

Klasyfikacja gleb słonych doliny Czuj w Kirgistanie na podstawie wielospektralnych obrazów satelitarnych Landsat TM, Landsat ETM+, TERRA ASTER oraz danych naziemnych

Classification of salt-affected soils of the Chuy Valley in Kyrgyzstan using multispectral satellite Landsat TM, Landsat ETM+, TERRA ASTER images and ground-collected data

Gulzat KOKOEVA

The natural conditions of Kyrgyzstan and consequences of human-induced processes, such as inappropriate methods of irrigation, have led to the extension of salt-affected soils. Extensive areas of irrigated land have been increasingly degraded by salinization from over-irrigation and other forms of inadequate agricultural practices. Between 1985 and 1990, the area of salt-affected soils increased from 666 300 ha to 1170 300 ha (Mamytov, 1995). In recent years salinity processes have been described as one of the problems of agriculture in that area. For the last ten years many none-affected soils of the Chuy Valley have become salinized. According to Mamytov et al. (1991) the total area of salt-affected soils in the Chuy Valley exceeds 259.5 thousands ha, which is more than 42% of the research area.

In this research, an attempt has been made to estimate soil salinity quantitatively and also spatially by applying remote sensing techniques. Conventional methods of mapping salt-affected soils consume a lot of energy, time and money. Remote sensing enables us to detect and to map salt-affected soils by using relatively cheap multispectral satellite data such as Landsat TM, Landsat ETM+ and TERRA ASTER. The objective of this study is to identify salt-affected soils by integrating satellite images with ground-collected data. In order to achieve this goal the best algorithms of an unsuper-

vised and a supervised classification have been chosen using TNTmips software. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Transformed Vegetation Index (TVI) have been applied to distinguish densely and partly vegetation-covered soils, which are not salt-affected. To distinguish areas covered with stone and sands from saline soils the Salinity Index (SI) has been applied. For the differentiation of arable land which is not covered with vegetation the brightness parameter of Tasseled Cap transformation has been used. All these indices were calculated from satellite images. Finding an appropriate interpretation scheme for identifying the salt-affected soils of the Chuy Valley becomes a very important factor influencing the accuracy of the supervised classification. The temporal change of salinity accumulation is demonstrated by comparing the classification's results of the multispectral satellite images from 1994 to those of 2001. This study also includes measurements of spectral properties of collected soil samples for better understanding the difference in classification accuracy of various types of salt-affected soils. Spectral reflectance was registered from the surfaces of saline and saline-sodic soils using field luminancemeter CIMEL CE 313-21 in the following wavelength bands: 450 nm, 550 nm, 650 nm and 850 nm.

1. Wprowadzenie

Dolina Czuj jest położona w środkowej Azji na granicy między Kirgistanem a Kazachstanem. Charakteryzuje się klimatem półpustynnym, z gorącym latem i niewielkimi opadami w lecie, o rocznym parowaniu dwukrotnie większym niż opady. Takie warunki narzucają potrzebę intensywnego nawadniania gruntów rolnych. Intensywne użytkowanie gruntów rolnych w tej dolinie

rozpoczęło się po drugiej wojnie światowej wraz z zakończeniem budowy sieci kanałów irygacyjnych. W latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku z 615 tys. ha doliny Czuj w granicach Kirgistanu, użytki rolne stanowiły 485 tys. ha, z czego 80% ich powierzchni użytkowano przy udziale nawodnień (Mamytov, 1995). Intensywne nawadnianie gruntów rolnych w takim półpustynnym klimacie prowadzi do zasolenia gleb. Pankova i in. (1986), wykorzystując w swoich bada-

niach zdjęcia lotnicze z lat 1972–1982, wykazali, że 60% nawadnianych gruntów Azji Środkowej uległo w różnym stopniu zasoleniu. Pankova i Ruchovič (1999), również za pośrednictwem zdjęć lotniczych, pochodzących z okresu letniego i jesienno z lat 1983–1989, wydzielili duże areale gleb słonych w Kirgistanie. W ciągu tego okresu areal gleb słonych zwiększył się tam o 24,5 tys. ha, w tym gleb silnie zasolonych o 0,5 tys. ha, średnio zasolonych o 8,2 tys. ha oraz słabo zasolonych o 15,8 tys. ha.

