

ANALIZA TEMPERATURY POWIERZCHNI TERENU MIASTA CHONGQING ORAZ JEJ KORELACJI Z WYBRANYMI FORMAMI POKRYCIA TERENU NA PODSTAWIE ZOBRAZOWAŃ PROGRAMU LANDSAT

ANALYSIS OF THE SURFACE TEMPERATURE OF THE CHONGQING CITY AND ITS CORRELATION WITH SELECTED LAND COVER FORMS BASED ON LANDSAT IMAGERY

Julia Kajetańczyk - Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Politechnika Wrocławska

DOI:10.5604/01.3001.0055.5143

Streszczenie

Rozwój obszarów miejskich wprowadza istotne zmiany w mikroklimacie miast, w tym w temperaturze powierzchni terenu, prowadząc do zjawiska miejskiej wyspy ciepła (ang. Urban Heat Island, UHI), które negatywnie oddziałuje na jakość życia mieszkańców. Celem artykułu była analiza zmian temperatury powierzchni terenu w Chongqing w okresie 30 lat (1990-2020) oraz zbadanie zależności między otrzymanymi wynikami a formami pokrycia terenu, takimi jak roślinność i zabudowa. Do analizy wykorzystano ogólnodostępne zobrażenia programu Landsat, na podstawie których obliczono temperaturę radiacyjną, współczynnik emisyjności, wskaźniki spektralne (Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Built-up Index (NDBI), Urban Thermal Field Variance Index (UTFVI)) oraz temperaturę powierzchni terenu. Wyniki wskazują na silną korelację między formą pokrycia terenu a temperaturą powierzchni (ang. Land Surface Temperature, LST), gdzie obszary zabudowane i odsłonięte gleby przyjmują najwyższe jej wartości, podczas gdy roślinność znacząco łagodzi efekt cieplny. Ponadto wskaźnik UTFVI wykazał, że tereny o najwyższych wartościach LST doświadczają ekstremalnego dyskomfortu cieplnego. Wnioski sugerują, że struktura pokrycia terenu ma kluczowe znaczenie w kształtowaniu mikroklimatu, a działania mające na celu zwiększenie powierzchni terenów zielonych mogą przyczynić się do obniżenia LST oraz poprawy komfortu cieplnego mieszkańców.

Słowa kluczowe: temperatura powierzchni terenu, wskaźniki spektralne, forma pokrycia terenu, miejska wyspa ciepła, miasto Chongqing

Abstract

The development of urban areas introduces significant changes to the microclimate of cities, including land surface temperature, leading to the phenomenon of the urban heat island (UHI), which negatively affects residents' quality of life and health. The aim of the article was to analyze changes in land surface temperature (LST) in Chongqing over a 30-year period (1990-2020) and to examine the relationship between the obtained results and land cover types such as vegetation and built-up areas. The analysis used publicly available Landsat imagery, from which radiative temperature, emissivity, spectral indices (Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Built-up Index (NDBI), Urban Thermal Field Variance Index (UTFVI)) and land surface temperature were calculated. The results indicate a strong correlation between land cover type and LST, with built-up areas and bare soils showing the highest temperatures, while vegetation significantly mitigates the heat effect. Additionally the UTFVI index showed that areas with the highest LST values experience extreme thermal discomfort. The findings suggest that land cover structure plays a crucial role in shaping the urban microclimate and actions aimed at increasing green space coverage can contribute to lowering LST and improving thermal comfort for residents.

Keywords: land surface temperature, spectral indices, land cover type, urban heat island, city of Chongqing

Wstęp

Termin „teledetekcja” odnosi się do pozyskiwania informacji o zjawiskach oraz procesach zachodzących na powierzchni Ziemi z wykorzystaniem specjalnej aparatury umieszczonej na satelitach. Technologia ta umożliwia obserwację planety bez konieczności fizycznego kontaktu z badanym obiektem czy obszarem.

Jak podaje NASA (NASA, 2024), w praktyce teledetekcja wykorzystuje różne typy czujników - pasywne i aktywne. Pasywne instrumenty bazują na naturalnym promieniowaniu, najczęściej słonecznym, które odbija się od powierzchni Ziemi i jest rejestrowane przez czujniki. Dzięki temu można uzyskać informacje m.in. o rodzaju pokrycia terenu, temperaturze, roślinności czy właściwościach atmosferycznych. Z kolei aktywne systemy same emitują fale, a następnie mierzą ich odbicie.

