy razy) operację tę wykonuje komputer. Dokonując przeskalowania innego zbioru obrazowego, należy na nowo wyznaczyć parametry przekształcenia, zawsze jednak będzie ono miało tę samą formę algebraiczną, którą można zapisać wzorem funkcji liniowej $y = A \cdot x + B$. We wzorze tym wartość pikseli przed przeskalowaniem wyraża zmienna x , A jest współczynnikiem zmiany skali, B wyraża przesunięcie histogramu do jej początku, a zmienna y jest nową, obliczoną wartością piksela. Wykres funkcji rozpatrywanego przykładu przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Funkcja liniowa
Fig. 4. Linear function

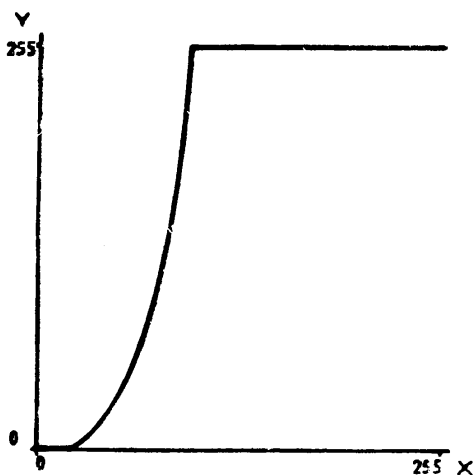
Zauważmy, że istotny dla nas jest tylko fragment wykresu funkcji liniowej, zawarty między punktami P i Q , odpowiadający zmianie wartości pikseli od 21 do 94. Zdjęcie naświetlone na podstawie przetworzonego zbioru wygląda zdecydowanie lepiej (fot. 2). Łatwiej określić zasięg kompleksu leśnego Puszczy Niepołomickiej, bieg Wisły i jej dopływów, wyróżnić obszary uprawne. Zdjęcie nadaje się do interpretacji, a zatem można powiedzieć, że cała operacja okazała się celowa.

Wróćmy jednak jeszcze raz do wykresu funkcji, która umożliwiła taką poprawę własności interpretacyjnych zdjęcia. Po połączeniu punktów P i Q fragmentem dowolnej krzywej zasada przekształcenia będzie zachowana — nastąpi przeskalowanie zbioru, z tą różnicą, że jego histogram zostanie „rozciągnięty” nieproporcjonalnie na swej długości. Prześledźmy tę sytuację na przykładzie czterech funkcji: dwóch, których wykresy są „wkłęsłe” i dwóch o wykresach „wypukłych” (rys. 5—8). Będą to:

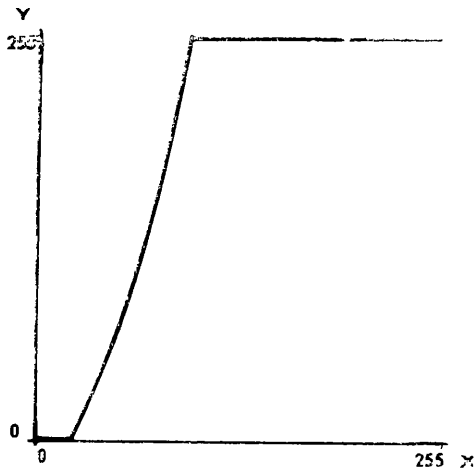
- | | |
|-------------------------------------|----------------|
| a) funkcja wykładnicza | $y = e^x$ |
| b) funkcja kwadratowa | $y = x^2$ |
| c) funkcja pierwiastka kwadratowego | $y = \sqrt{x}$ |
| d) funkcja logarytmu naturalnego | $y = \ln x$ |

Histogramy zbioru po przekształceniu przedstawiono na rys. 9—12.

Zauważmy, że funkcje „wkłęsłe” przesunęły histogram w lewo, „wypukłe” natomiast — w prawo. Przekształcenie zdjęć według tych funkcji spowoduje prawdopodobnie zmianę ogólnej tonacji zdjęć odpowiednio na ciemniejszą i jaśniejszą w stosunku do rezultatu przekształcenia liniowego.