Po uzyskaniu przez Kirgistan niepodległości w roku 1991 nastąpiły duże zmiany w gospodarce kraju, a szczególnie w rolnictwie. Grunty rolne, wcześniej należące do gospodarstw państwowych i spółdzielni produkcyjnych, przydzielono w określonym areale wszystkim obywatelom. W wyniku źle prowadzonych zabiegów agrotechnicznych, nieprawidłowego nawadniania gruntów, czy zupełnego zaniechania nawadniania wskutek zniszczenia systemów irygacyjnych przez nowych właścicieli, gleby ulegały coraz większej degradacji, w tym coraz silniejszemu zasoleniu. Według Mamytova (1995), od roku 1985 do 1990 obszar zasolonych gleb w Kirgistanie powiększył się od 666,3 tys. ha do 1170,3 tys. ha, to znaczy wzrósł 1,7-krotnie. Zmiany zachodzące w ostatnich 10 latach pogłębiły jeszcze bardziej proces zasolenia gleb, stwarzając potrzebę monitoringu tego zjawiska. Kartowanie gleb słonych, liczących tysiące ha, w pewnym momencie stało się nie do zrealizowania metodami tradycyjnymi ze względu na duże koszty i olbrzymią czasochłonność. Znając pozytywne przykłady wykorzystania metod teledetekcji do kartowania gleb słonych w ostatnich 30 latach w: Australii (Evans i in., 1995; Abuzar i in., 2001), Boliwii (Moreau, 1996; Metternicht i Zinck, 1997; Metternicht, Zink, 2003), Egipcie (Goossens i Ranst, 1998; Madani, 2005), Indiach (Singh i Dwivedi, 1989; Dwivedi i Rao, 1992; Rao i in., 1995; Dwivedi, 1996; Dwivedi i Sreenivas, 1998; Dwivedi i in., 1999; Dwivedi i in., 2001; Sreenivas i in., 1995; Srivastava i in., 1997), Syrii (Al-Khaier, 2003), Tajlandii (Soliman, 2004) i Uzbekistanie (Karavanova, 1999), zainteresowano się również tymi metodami w odniesieniu do gleb słonych Kirgistanu.

Celem niniejszej pracy jest wydzielenie powierzchni gleb słonych w dolinie Czuj w granicach Kirgistanu oraz określenie wzrostu ich arealu w latach 1994 i 2001 za pośrednictwem interpretacji bezpłatnych lub względnie tanich wielospektralnych obrazów satelitarnych. W pracy podjęto próbę określenia najskuteczniejszej kombinacji kanałów i najlepszego algorytmu klasyfikacji nienadzorowanej i nadzorowanej do wydzielenia tych gleb. Proponowany schemat postępowania interpretacyjnego może okazać szczególnie przydatny w Kirgistanie, gdzie tego rodzaju technologii wcześniej nie wykorzystywano. Celem pracy jest również ustalenie poprawności interpretacji satelitarnej na przykładzie wybranych powierzchni testowych, wcześniej skartowanych tradycyjnymi metodami naziemnymi. Posługując się pomiarami odbicia spektralnego pobranego w terenie materiału glebowego w pracy przeprowadzono badanie

i podjęto próbę wyjaśnienia, dlaczego poszczególne klasy gleb słonych są wydzielane za pośrednictwem wielospektralnych obrazów satelitarnych z niejednakową dokładnością.