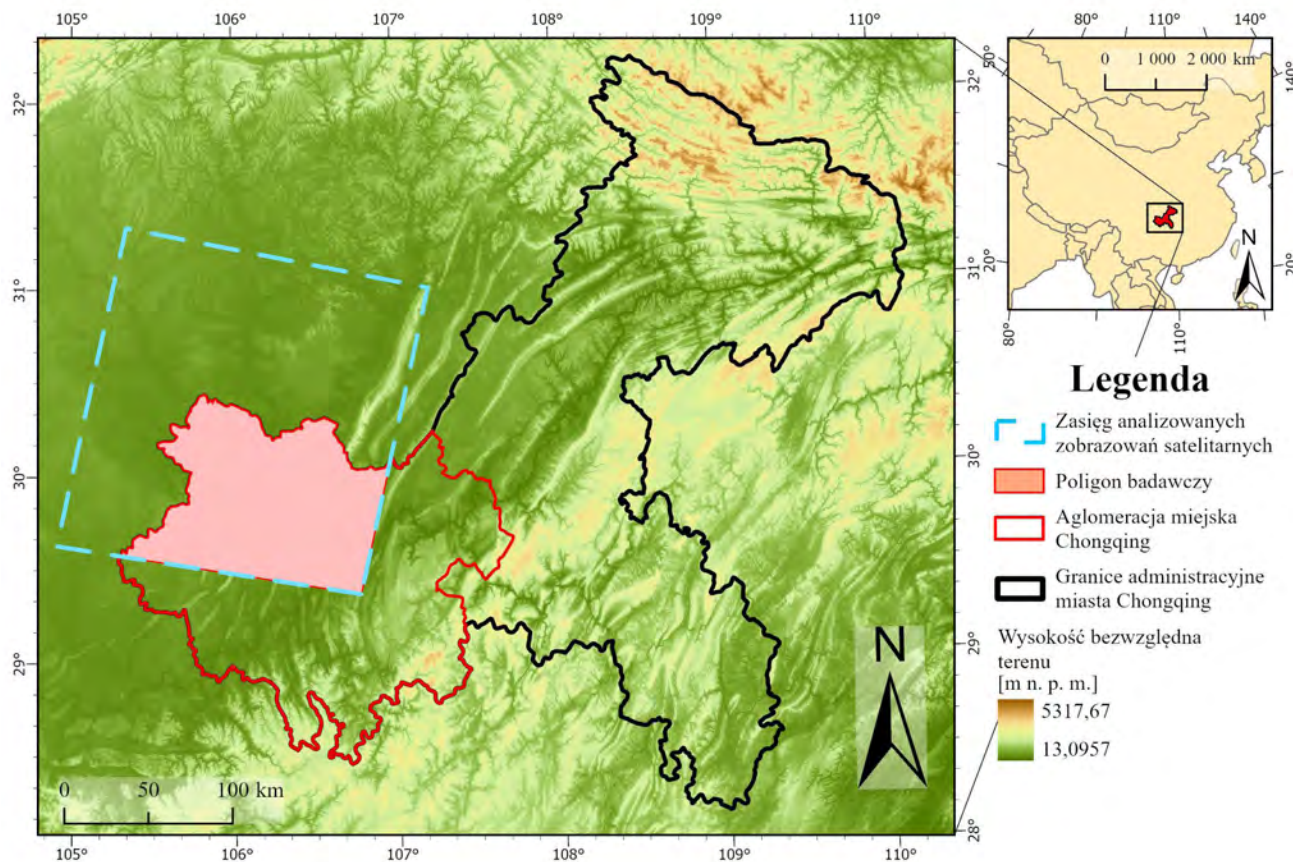
Jednym z najbardziej znanych i długoletnich programów satelitarnych dostarczających dane o powierzchni Ziemi jest misja Landsat, zarządzana przez National Aeronautics and Space Administration (NASA) oraz U.S. Geological Survey (USGS). Satelity należące do misji umożliwiają pozyskiwanie informacji o temperaturze powierzchni Ziemi dzięki kanałom termalnym, które są dostępne m.in. w sensorach Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) i Thermal Infrared Sensor (TIRS) (U.S. Geological Survey, 2024). Dane te stanowią cenne źródło wiedzy w badaniach nad wpływem działalności człowieka na środowisko oraz zmianami mikroklimatu miast.

Zastępowanie obszarów porośniętych szatą roślinną powierzchniami sztucznymi, takimi jak np. asfalt czy beton, które charakteryzują się wysoką absorpcją promieniowania słonecznego (Akpınar M. V., Sevin, S., 2018), jest bezpośrednią przyczyną zwiększającej się temperatury powierzchni terenu w miastach. W konsekwencji nasila się zjawisko miejskiej wyspy ciepła (ang. Urban Heat Island, UHI), polegające na tym, że obszary miejskie są znacznie cieplejsze od otaczających je terenów wiejskich.

Badanie UHI na podstawie temperatury powierzchni terenu oraz wskaźników teledetekcyjnych NDVI, NDBI oraz UTFVI przeprowadzone zostało dla miasta Kohima Sadar w Indiach oraz opisane w publikacji (Kikon N., Kumar D., Ahmed S.A., 2023). Autorzy, w oparciu o wymienione indeksy spektralne, zbadali, w jaki sposób miejski krajobraz wpływa na temperaturę powierzchni terenu. Wyniki wykazały, że roślinność niweluje zjawisko miejskiej wyspy ciepła, podczas gdy zabudowania je intensyfikują. Ponadto wykazano, że niektóre powierzchnie charakterystyczne dla miejskiego krajobrazu, takie jak np. cegła lub beton, bezpośrednio wpływają na wzrost LST. Podobne badania, bazujące na zmiennych LST, NDVI, NDBI oraz UTFVI, przeprowadzono w publikacjach (Khallef B., Biskri Y., Mouchara N., Brahamia K., 2020) oraz (Liu L., Zhang Y., 2011).

Obszar badań

Miasto Chongqing zlokalizowane jest w południowo-zachodnich Chinach, wzdłuż rzeki Jangcy. W topografii



Rys. 1. Lokalizacja poligonu badawczego. Opracowanie własne na podstawie (Open Topography, 2024), (Natural Earth, 2024)

Fig. 2. Location of the study area. Own elaboration based on (Open Topography, 2024), (Natural Earth, 2024)

Tab. 1. Pozyskane zobrażenia satelitarne
Tab. 1. Acquired satellite imagery

Nr	Nazwa misji	Nazwa sensora	Data rejestracji	Zachmurzenie [%]	Źródło
1	Landsat 5	TM	20.08.1990	27,00	Platforma EartExplorer
2	Landsat 5	TM	20.08.1996	0,00	Platforma EartExplorer
3	Landsat 5	TM	08.10.2002	0,00	Platforma EartExplorer
4	Landsat 5	TM	25.07.2004	2,00	Platforma EartExplorer
5	Landsat 5	TM	18.06.2008	0,00	Platforma EartExplorer
6	Landsat 5	TM	23.05.2010	0,00	Platforma EartExplorer
7	Landsat 8	OLI TIRS	06.08.2014	4,62	Platforma EartExplorer
8	Landsat 8	OLI TIRS	10.07.2016	30,98	Platforma EartExplorer
9	Landsat 8	OLI TIRS	02.09.2018	17,86	Platforma EartExplorer
10	Landsat 8	OLI TIRS	02.05.2020	0,64	Platforma EartExplorer

obszaru przeważają góry oraz wzgórza, które stanowią większą część jego powierzchni. Na terenie miasta rozciągają się pasma górskie, takie jak Daba Shan - na północy oraz Wuling Shan - na południowym wschodzie. Obszar znajduje się na wysokości średnio wynoszącej 230 m n. p. m. (Serwis meteorologiczny Weather Spark, 2024). Rejon aglomeracji miejskiej, do którego ogranicza się obszar badań, skupiony jest w południowo-zachodniej części miasta. W centralnej części aglomeracji miejskiej do rzeki Jangcy, od strony północnej, wpływa rzeka Jialing Jiang.