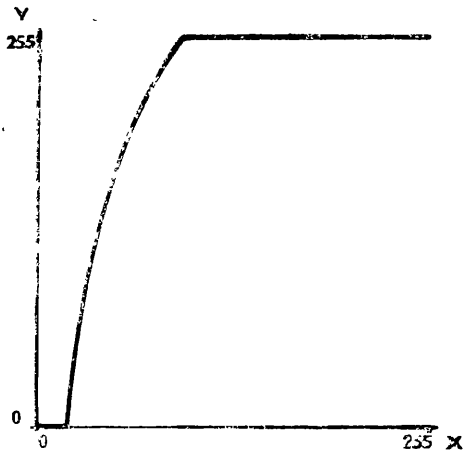
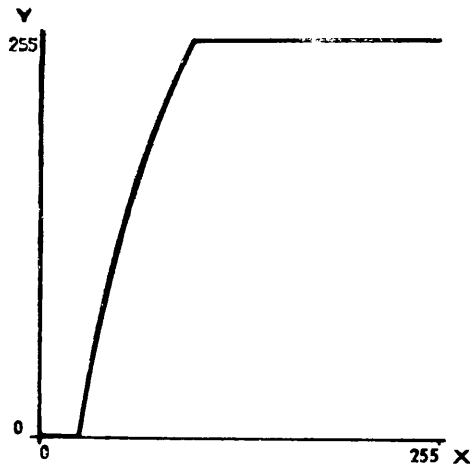


Rys. 5. Funkcja wykładnicza
Fig. 5. Exponential function

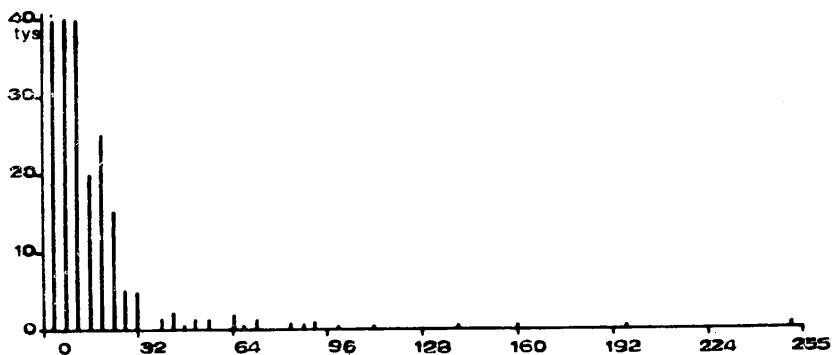


Rys. 6. Funkcja kwadratowa
Fig. 6. Quadratic function

Rys. 7. Funkcja pierwiastka kwadratowego
Fig. 7. Square root function

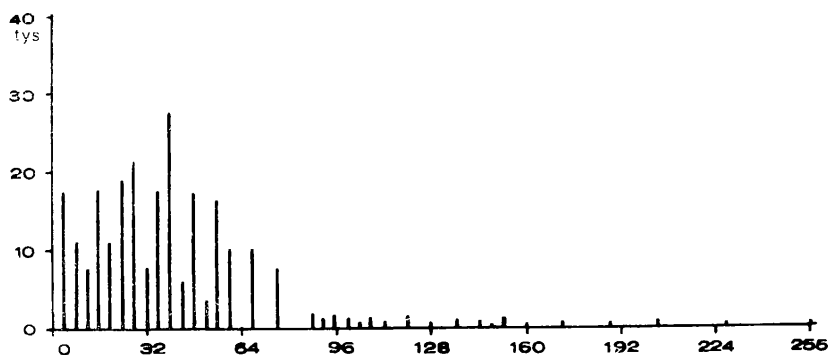


Rys. 8. Funkcja logarytmiczna
Fig. 8. Logarithmic function



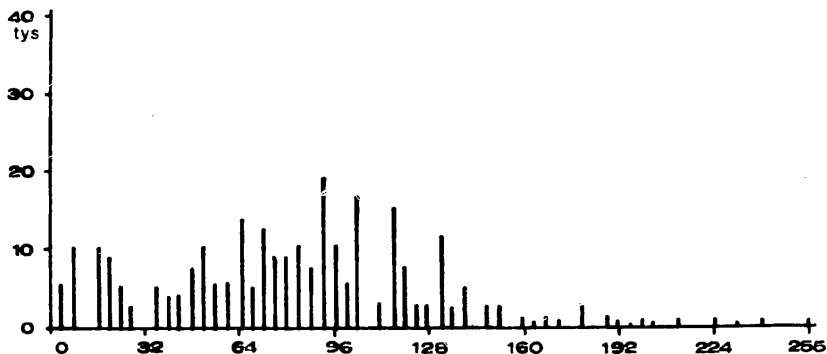
Rys. 9. Histogram zbioru obrazowego po przekształceniu kontrastu wg funkcji wykładniczej