2. Zasolenia gleb

2.1. Przyczyny zasolenia gleb

Powstawanie gleb słonych jest uwarunkowane obecnością rozpuszczalnych soli w wodach podziemnych i w skale macierzystej, klimatem charakteryzującym się przewagą wielkości parowania potencjalnego nad ilością opadów, odpowiednią rzeźbą terenu oraz specyficzną roślinnością. Sól może pochodzić ze skał osadowych znajdujących się w głębi ładu. Słone osady powstają wskutek odkładania się siarczanu wapnia, anhydrytu, soli potasowo-magnezowych i chlorku sodu. Zawierają one również domieszki w postaci kwarcu, dolomitu, minerałów ilastych i wodorotlenków (Koniecka-Betley, 1968). W warunkach klimatu pustynnego i półpustynnego sole te są wynoszone z głębszych warstw gleby poprzez podsiąkające wody kapilarne. Woda wyparowując zwiększa koncentrację soli w całym profilu glebowym lub pozostawia jej wyraźne osady na powierzchni gleby. Sole mogą także gromadzić się w niższej położonych formach terenu jako wynik spływów powierzchniowych z wyżej usytuowanych powierzchni zasolonych. Zasolenie gleb może być także skutkiem transportu materiału eolicznego ze słonych jezior i mórz. Williams (1949) przywiązuje duże znaczenie do biologicznych źródeł soli, znajdujących się w rozkładających się szczątkach organicznych. Bezpośrednim źródłem zasolenia gleby może być również stałe zasilanie roztworami soli przez wody morskie, zanieczyszczenia przemysłowe oraz działania związane z likwidowaniem gołoledzi i śliskości pośniegowej na drogach (Dobrzański i Zawadzki, 1995).

W literaturze istnieją różne definicje gleb słonych. Według Mapy gleb świata FAO/UNESCO (1988) do gleb słonych zalicza się gleby charakteryzujące się wysokim stężeniem soli obojętnych i łatwo rozpuszczalnych w wodzie w profilu glebowym o miąższości do 125 cm. Przewodnictwo elektryczne roztworów wodnych jest większe niż 4 dS/m, a zawartość sodu wymiennego w kompleksie sorpcyjnym mniejsza niż 15% (Szabolcs, 1989). Według Kovdy i in. (1960) głównym wskaźnikiem diagnostycznym gleb słonych jest występowanie do głębokości 2 m łatwo rozpuszczalnych soli, o stężeniu przekraczającym próg toksyczności dla roślin odpornych na sól. Te łatwo rozpuszczalne sole są oznaczane poprzez obecność jonów CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ w roztworze wodnym gleby (1:5) (Instrukcja po učetu zasolonych počv, 1968). Progi toksyczności wymienionych jonów wynoszą: 0,3 cmol/kg⁻¹ dla Cl^- , 1,7 cmol/kg⁻¹ dla SO_4^{2-} związanego z Na^+ i Mg^{2+} , 1,0–0,8 cmol/kg⁻¹ dla HCO_3^- związanego z Na^+ i Mg^{2+} (Egorova i Bazylevič, 1973).

Tabela. 1. Wybrane klasyfikacje gleb słonych wg Szabolcsa (1989), uzupełnione Systematyką gleb Polski (1989)
 Table 1. Chosen classifications of salt-affected soils according to Szabolcs (1989), completed with the Systematics of Polish soils

Soil Map of the World FAO/ UNESCO	Klasyfikacja australijska <i>Australian Classification</i>	Klasyfikacja francuska <i>French Classification</i>	Klasyfikacja Soil Taxonomy <i>Classification</i>	Klasyfikacja PTG <i>Polish Classification</i>	Klasyfikacja ZSSR <i>USSR Classification</i>
solonchak: orthic mollic takyr gleyic	solonchak	salisols salsodic: salisodisols sodisalsols	salorthids salorthidic calciustolls salorthidic haplustolls halaquepts	solonczaki: powierzchniowy i wewnętrzny	solonczak: pulchny sodowy takyr łąkowy
solonetz: orthic mollic gleyic	solonetz, solodized solonetz	sodisols: sodisols indifférenciés i sodisols solonetziques (lessivés)	nadurargida natrargida natriborals natrudalf natrustalfs natriexeralfe natrallbolls natriborolls natrustolls natrixerolls natraquolls atnraqualfs	solonce: typowe i solonczakowate	solonczak: pustynno- stepowe i pustynne stepowe łąkowe
solod	solod, solodic groups	sodisols solodise	argiabolls	-	solodzie

2.2. Klasyfikacje gleb słonych

Istnieje wiele różnych klasyfikacji gleb słonych, jak np.: wykorzystana do sporządzenia Mapy gleb świata FAO/UNESCO (1988), Taksonomii gleb (Keys to Soil Taxonomy, 2003), stosowana w Australii (White, 1997), we Francji (Loyer, 1998), w Polsce według Systematyki gleb Polski (1989) oraz opracowana w Związku Radzieckim (Kovda i in., 1967), wykorzystywana również w Kirgistanie. Główne elementy tych klasyfikacji przedstawione są w tabeli 1. We wszystkich wymienionych klasyfikacjach wyróżnia się solonczaki i soloncze. W Systematyce gleb Polski (1989) nie wydziela się solodzi.