Analizowane zobrażenia satelitarne programu Landsat obejmują znaczną część aglomeracji miejskiej miasta Chongqing. Lokalizacja miasta oraz poligonu badawczego przedstawione zostały na Rysunku 1.

Dane

W celu przeprowadzenia analizy zmian LST w mieście Chongqing na przestrzeni lat 1990-2020 oraz określenia jej korelacji z różnymi formami pokrycia i użytkowania terenu, przewidziano pobranie szesnastu zobrażeń satelitarnych programu Landsat (co dwa lata, zaczynając od 1990 r.). Dla każdego analizowanego okresu pobrano zarówno produkt Level-1, jak i Level-2. Dane przetworzone do poziomu Level-1 były podstawą do wyznaczenia temperatury powierzchni terenu, natomiast dane po korekcji atmosferycznej posłużyły do obliczenia wskaźników spektralnych. Dane pobierano dla deszczowej pory roku, obejmującej miesiące od maja do września, która charakteryzuje się występowaniem najwyższych temperatur. Wyjątek stanowi zobrażenie z 2002 roku, które pozyskano dla pory suchej ze względu na datę jego wykonania bliską wrześniowi oraz zerowe zachmurzenie. Dla lat 1992, 1994, 1998, 2000, 2006 oraz 2012 nie udało się pozyskać

danych, których dokładność byłaby wystarczająca do przeprowadzenia analizy ze względu na występowanie zbyt dużego zachmurzenia.

Metodyka

Do wszystkich wykonywanych obliczeń wykorzystano oprogramowanie ArcGIS Pro w wersji 3.1.1 od producenta Esri.

Przed przystąpieniem do jakichkolwiek obliczeń wyznaczono poligon badawczy, którego granice od strony północnej i zachodniej pokrywają się z granicami administracyjnymi miasta Chongqing, a od strony południowej i wschodniej - z granicami pozyskanych zobrażeń. Wszystkie wykorzystane w obliczeniach zobrażenia zostały uprzednio przycięte do obszaru badań.

Dla pobranych zobrażeń z widocznym zachmurzeniem wykonano maski, które pozwoliły wykluczyć obszary pokryte chmurami z analizy. Maski obliczono na podstawie pasma QA (ang. Quality Assessment Band).

Wskaźnik spektralny NDVI jest prawdopodobnie najpowszechniejszym wskaźnikiem wykorzystywanym do wykrywania roślinności oraz do oceny jej kondycji. Jest to możliwe dlatego, że zdrowe rośliny pochłaniają więcej promieniowania elektromagnetycznego w zakresie widzialnym niż te o słabej kondycji. Chlorofil występujący w zielonych liściach roślin intensywnie pochłania światło w zakresie niebieskim (0,4-0,5 μm) i czerwonym (0,6-0,7 μm), jednocześnie odbijając światło w zakresie zielonym (0,5-0,6 μm). Dodatkowo, zdrowe rośliny silnie odbijają promieniowanie w zakresie bliskiej podczerwieni (ang. Near Infrared, NIR), mieszczące się w przedziale 0,7-1,3 μm (Kshetri T.B., 2018). NDVI przyjmuje wartości w zakresie [-1; 1] i opisany jest wzorem (1):

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (1)$$

gdzie:

NIR - zobrazenie zarejestrowane w zakresie bliskiej podczerwieni (pasmo 4 dla Landsat - 5, pasmo 5 dla Landsat - 8),

RED - zobrazenie zarejestrowane w zakresie światła czerwonego (pasmo 3 dla Landsat - 5, pasmo 4 dla Landsat - 8) (Kshetri T.B., 2018).

Bazę do obliczeń stanowiły zobrazenia multispektralne, przetworzone do produktu Level-2. Otrzymane wyniki podzielono na dwie klasy: obszary niepokryte roślinnością (przyjmujące wartości indeksu z zakresu od -1 do 0,2) oraz obszary pokryte roślinnością (wartości NDVI z zakresu od 0,2 do 1).

Wskaźnik NDBI jest najczęściej wykorzystywanym wskaźnikiem służącym do analizy terenów zabudowanych. Zabudowania oraz odsłonięte gleby odbijają więcej promieniowania w zakresie krótkofalowej podczerwieni (ang. Short Waves Infrared, SWIR) (1,4-2,5 μm) niż w NIR (0,7-1,3 μm) (Kshetri T.B., 2018). NDBI przyjmuje wartości w zakresie [-1; 1] i opisany jest wzorem (2):

$$NDBI = \frac{(SWIR - NIR)}{(SWIR + NIR)} \quad (2)$$

gdzie:

NIR - zobrazenie zarejestrowane w zakresie bliskiej podczerwieni (pasmo 4 dla Landsat - 5, pasmo 5 dla Landsat - 8),

SWIR - zobrazenie zarejestrowane w zakresie średniej podczerwieni (pasmo 5 dla Landsat - 5, pasmo 6 dla Landsat - 8) (Kshetri T.B., 2018).

Bazą do obliczeń były zobrazenia multispektralne, przetworzone do produktu Level-2. Rastry z wynikami podzielono na trzy klasy, których wartości progowe dobrano empirycznie na podstawie histogramów oraz rozkładu wartości wskaźnika w obszarze badawczym. Podział NDBI na klasy, według którego dokonano identyfikacji formy pokrycia terenu, przedstawia Tabela 2.

Tab. 2. Klasyfikacja terenów według NDBI

Tab. 2. Classification of areas according to NDBI

Wartości NDBI	Forma pokrycia terenu
- 0,05 <	Roślinność/Wody
-0,05 - 0,01	Zabudowa rozrzucona/Odsłonięte gleby
> 0,01	Gęsta zabudowa

Obliczanie temperatury powierzchni terenu składało się z kilku etapów, gdzie pierwszym z nich było wyznaczenie temperatury radiacyjnej, która jest wartością uzyskiwaną na podstawie radiancji pasma termalnego, otrzymanej po przeprowadzeniu korekcji detektorów. Następnie konieczne było wyznaczenie wskaźnika emisyjności powierzchni, który

koreluje z jej zdolnością do emitowania promieniowania podczerwonego.