Fig. 9. Histogram of the image file after exponential function stretching of the contrast



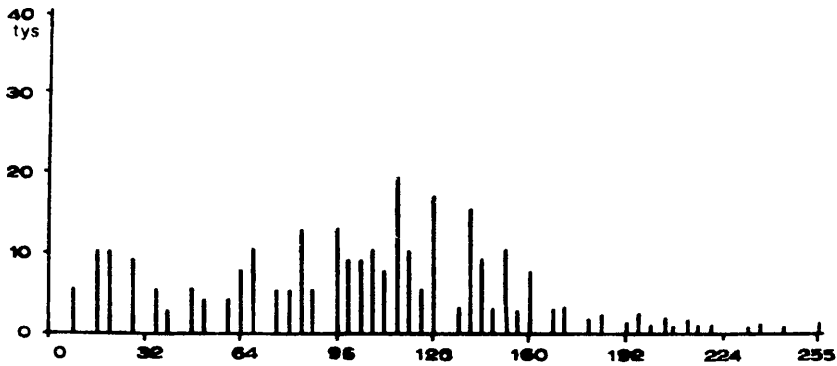
Rys. 10. Histogram zbioru obrazowego po przekształceniu kontrastu wg funkcji kwadratowej

Fig. 10. Histogram of the image file after quadratic function stretching of the contrast



Rys. 11. Histogram zbioru obrazowego po przekształceniu kontrastu wg funkcji pierwiastka kwadratowego

Fig. 11. Histogram of the image file after square root function stretching of the contrast



Rys. 12. Histogram zbioru obrazowego po przekształceniu kontrastu wg funkcji logarytmicznej

Fig. 12. Histogram of the image file after logarithmic function stretching of the contrast

Rzeczywiście, jak widać na fot. 3—6 zdjęcia różnią się tonacją, ale nastąpiła też pewna zmiana w ich czytelności. Zdjęcie 6 (funkcja logarytmiczna) pozwala wyróżnić najwięcej szczegółów w obrębie lasu, zaś 3 (funkcja wykładnicza) jak żadne z pozostałych pokazuje wyraźnie zróżnicowanie obiektów bardzo jasnych. Odbywa się to jednak kosztem stłumienia informacji w pozostałej części skali, co najlepiej widać na tym właśnie zdjęciu np. w obrębie lasu.

Istotną poprawę kontrastu zdjęcia można uzyskać, operując nawet funkcją liniową, jeśli zdecydujemy się pominąć niewielką część informacji, które nie są dla nas akurat istotne. W rozważanym przykładzie pominięcie jedynie 2% ogólnej liczby pikseli zmniejszy zakres o 37 wartości, czyli dwukrotnie, a to z kolei pozwoli na znacznie większe wzmocnienie kontrastu (fot. 7). Jak widać, zdjęcie stało się bardziej czytelne w porównaniu z poprzednią wersją liniowego rozciągnięcia kontrastu, zwłaszcza lepiej zostały zróżnicowane obszary uprawne, ale daje się też zauważyć pewna generalizacja w tonach najjaśniejszych. Pominięte informacje zostały bowiem przedstawione jednym tonem — białym.