KLASYFIKACJA RADZIECKA

Klasyfikacja radziecka dzieli gleby słone na solonczaki, soloncze i solodzie. Gleby te cechują się słonością i soloncowatością.

Słoność gleby jest wyrażana zawartością soli łatwo rozpuszczalnych w wodzie (NaCl , Na_2CO_3 , NaHCO_3 , Na_2SO_4 , MgSO_4 , MgCl_2 , CaCl_2 , MgSO_4) w ilości powyżej 0,25% w roztworze wodnym (1:5) (Obšesouznaja instrukcija..., 1973). W bardziej szczegółowym podziale gleb słonych bierze się pod uwagę ich chemizm, zawartość w nim soli i głębokość występowania poziomu słonego. Klasyfikacja gleb słonych według chemizmu opiera się na oznaczaniu w wyciągu wodnym obecności anionów CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- i SO_4^{2-} i kationów Ca^{2+} , Mg^{2+} ,

Na^+ , K^+ . Nazwa gleb słonych pochodzi zazwyczaj od nazwy anionów, których zawartość przekracza 20%, a nazwa dominującego anionu zapisywana jest na końcu. Przewiduje się następujące typy zasolenia (chemizmu): chlorkowe, siarczanowo-chlorkowe, chlorkowo-siarczanowe, siarczanowe, sodowo-siarczanowo-chlorkowe, sodowo-chlorkowo-siarczanowe, sodowo-chlorkowe, sodowo-siarczanowe, siarczanowe i chlorkowo-wodorowęglanowe. Gleby słone klasyfikuje się także według stopnia zasolenia, określanego przez sumę łatwo rozpuszczalnych soli w glebie. Wyodrębniono następujące stopnie zasolenia: gleby słabo, średnio, silnie i bardzo silnie zasolone. Ilość soli rozpuszczalnych w każdej kategorii zasolenia jest różna i zależy od ich toksyczności w stosunku do roślin. W tabeli 2 i 3 przedstawiono przedziały stężenia wszystkich soli w poszczególnych kategoriach zasolenia gleb w zależności od ich chemizmu. Różnica między niezasolonymi a silnie zasolonymi glebami wynosi od 0,05% do 0,7% w przypadku zasolenia chlorkowego, od 0,1% do 0,8% – siarczanowo-chlorkowego, od 0,2% do 0,9% – chlorkowo-siarczanowego z małą zawartością gipsu, od 0,3% do 1,2% – zasolenia siarczanowego z małą zawartością gipsu i od 0,1% do 2,0% w przypadku gleb zasolenia siarczanowego z podwyższoną zawartością gipsu (tab. 3). Analogiczne wartości w odniesieniu do zasolenia chlorkowo-sodowego wynoszą od 0,1% do 0,5% i siarczanowo-sodowego – od 0,15% do 0,6% (tab. 2). Według głębokości zalegania poziomu słonego gleby słone podzielono na (Metodičeskie ukazani-

Tabela 2. Zasolenie gleb w zależności od składu chemicznego (Metodičeskie ukazaniya..., 1983)