Temperatura radiacyjna to miara energii promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez powierzchnię badanego obiektu. Wyliczana jest na podstawie pasma podczerwieni termalnej, czyli w przypadku misji Landsat - 5 w oparciu o pasmo 6 (pasmo o rozdzielczości przestrzennej wynoszącej 120 m, zarejestrowane w zakresie 10,4 - 12,5 μm), a w przypadku misji Landsat - 8 na podstawie pasma 10 (pasmo o rozdzielczości przestrzennej wynoszącej 100 m, zarejestrowane w zakresie 10,6 - 11,19 μm) (U.S. Geological Survey, 2024).

Aby wyznaczyć temperaturę radiacyjną terenu najpierw należało dokonać korekcji detektorów, czyli konwersji zarejestrowanych przez detektor wartości, niemających odniesienia do żadnej wielkości fizycznej (ang. Digital Number, DN), do wartości zarejestrowanej luminancji spektralnej, czyli radiancji na górnej granicy atmosfery (ang. Top of Atmosphere, TOA). W tym celu wykorzystano produkty Level-1. Na potrzeby obliczeń należało odszukać w metadanych zobrazenia informacji o stałych kalibracyjnych dla pasma 6 (Landsat - 5) lub 10 (Landsat - 8) takich jak wzmocnienie i przesunięcie. Korekcję detektorów wykonano wykorzystując poniższy wzór (3):

$$L_{\lambda} = G_{\lambda} * DN + B_{\lambda} \quad (3)$$

gdzie:

G_{λ} - wzmocnienie, wyrażone w jednostkach luminancji

$$\left[\frac{W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}}{DN} \right],$$

B_{λ} - przesunięcie (ang. offset), wartość bezwymiarowa (Jakomulska A., Sobczak M., 2001).

Następnie wyznaczono temperaturę radiacyjną. Obliczenia wykonano na podstawie wzoru (4):

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)} \quad (4)$$

gdzie:

K_1 i K_2 - stałe kalibracyjne, pozyskane z metadanych (Kurczyński Z., Ewiak I., Grochowska M., 2012).

Współczynnik emisyjności powierzchni terenu dostarcza informacji o przewidywanym emitowanym promieniowaniu, a zatem o wydajności przesyłania energii cieplnej z powierzchni Ziemi do atmosfery. Aby możliwym było jego obliczenie, najpierw należy wyznaczyć proporcję roślinności (ang. Proportion of Vegetation, pv), czyli wskaźnik określający udział pokrycia roślinnego na danym obszarze. Liczy się go na podstawie NDVI, a dany jest on wzorem (5):

$$pv = \left(\frac{(NDVI - NDVI_{min})}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})} \right)^2 \quad (5)$$

gdzie:

$NDVI_{max}$ i $NDVI_{min}$ - maksymalna i minimalna wartość indeksu odnotowana na rastrze (Degórski M., Wolski J., Affek A., Degórska B., Kowalska A., Regulska E., Solon J., 2021). Współczynnik emisyjności opisany jest wzorem (6):

$$\varepsilon = m * pv + n \quad (6)$$

gdzie:

m - parametr zależny od wartości emisyjności gleby (przyjęto wartość 0,004),

n - parametr zależny od wartości emisyjności gleby (przyjęto wartość 0,986) (Degórski M., Wolski J., Affek A., Degórska B., Kowalska A., Regulska E., Solon J., 2021).

Temperatura powierzchni terenu to miara energii cieplnej emitowanej przez powierzchnię Ziemi, uwzględniająca jej emisyjność. Jest ona kluczowym elementem w badaniach środowiskowych, klimatycznych i urbanistycznych. LST wyznaczono na podstawie wzoru (7):

$$LST = \frac{T}{1 + \frac{\lambda * T}{\rho} + \ln \varepsilon} \quad (7)$$

gdzie:

T - temperatura radiacyjna,

λ - centralna długość fali emitowanego promieniowania,

ε - współczynnik emisyjności,

σ - stała Boltzmanna (wynosząca: $1,438 \cdot 10^{-2}$ [mK]) (Degórski M., Wolski J., Affek A., Degórska B., Kowalska A., Regulska E., Solon J., 2021).

Aby otrzymać wynik w stopniach Celsjusza, należało odjąć od otrzymanego rastra wartość 273,15, co odpowiada różnicy pomiędzy skalą Kelvina a skalą Celsjusza.

UTFVI to wskaźnik stosowany do oceny intensywności zjawiska miejskiej wyspy ciepła na podstawie różnic LST odnotowanych w obszarach zurbanizowanych. Jest on przydatny w badaniach klimatu miejskiego i planowaniu przestrzennym. Wartości UTFVI są klasyfikowane na poziomy, które wskazują stopień dyskomfortu cieplnego w danym miejscu. Wskaźnik obliczono według wzoru (8):

$$UTFVI = \frac{LST - LST_{mean}}{LST} \quad (8)$$

gdzie:

LST_{mean} - średnia wartość LST w obrębie rastra (Cevik D. B., Cetin M., 2023).

Otrzymane wyniki podzielono na 6 klas wskazujących stopień dyskomfortu cieplnego. Podział, według którego dokonano klasyfikacji, przedstawia Tabela 3 (Cevik D. B., Cetin M., 2023).