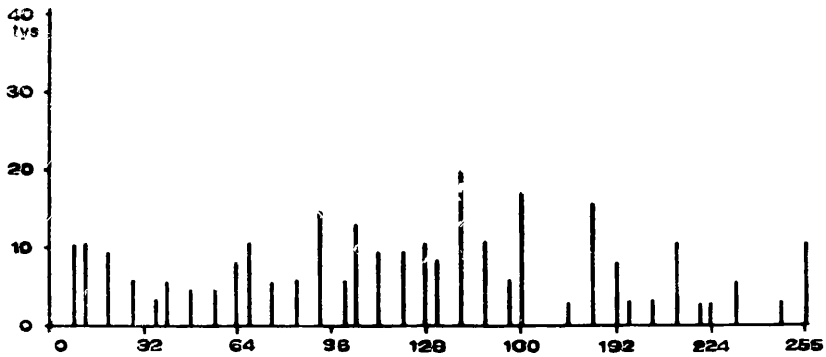
O ile w rozważanym przykładzie „odcięcie” 2% informacji nie jest konieczne, to jednak sama metoda okazuje się przydatna dla dużej liczby innych obrazów. Jeśli obraz zakodowany jest na znacznej części skali i jest mimo wszystko słabo czytelny (a bywa tak bardzo często, przykładem może być fot. 3), to rozciągnięcie kontrastu z zachowaniem 100% informacji cyfrowych niewiele pomaga, i wtedy selekcja jest konieczna. Jak jej dokonać? Nie wolno na pewno przekraczać pewnego procentu powierzchni zdjęcia, zwłaszcza powinno się unikać skupień pikseli o skrajnych tonach, gdyż są wtedy bardziej widoczne.

Do przetworzenia zdjęcia przedstawionego na fot. 7 zastosowano sposób, który można określić jako „równoważący” histogram zbioru. Jego „ciemniejsza” połowa (czyli lewa część histogramu obrazu oryginalnego) została przekształcona na wartości od 0 do 127, a „jaśniejsza” — na wartości pozostałe, od 128 do 255. Takie przekształcenie gwarantuje zawsze dobry kontrast zdjęć i powtarzalność tonacji. Zastosowano w tym wypadku bardzo dobre kryterium, ułatwiające z jednej strony selekcję informacji, a z drugiej — zwracające uwagę na dodatkowe wiadomości zawarte w histogramie.

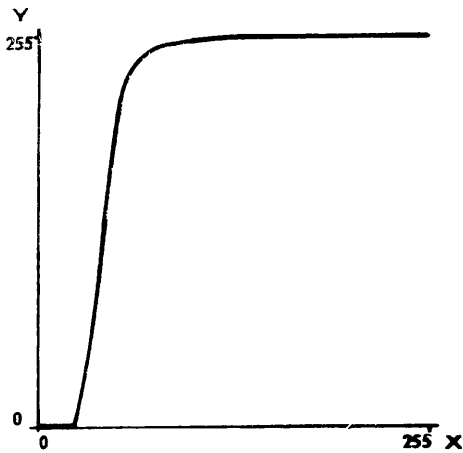
Do tej pory z histogramu odczytywaliśmy jedynie zakres zbioru obrazowego, czyli najmniejszą i największą wartość tonalną jego pikseli. Widzieliśmy jak następuje rozciągnięcie histogramu pod wpływem funkcji liniowej i jak funkcje krzywoliniowe powodują dodatkowo przemieszczenie jego maksimum, mimo iż pozostaje on nadal rozciągnięty na całą skalę od wartości 0 do 255. Okazuje się, że poza zakresem zbioru obrazowego ważna jest również liczebność elementów przyjmujących poszczególne wartości tonalne. Jeśli znamy całkowitą liczbę pikseli zbioru (np. 250 tys.), to na podstawie histogramu możemy przeprowadzić sumowanie i podzielić zbiór na dwie, w przybliżeniu równoliczne, części (w naszym przykładzie od wartości 21 do 38 i od 39 do 94). Wyznaczymy w ten sposób jak gdyby środek ciężkości histogramu. Jeśli zastosujemy funkcję, która przekształci zbiór tak, że środek ciężkości przejdzie na wartość 128 na rozciągniętej skali, to uzyskamy właśnie obraz o „zrównoważonym” histogramie z efektem widocznym na fot. 7.

Ewolucją takiego statystycznego ujęcia przekształcenia kontrastu jest metoda wyrównania histogramu. Polega na wyznaczeniu funkcji, która nie tylko zrównoważy histogram, ale spowoduje także jego rozciągnięcie, że histogram stanie się płaski. To z kolei spowoduje, że każdy ton zajmie na zdjęciu pewną równą część jego całkowitej powierzchni. Wykres takiej funkcji dla naszego obrazu, wyrównany histogram i przekształcone zdjęcie przedstawiono kolejno na rys. 13, 14, 15 i na fot. 8.