Table 2. Salinity of soils depending on their chemical compounds

Kategorie zasolenia gleb / Categories of soil salinity	Chemizm / Chemical compounds [$\frac{\%}{me / 100g}$]				
	Chlorkowo-sodowy / Chlorido-sodium Cl:SO ₄ >1; NCO ₃ ; Cl>1; NCO ₃ >Ca+Mg; Na>Ca; Na >Mg				
	Suma / Total	SO ₄	CO ₃	HCO ₃	
niezasolone <i>none-affected</i>	<0,1	< $\frac{0,01}{0,3}$	$\frac{0,001}{0,03}$	$\frac{0,08}{1,4}$	
słabo solonczakowe <i>slightly saline</i>	0,1-0,2	$\frac{0,01 - 0,02}{0,3 - 0,7}$	$\frac{0,001 - 0,002}{0,03 - 0,07}$	< $\frac{0,08 - 0,09}{1,4 - 1,5}$	
średnio solonczakowe <i>moderately saline</i>	0,2-0,3	< $\frac{0,07}{2,0}$	$\frac{0,002 - 0,006}{0,07 - 0,2}$	$\frac{0,09 - 0,12}{1,5 - 2,0}$	
silnie solonczakowe <i>strongly saline</i>	0,3-0,5	$\frac{0,1}{3,0}$	$\frac{0,006 - 0,01}{0,2 - 0,4}$	$\frac{0,12 - 0,18}{2,0 - 3,0}$	
bardzo silnie solonczakowe / <i>extremely saline</i>	>0,5	$\frac{0,1}{3,0}$	> $\frac{0,001}{0,4}$	> $\frac{0,18}{3,0}$	
		Sodowo-siarczanowy / Sodium-chloride Cl:SO ₄ <1; NCO ₃ ; SO ₄ <1; HCO ₃ >Ca+Mg; Na>Mg; Na>Ca			
		Suma / Total	SO ₄	CO ₃	HCO ₃
niezasolone <i>none-affected</i>	-	-	-	-	-
słabo solonczakowe <i>slightly saline</i>	-	-	$\frac{0,001 - 0,002}{0,03 - 0,08}$	-	-
średnio solonczakowe <i>moderately saline</i>	0,25-0,4	$\frac{0,08 - 0,12}{1,7 - 2,5}$	$\frac{0,002 - 0,009}{0,08 - 0,3}$	$\frac{0,08 - 0,12}{1,4 - 2,0}$	
silnie solonczakowe <i>strongly saline</i>	0,4-0,6	$\frac{0,12 - 0,19}{2,5 - 4,0}$	$\frac{0,009 - 0,015}{0,3 - 0,5}$	$\frac{0,12 - 0,21}{2,0 - 3,5}$	
bardzo silnie solonczakowe / <i>extremely saline</i>	>0,6	> $\frac{0,19}{4,0}$	> $\frac{0,015}{0,5}$	> $\frac{0,21}{3,5}$	
		Siarczanowo-sodowy / Sulphato-sodium Cl; SO ₄ <1; NCO ₃ ; SO ₄ >1; NCO ₃ >Ca+Mg; Na>Ca; Na >Mg			
		Suma / Total	SO ₄	CO ₃	HCO ₃
niezasolone <i>none-affected</i>	<0,15	< $\frac{0,02}{0,5}$	< $\frac{0,001}{0,03}$	< $\frac{0,08}{1,0}$	
słabo solonczakowe <i>slightly saline</i>	0,15-0,25	$\frac{0,02 - 0,07}{0,5 - 1,4}$	$\frac{0,001 - 0,002}{0,03 - 0,08}$	$\frac{0,08}{1,4}$	
średnio solonczakowe <i>moderately saline</i>	0,25-0,4	< $\frac{0,10}{2,0}$	$\frac{0,002 - 0,009}{0,08 - 0,3}$	$\frac{0,08 - 0,15}{1,4 - 2,5}$	
silnie solonczakowe <i>strongly saline</i>	0,4-0,6	< $\frac{0,14}{3,0}$	$\frac{0,009 - 0,015}{0,3 - 0,5}$	$\frac{0,15 - 0,21}{2,5 - 3,5}$	
bardzo silnie solonczakowe / <i>extremely saline</i>	>0,6	> $\frac{0,14}{3,0}$	> $\frac{0,015}{0,5}$	> $\frac{0,21}{3,5}$	
		Sodowo-chlorkowy / Sodium-chloride Cl: SO ₄ >1; NCO ₃ ; Cl<1; NCO ₃ >Ca+Mg; Na>Ca; Na >Mg			
		Suma / Total	SO ₄	CO ₃	HCO ₃
niezasolone <i>none-affected</i>	-	-	-	-	-
słabo solonczakowe <i>slightly saline</i>	-	-	-	-	-
średnio solonczakowe <i>moderately saline</i>	-	-	-	-	-
silnie solonczakowe <i>strongly saline</i>	0,2-0,5	$\frac{0,05 - 0,11}{1,5 - 3,1}$	$\frac{0,001 - 0,01}{0,03 - 0,4}$	$\frac{0,08 - 0,18}{1,4 - 3,0}$	
bardzo silnie solonczakowe <i>extremely saline</i>	>0,5	> $\frac{0,11}{3,1}$	> $\frac{0,01}{0,4}$	> $\frac{0,18}{3,0}$	
		Siarczanowo-chlorkowo-wodorowęglanowe <i>sulphato-chlorido-hydrocarbonate</i> NCO ₃ >Cl; NCO ₃ >SO ₄ ; Na<Ca; Na <Mg; NCO ₃ >Na			
		Suma / Total	SO ₄	CO ₃	HCO ₃
niezasolone <i>none-affected</i>	<0,2	< $\frac{0,04}{0,9}$	< $\frac{0,01}{0,3}$	< $\frac{0,08}{1,4}$	
słabo solonczakowe <i>slightly saline</i>	0,2-0,4	< $\frac{0,1}{2,0}$	< $\frac{0,03}{1,0}$	< $\frac{0,12}{2,0}$	
średnio solonczakowe <i>moderately saline</i>	0,4-0,5	< $\frac{0,1}{2,0}$	< $\frac{0,07}{2,0}$	< $\frac{0,15}{2,4}$	
silnie solonczakowe <i>strongly saline</i>	-	-	-	-	
bardzo silnie solonczakowe <i>extremely saline</i>	-	-	-	-	