Wyniki i dyskusja

Rysunek 2 przedstawia wykresy minimalnej, maksymalnej oraz średniej wartości LST w okresie lat 1990-2020. Z analizy wynika, że zarówno odnotowane wartości maksymalne,

Tab. 3. Klasyfikacja UTFVI według stopnia odczuwalnego dyskomfortu cieplnego
Tab. 3. UTFVI classification according to the level of perceived thermal discomfort

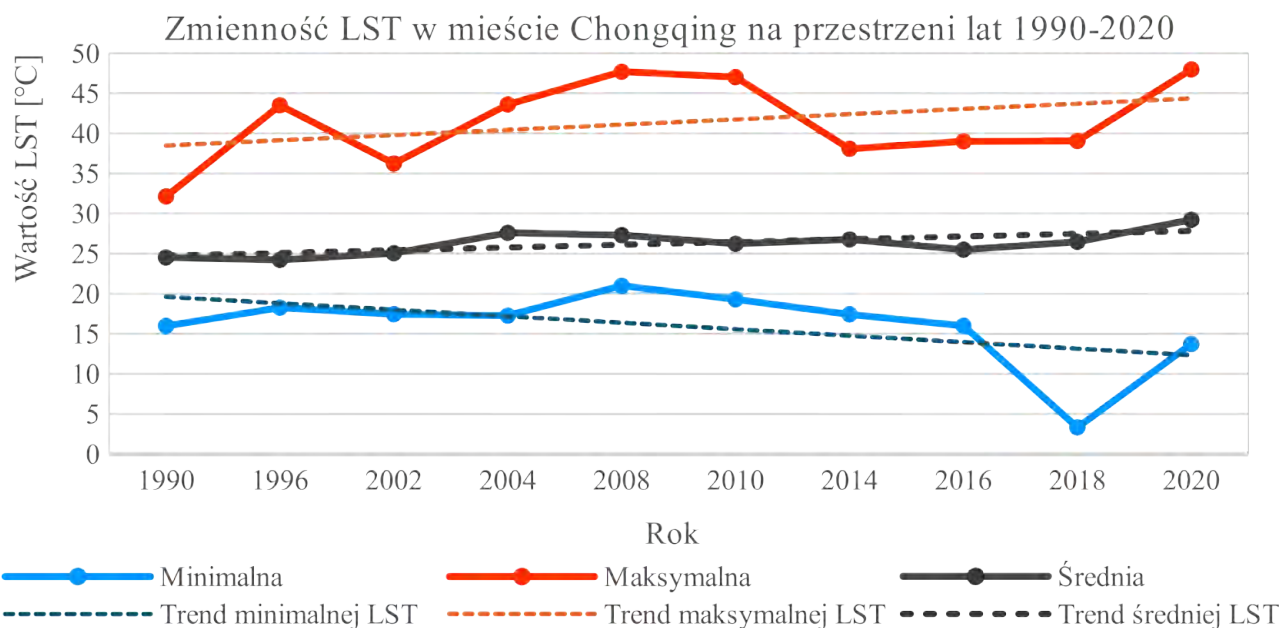
Wartości UTFVI	Dyskomfort cieplny
0 <	Brak
0,000 - 0,005	Słaby
0,005 - 0,010	Średni
0,010 - 0,015	Mocny
0,015 - 0,020	Bardzo mocny
> 0,020	Ekstremalny

jak i średnie LST w Chongqing wykazują wyraźny trend wzrostowy. W analizowanym okresie średnia temperatura powierzchni wzrosła o $4,68^{\circ}\text{C}$, co wskazuje na intensyfikację efektu miejskiej wyspy ciepła. Szczególnie zauważalne zmiany odnotowano w okresie 1990-2008, kiedy maksymalna LST wzrastała w średnim tempie $0,27^{\circ}\text{C}/\text{rok}$. Po roku 2008 odnotowane wartości maksymalne LST były coraz niższe, co może być związane z wdrażaniem polityk ograniczających emisję ciepła lub zmianami w strukturze urbanistycznej miasta. Niestety, od 2014 roku wartości maksymalne LST ponownie zaczęły rosnąć, osiągając najwyższą wartość w 2020 roku, wynoszącą $47,97^{\circ}\text{C}$. Ponowny wzrost maksymalnych wartości LST po 2014 roku może wynikać z dalszego rozwoju infrastruktury miejskiej lub zmian klimatycznych.

Interesującym zjawiskiem jest fakt, że minimalne wartości LST, odnotowane w analizowanym okresie, w opozycji do maksymalnych i średnich wartości LST, wykazują trend spadkowy. Ponownie, jak w przypadku maksymalnych LST, w latach 1990-2008 minimalne LST wzrastały, jednak od tego czasu utrzymały trend spadkowy, ostatecznie zmniejszając się o $2,56^{\circ}\text{C}$ na przestrzeni analizowanych 30 lat. Zjawisko to może być ściśle związane z realizacją programów chroniących obszary leśne, wprowadzonych w latach 1999 oraz 2000, w ramach których na przestrzeni lat 2000-2010 aż $144,439 \text{ km}^2$ terenów uległo przetransformowaniu w lasy (Li L., Qi Z., Zhong T., 2021). Spadek minimalnych wartości LST może być więc związany ze zwiększoną powierzchnią lasów na przestrzeni lat, przy jednoczesnym znacznym zwiększeniu się maksymalnej LST w obrębie dynamicznie rozwijającego się miasta.

Badanie zasięgu wybranych form pokrycia terenu przeprowadzono na podstawie wskaźników NDBI oraz NDVI. Otrzymane wyniki przedstawiono w formie tabelarycznej. W Tabeli 4 zestawiono powierzchnie poszczególnych form pokrycia terenu dla wszystkich analizowanych lat, uzyskanych po zastosowaniu wskaźnika NDVI. Tabela 5 przedstawia powierzchnie poszczególnych form pokrycia terenu w obrębie poligonu badawczego, uzyskanych dzięki wykorzystaniu wskaźnika NDBI. Z analizy wykluczono obszary zachmurzone, które odnotowano w obrębie poligonu badawczego w latach 1990, 2004, 2014, 2016 oraz 2018.

Wartości dla lat 1990 oraz 2002 wydają się być mocno przeszacowane w kontekście porównania z innymi latami. Należy je zatem traktować z ostrożnością. Wyłączając te lata z analizy oraz mając na uwadze fakt, że dla lat 2004,



Rys. 2. Wykres wartości minimalnej, maksymalnej oraz średniej LST dla okresu 1990-2020 w obrębie poligonu badawczego z wyłączeniem obszarów zachmurzonych
Fig. 2. Chart of minimum, maximum, and average LST values for the period 1990-2020 within the study area, excluding cloudcovered regions

2014, 2016 oraz 2018 wystąpiło zachmurzenie w obrębie sceny satelitarnej, zauważyć można, że tereny inne niż roślinne zwiększyły swoją powierzchnię ponad 10-krotnie na przestrzeni lat 1996-2020. Analiza danych pokazuje znaczną zmienność w powierzchniach terenów roślinnych i nieroślinnych, odzwierciedlającą intensywną urbanizację w Chongqing.