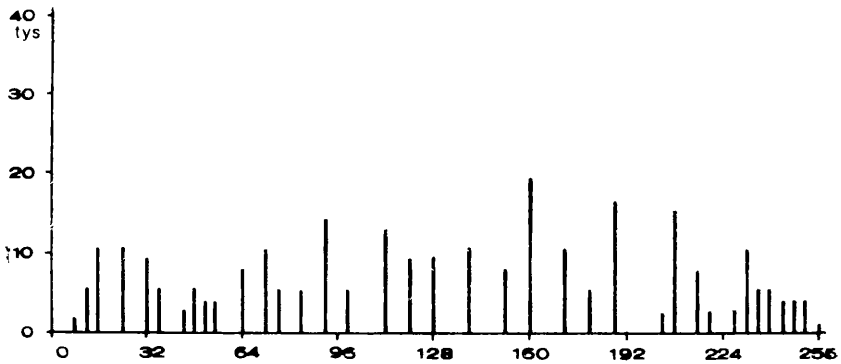
Jak widać z rys. 15, histogram nie został wyrównany dosłownie, a jedynie w sensie aproksymacji, tzn. oscyluje wokół pewnej prostej, równoległej do osi x . Przekształcenie to daje bardzo dobry efekt wizualny. Zdjęcie stało się bardziej przejrzyste, na co niewątpliwie miało wpływ oszczędniejsze korzystanie z tonów średnich podczas prezentacji jego treści informacyjnej. Można powiedzieć, że w porównaniu z dotychczas omówionymi przetworzeniami nastąpiło dodatkowo lokalne wzmocnienie kontrastu i tym samym znaczna poprawa wyróżnialności szczegółów.



Rys. 13. Histogram zbioru obrazowego po zrównoważeniu
 Fig. 13. Histogram of the image file after balancing

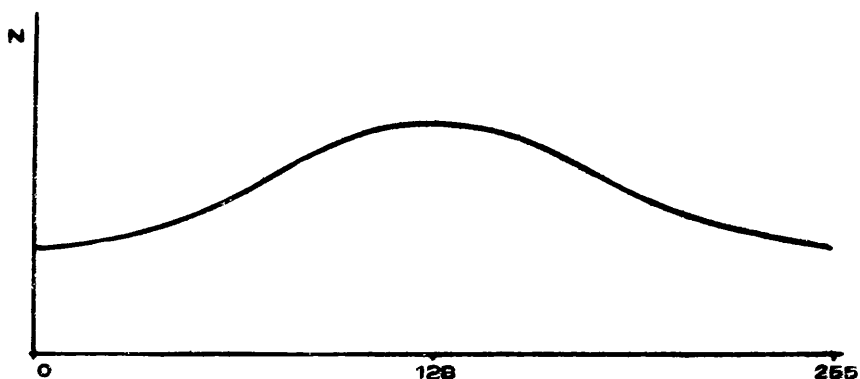


Rys. 14. Funkcja wyrównująca histogram
 Fig. 14. Function equalizing the histogram



Rys. 15. Histogram zbioru obrazowego po wyrównaniu
 Fig. 15. Histogram of the image file after equalizing

Na tej samej zasadzie co przekształcenie wyrównujące histogram opiera się między innymi tzw. przekształcenie gaussowskie. Różnica polega na tym, że histogram przetworzonego zbioru zbliża się kształtem nie do prostej, jak poprzednio, ale do krzywej rozkładu normalnego Gaussa (rys. 16). Zmieniając w sposób ciągły jej parametry, można uzyskać dowolną wypukłość lub spłaszczenie, łącznie z prostą, jako przypadkiem szczególnym.



Rys. 16. Krzywa rozkładu normalnego Gaussa
Fig. 16. Gaussian normal distribution curve

Przedstawione metody wzmacniania kontrastu obrazu satelitarnego, od przekształcenia liniowego po gaussowskie, stanowią spory arsenał środków stosowanych w celu uzyskania optymalnego pod względem zawartości informacyjnej materiału do interpretacji. Poza tym głównym zastosowaniem manipulowanie kontrastem ma sporo zastosowań szczegółowych. Pozwala np. wyeliminować wpływ krzywoliniowej charakterystyki materiału fotograficznego i tym samym uniknąć strat informacji na skrajach skali tonalnej. Umożliwia dopasowanie tonalne sąsiednich zdjęć tworzących szereg lub blok. W coraz częściej stosowanej metodzie komponowania trzech wyciągów spektralnych w jeden barwny obraz pomaga wzajemnie zgrać kontrasty tych wyciągów. W opracowaniach opierających się na porównaniu zdjęć uzyskanych w różnych latach lub porach roku cyfrowe metody przetwarzania umożliwiają dokładne odczytanie zaistniałych zmian, nie tylko geometrycznych, ale i tonalnych.