Również w przypadku wskaźnika NDBI wyniki

Tab. 4. Zestawienie powierzchni wybranych form pokrycia terenu dla lat 1990-2020, uzyskanych po zastosowaniu NDVI

Tab. 4. Summary of the area of selected land cover types for the years 1990-2020, obtained using NDVI

Rok analizy	Wykazana forma pokrycia terenu	
	Roślinność [km ²]	Inne [km ²]
1990	5 350,48	3 119,09
1996	1 0475,40	753,08
2002	7 013,48	4 212,95
2004	10 013,22	781,42
2008	10 246,73	908,50
2010	2 731,98	8 425,17
2014	1 215,13	9 604,58
2016	1 057,72	8 423,75
2018	1 471,80	7 017,97
2020	2 971,17	8 257,31

otrzymane dla lat 1990 oraz 2002 wydają się zaburzać ciągłość następujących w analizowanym okresie zmian. Wyłączając te lata z analizy, zauważyć można wyraźną tendencję wzrostową powierzchni w przypadku gęstej zabudowy. Jest to jednoznaczny dowód świadczący o postępującym i dynamicznym rozwoju centralnej części miasta Chongqing. Minimalna powierzchnia gęstej zabudowy odnotowana dla

Tab. 5. Zestawienie powierzchni wybranych form pokrycia terenu dla lat 1990-2020 uzyskanych dzięki zastosowaniu NDBI

Tab. 5. Summary of the area of selected land cover types for the years 1990-2020, obtained using NDBI

Rok analizy	Wykazana forma pokrycia terenu		
	Roślinność / Wody [km ²]	Zabudowa rozproszona / Odsłonięte gleby [km ²]	Gęsta zabudowa [km ²]
1990	7761,46	674,31	33,80
1996	10955,59	261,29	11,59
2002	9990,25	1190,90	45,28
2004	10398,63	355,83	40,18
2008	10699,15	387,87	68,21
2010	10245,82	852,98	58,35
2014	9862,94	818,86	137,91
2016	8746,72	562,10	171,48
2018	7246,19	1056,04	188,15
2020	9309,13	1655,76	263,58

analizowanego obszaru wyniosła 11,59 km² i wystąpiła w 1996 roku, najwyższa natomiast była równa aż 263,58 km² i odnotowano ją dla roku 2020. Podobny schemat wystąpił w przypadku zabudowy rozproszonej oraz odsłoniętej pokrywy glebowej, których minimalną powierzchnię wynoszącą 261,29 km² zanotowano w 1996 roku, a największą powierzchnię (1655,76 km²) zaobserwowano w roku 2020.

Dyskomfort cieplny odnosi się do subiektywnego odczucia fizjologicznego i psychicznego obciążenia termicznego przez człowieka, które wynika z warunków środowiskowych, takich jak m.in. wysoka temperatura, w tym wysokie LST. W kontekście zjawiska miejskiej wyspy ciepła dyskomfort cieplny jest potęgowany przez wyższe

temperatury w obszarach miejskich, w porównaniu z terenami wiejskimi.

W Tabeli 6 zestawiono wyniki przeprowadzonej analizy dyskomfortu cieplnego dla lat 1990-2020, przedstawiając procentowy udział powierzchni obszaru miasta Chongqing w różnych klasach stresu cieplnego. Stopień dyskomfortu określono z wykorzystaniem wskaźnika UTFVI.

Wyniki wskazują na znaczącą dynamikę w strukturze termicznego dyskomfortu w analizowanym okresie. W roku 1990 niemal 90% obszarów znajdowało się w klasach mocnego, bardzo mocnego i ekstremalnego stresu cieplnego, co sugeruje nietypowo wysokie oddziaływanie miejskiej wyspy ciepła. W zestawieniu z wynikami z roku 1996 wyniki te wydają się mało prawdopodobne i wskazują na konieczność ich weryfikacji.

Tab. 6. Zestawienie procentowego udziału powierzchni obszaru miasta Chongqing w różnych klasach dyskomfortu cieplnego, określonego na podstawie UTFVI
Tab. 6. Summary of the percentage share of the Chongqing city area in various thermal discomfort classes, determined based on UTFVI

Klasa stresu cieplnego	Rok analizy									
	1990 [%]	1996 [%]	2002 [%]	2004 [%]	2008 [%]	2010 [%]	2014 [%]	2016 [%]	2018 [%]	2020 [%]
Brak	0,00	58,28	60,89	44,43	53,53	42,34	44,13	1,17	9,97	46,01
Słaby	1,83	27,21	25,69	41,44	39,45	49,45	34,41	15,44	25,84	34,41
Średni	6,06	12,99	11,73	10,32	3,09	5,73	18,21	54,01	38,08	13,66
Mocny	49,91	1,27	1,37	2,05	2,32	1,66	2,55	16,71	18,57	4,01
Bardzo mocny	33,40	0,25	0,29	1,25	1,09	0,51	0,54	6,42	5,39	1,22
Ekstremalny	8,79	0,00	0,02	0,51	0,52	0,26	0,16	6,24	2,15	0,69

Poczynając od 1996 roku, wyniki wydają się bardziej wiarygodne i wskazują na wyraźne zmiany w rozkładzie stresu cieplnego. W okresie 1996-2010 udział obszarów niskiego stresu cieplnego lub jego braku utrzymywał się na bardzo wysokim poziomie, wynoszącym powyżej 85% całej analizowanej powierzchni. W latach 2014, 2016 oraz 2018 odnotowano nagły spadek udziału obszarów o nieistotnym stresie cieplnym. Zjawisko to może być związane z kilkoma czynnikami. Po pierwsze, w tych latach wystąpiło zachmurzenie obejmujące głównie północno-zachodnie części poligonu badawczego, które w większości są pokryte roślinnością, co mogło wpłynąć na wyniki analizy. Po drugie, po 2016 roku zjawisko urbanizacji zaczęło gwałtownie postępować, co mogło również znacząco wpłynąć na zmniejszenie się udziału obszarów o niskim stresie cieplnym.

Do 2020 roku udział obszarów ze średnim i mocnym stresem cieplnym zmalał, co może świadczyć o wdrożeniu pewnych działań adaptacyjnych lub poprawie zarządzania środowiskiem miejskim. Wahania udziału poszczególnych klas w latach 1996-2020 wskazują jednak na nierównomierny charakter zmian, zależny od lokalnych działań oraz specyficznych warunków przestrzennych.

W celu ułatwienia interpretacji wyników na Rysunku 2 przedstawiono kompozycje mapowe prezentujące: rozkład przestrzenny wybranych form pokrycia terenu wyznaczonych

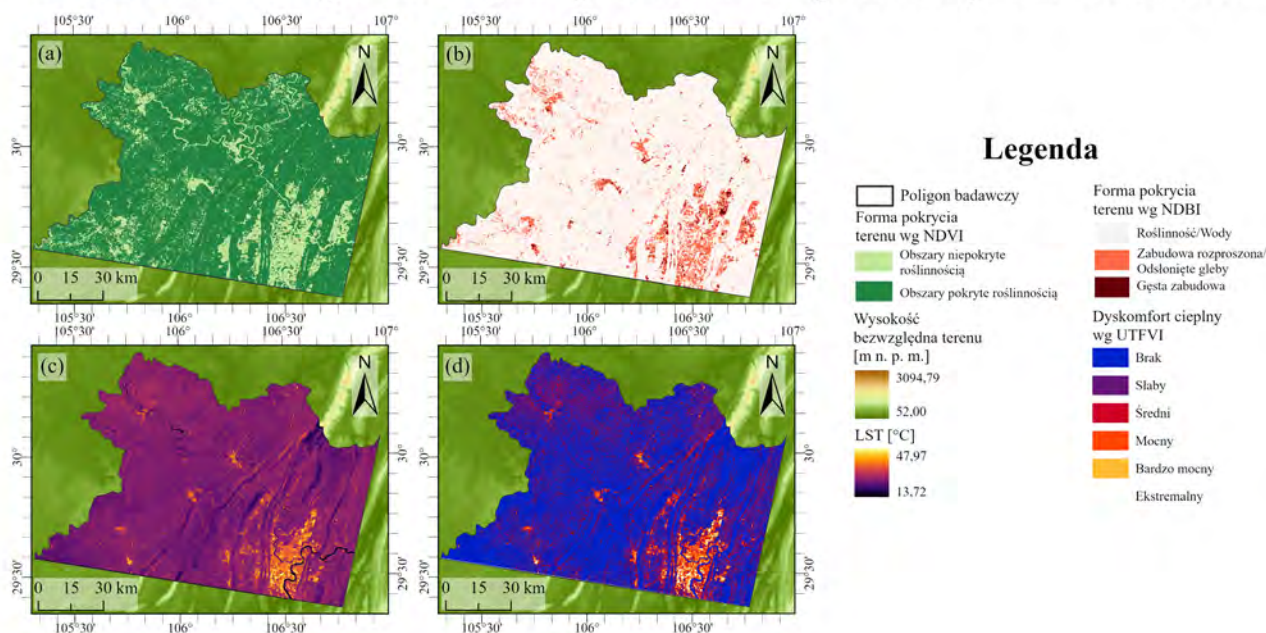
przy pomocy wskaźników NDVI i NDBI, rozkład przestrzenny LST oraz klasy dyskomfortu cieplnego, zidentyfikowane za pomocą wskaźnika UTFVI dla roku 2008. Takie zestawienie umożliwia spójne porównanie i ocenę przestrzennych zależności między wartościami LST a formami pokrycia terenu.

Analiza wyników wskazuje na silną zależność pomiędzy formą pokrycia terenu a wartościami temperatury powierzchni terenu, co znajduje również swoje odzwierciedlenie w rozkładzie wskaźnika UTFVI. Obszary sklasyfikowane przez NDBI jako zabudowane lub pokryte odsłoniętymi glebami korelują z najwyższymi wartościami LST. Wyniki te potwierdzają, że zabudowa miejska i brak roślinności znacząco przyczyniają się do wzrostu temperatury powierzchni terenu, co potęguje zjawisko miejskiej wyspy ciepła.

Wskaźnik NDVI, z kolei, wyraźnie wskazuje na odwrotną relację - obszary o wysokim stopniu pokrycia roślinnością charakteryzują się niższymi wartościami LST, co podkreśla rolę zieleni miejskiej jako naturalnego czynnika łagodzącego stres cieplny. Wskaźnik UTFVI dodatkowo uwidacznia, że obszary o najwyższych wartościach LST doświadczają ekstremalnego lub bardzo wysokiego dyskomfortu cieplnego, szczególnie w centrum miasta oraz na terenach zabudowy rozproszonej lub niepokrytych roślinnością.

Porównanie wyników przeprowadzonych badań z analizą zawartą w publikacji (Li L., Zhan W., Du H., Lai J., Wang C., FU H., Huang F., i in., 2022) wskazuje na ogólną zgodność co do zaobserwowanych trendów zmian temperatury powierzchni terenu w obszarze Chongqing, na przestrzeni lat 1990-2020. Wyniki obu analiz potwierdzają, że najintensywniejszy wzrost LST miał miejsce w latach poprzedzających 2008 rok, co wiąże się z szybkim rozwojem urbanistycznym oraz ekspansją zabudowy miejskiej. Po 2008 roku zaobserwowano natomiast stabilizację LST w wielu obszarach, co może być efektem działań adaptacyjnych lub ograniczeń w dalszej ekspansji terenów miejskich. Według autorów badania, działania adaptacyjne podjęte przez miasto Chongqing obejmowały zakładanie zielonych dachów w głównej części aglomeracji miejskiej.