Tych kilka wybranych przykładów pokazuje, jak różne mogą być zastosowania przedstawionych tu metod, jeśli tylko dobrze zostanie poznana ich zasada. Dlatego tak wiele uwagi poświęcono omówieniu strony matematycznej przetworzeń. Znając bowiem stronę teoretyczną metody,

łatwiej ją zastosować, widzi się zarówno jej możliwości, jak i ograniczenia. Nawet jeśli nie stosujemy jej, lecz korzystamy jedynie z gotowego zdjęcia, łatwiej ocenić jego zawartość informacyjną i dokonać interpretacji.

LITERATURA

- Manual of remote sensing*, American Society of Photogrammetry, 1975, Falls Church, Virginia.
- Pratt W., 1977: *Digital image processing*, John Wiley and Sons, New York.
- Remote sensing for environmental sciences*, red. E. Schanda, Ecological Studies n° 18, 1976, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York.
- Sabins F., 1978: *Remote sensing, principles and interpretation*, W. H. Freeman and company, San Francisco.
- Short N., 1982: *The Landsat tutorial workbook*, NASA, Washington D.C.

ЯЩЕК ДРАХАЛЬ

ПОВЫШЕНИЕ ВУЗУАЛЬНОЙ ЧЕТКОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПУТЕМ ИХ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ

Резюме

Многоспектральные изображения поверхности земли, передаваемые с американского спутника LANDSAT, выполнялись по сканерной системе. Наземные приемные станции регистрируют квантифицированное изображение при помощи цифровых кодов на магнитной ленте. Для воспроизведения действительного аналогового изображения на основе его цифровой записи используется комплект устройств, управляемых компьютером, образующий систему переработки изображений. Важной частью системы является сканер, действующий в обратном направлении по отношению к сканеру, размещенному на спутнике, который позволяет реверсировать процесс квантификации и кодирования изображения.

Непосредственное воспроизведение оригинальной цифровой записи не дает хорошего визуального эффекта как из-за небольшого контраста самого объекта — регистрируемой поверхности Земли, так и из-за искажения, имеющего место во время преобразования цифровой информации на аналоговую. Чтобы получить отчетливое изображение с соответствующим контрастом и деталями, т.е. такое, какое можно было бы дешифровать, необходимо преобразовать цифровые данные. Применяемые преобразования, целью которых является расшифровка кодов, не искажают действительности и не вводят новых информаций. Эти преобразования, известные под названием растяжение контраста, можно разделить на две группы. Первые состоят в переградировке кодов

изображения согласно выбранной стандартной функции — показательной линейной или же логарифмической. Преобразования второй группы не используют готовых функции, однако каждый раз определяют их на основе тональной структуры изображения.

Иллюстрацией во всех представленных примерах является фрагмент сцены 203-25 LANDSAT от 5 июня 1979 г.

JACEK DRACHAL

IMPROVING THE VISUAL QUALITY OF SATELLITE IMAGES BY DIGITAL PROCESSING

S u m m a r y

Landsat multispectral images of the earth's surface are made by the scanner system. Quantified images are transmitted to ground receiving stations, then digitally coded and recorded on magnetic tape. To reproduce the real, analog picture from its digital record a computer-controlled image processing system is used. The essential part of the system is a stationary scanner working in the opposite direction to that mounted on board the satellite, enabling reversal of the picture quantification and coding process. Simple reproduction of the raw digital data gives a poor visual effect due both to low contrast of the object studied to deterioration of image data during the digital to analog recoding process. To obtain maximum clarity and contrast, suitable for interpretation, digital data processing techniques are applied. These techniques, called „contrast stretching”, improve image quality without falsifying the data or introducing any new information. They are of two types. The first depends on multiplying each digital code of the image element by a factor calculated according to a selected standard function: exponential, linear, logarithmic, etc.

In the second type, contrast stretching is achieved by a function calculated for every image separately, according to its tonal structure. Examples of all these processing types are shown on a part of the 203-25 Landsat scene from June 5th, 1979.