Zestawienie wyników przeprowadzonej analizy dla roku 2008



Rys. 3. Wyniki przeprowadzonej analizy dla roku 2008; (a) wskaźnik NDVI, (b) wskaźnik NDBI, (c) LST, (d) wskaźnik UTFVI (Open Topography, 2024)
Fig. 3. Results of the analysis conducted for the year 2008; (a) NDVI index, (b) NDBI index, (c) LST, (d) UTFVI index (Open Topography, 2024)

W publikacji (Li L., Zhan W., Du H., Lai J., Wang C., FU H., Huang F., i in., 2022) zwrócono również uwagę na różnice w wartościach LST w zależności od form pokrycia terenu, wyodrębniając jako osobną klasę „obszary wiejskie”, które w kontekście przeprowadzanej analizy mogą być rozumiane jako obszary pokryte roślinnością, a także podkreślono rolę tych obszarów w obniżaniu temperatury powierzchni terenu. Choć niniejsza analiza nie skupiała się wprost na bezwzględnych wartościach LST dla poszczególnych klas pokrycia terenu, wyniki są zbieżne z ustaleniami wspomnianej publikacji. Wyniki przeprowadzonej w niniejszej pracy analizy wykazały, że najwyższe temperatury odnotowano w obszarach intensywnie zabudowanych oraz na terenach otwartych pozbawionych roślinności, zaś obszary z wysokimi wartościami NDVI charakteryzowały się niższym poziomem LST.

Podsumowanie

Analiza danych satelitarnych z programu Landsat oraz obliczonych wskaźników NDVI, NDBI, UTFVI i LST

wykazała istotne zmiany w strukturze pokrycia terenu miasta Chongqing w latach 1990-2020 oraz ich wyraźny wpływ na lokalny klimat. Zaobserwowano silną korelację między typem pokrycia a temperaturą powierzchni i poziomem stresu cieplnego, szczególnie widoczną w obszarach zurbanizowanych. Stwierdzono również, że roślinność ogranicza zjawisko UHI, natomiast zabudowa je intensyfikuje.

W badanym okresie odnotowano stopniowy rozwój przestrzenny Chongqing oraz wyraźny wzrost powierzchni zabudowy. Tendencje te były szczególnie widoczne w centralnych częściach aglomeracji miejskiej i na terenach o ograniczonej roślinności, gdzie utrzymywał się wysoki poziom dyskomfortu cieplnego. Zmiany te odzwierciedlają dynamiczną urbanizację i jej wpływ na lokalne warunki środowiskowe.

Wyniki UTFVI ujawniły znaczne zróżnicowanie przestrzenne stresu cieplnego - najwyższy poziom występował w centrum miasta i na terenach intensywnie zabudowanych. Podkreśla to potrzebę działań adaptacyjnych, takich jak rozwój zieleni miejskiej i zrównoważone planowanie przestrzenne, aby ograniczyć skutki urbanizacji i zmian klimatycznych.

Literatura

- [1] Akpınar M. V., Sevin, S., 2018 - Urban heat island effects of concrete road and asphalt pavement roads. W NIŽETIĆ S., PAPADOPOULOS A. (Red.), *The Role of Exergy in Energy and the Environment. Green Energy and Technology*. Rozdział 5, str. 51-60.
- [2] Degórski M., Wolski J., Affek A., Degórska B. Kowalska A., Regulska E., Solon J., 2021 - Raport. Opracowanie studium przypadku istotnych usług ekosystemów zurbanizowanych w skali regionalnej oraz lokalnej. Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. Stanisława Leszczyckiego, Polska Akademia Nauk, Warszawa.
- [3] Jakomulska A., Sobczak M., 2001 - Korekcja radiometryczna obrazów satelitarnych - metodyka i przykłady. Fotointerpretacja w geografii, str. 152-171.
- [4] Khallef B., Biskri Y., Mouchara N., Brahamia K., 2020 - Analysis of urban heat islands using Landsat 8 OLI / TIR data: Case of the city of Guelma (Algeria). *Asian Journal of Environment & Ecology*, str. 42-51.
- [5] Kikon N., Kumar D., Ahmed S.A., 2023 - Quantitative assessment of land surface temperature and vegetation indices on a kilometer grid scale. *Environmental Science and Pollution Research* 30 (nr 49).
- [6] Kshetri T.B., 2018 - NDVI, NDBI and NDWI calculation using Landsat 7 and 8. *GeoWorld*, październik, str. 32-34.
- [7] Kurczyński Z., Ewiak I., Growchowska M., 2012 - Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji. *Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing*. Zarząd Główny Stowarzyszenia Geodetów Polskich.
- [8] Li L., Qi Z., Zhong T., 2021 - Forest Transition and Its Dynamics in Subtropical Chongqing, China since 1990s. *Land*, 10 (nr 8), art. 777.
- [9] Li L., Zhan W., Du H., Lai J., Wang C., Fu H., Huang F., i in., 2022 - Long-Term and Fine-Scale Surface Urban Heat Island Dynamics Revealed by Landsat Data Since the 1980s: A Comparison of Four Megacities in China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127 (nr 5).
- [10] Liu L., Zhang., 2011 - Urban heat island analysis using the Landsat TM data and ASTER data: A case study in Hong Kong. *Remote Sensing*, 3 (nr 7), str. 1535-1552.
- [11] NASA, 2024 - Remote Sensing. Dostęp online: <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/earth-observation-data-basics/remote-sensing#toc-observing-with-the-electromagnetic-spectrum> [dostęp: 14.06.2025].
- [12] Natural Earth, 2024 - Granice Chin oraz państw sąsiednich w formacie .shp. Dostęp online: <https://www.naturalearthdata.com/downloads/110m-cultural-vectors/> [dostęp: 27.12.2024].
- [13] Open Topography, 2024 - High-Resolution Topography Data and Tools. Numeryczny model terenu. Dostęp online: <https://portal.opentopography.org/datasets> [dostęp: 27.12.2024].
- [14] Orębska-Starkel B., Starkel L., 1991 - Efekt cieplarniany a globalne zmiany środowiska przyrodniczego. *Zeszyty Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN*. Tom 4.
- [15] Platforma Earthexplorer - Dostęp online: <https://earthexplorer.usgs.gov/> [dostęp: 09.12.2024].
- [16] Sserwis Meteorologiczny Weather Spark, 2024 - Informacje o topografii oraz warunkach klimatycznych miasta Chongqing. Dostęp online: <https://pl.weatherspark.com/y/117232/Średnie-warunki-pogodowe-w:-Chongqing-Chiny-w-ciagu-roku> [dostęp: 18.12.2024].
- [17] U.S. Geological Survey, 2024 - Landsat Satellite Missions. Dostęp online: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions> [dostęp: 09.12.2024].