Tabela 3. Zasolenie gleb w zależności od składu chemicznego (Metodičeskie ukazanija..., 1983)

Table 3. Salinity of soils depending on their chemical compounds

Kategorie zasolenia gleb Categories of soil salinity	Chemizm / Chemical compounds [$\frac{\%}{\text{mc}/100\text{g}}$]					
	Chlorkowy / Chloride Cl:SO ₄ >2,5			Siarczanowo-chlorkowy Sulphato-chloride Cl:SO ₄ =1-2,5		
	Suma	Cl	SO ₄	Suma	Cl	SO ₄
niezasolone <i>none-affected</i>	<0,05	$\frac{0,01}{0,3}$	$\frac{0,006}{0,12}$	<0,1	$\frac{0,01}{0,3}$	$\frac{0,014}{0,3}$
słabo solonczakowe <i>slightly saline</i>	0,05-0,15	$\frac{0,01 - 0,03}{0,3 - 1,0}$	$\frac{0,006 - 0,02}{0,12 - 0,4}$	0,1-0,2	$\frac{0,01 - 0,03}{0,3 - 0,9}$	$\frac{0,014 - 0,04}{0,3 - 0,9}$
średnio solonczakowe <i>moderately saline</i>	0,15-0,3	$\frac{0,03 - 0,1}{1,0 - 3,0}$	$\frac{0,02 - 0,06}{0,4 - 1,2}$	0,2-0,4	$\frac{0,03 - 0,1}{0,9 - 2,8}$	$\frac{0,04 - 0,12}{0,9 - 2,5}$
silnie solonczakowe <i>strongly saline</i>	0,3-0,7	$\frac{0,1 - 0,25}{3,0 - 7,0}$	$\frac{0,06 - 0,13}{1,2 - 2,8}$	0,4-0,8	$\frac{0,1 - 0,23}{2,6 - 6,5}$	$\frac{0,12 - 0,26}{2,5 - 5,5}$
bardzo silnie solonczakowe <i>extremely saline</i>	> 0,7	$\frac{0,25}{7,0}$	$\frac{0,13}{2,8}$	>0,8	$\frac{0,25}{6,5}$	$\frac{0,26}{5,5}$
	Chlorkowo-siarczanowy / Chlorido-sulphate Cl:SO ₄ =0,2-1					
	(z małą zawartością gipsu) (with small amount of gypsum)			(z podwyższoną zawartością gipsu) (with large amount of gypsum)		
niezasolone <i>non-affected</i>	< 0,2	$\frac{0,01}{0,3}$	$\frac{0,07}{1,5}$	-	-	-
słabo solonczakowe <i>slightly saline</i>	0,2-0,4	$\frac{0,01 - 0,03}{0,3 - 0,8}$	$\frac{0,07 - 0,19}{1,5 - 4,0}$	-	-	-
średnio solonczakowe <i>moderately saline</i>	0,4-0,6	$\frac{0,03 - 0,1}{0,8 - 2,7}$	$\frac{0,19 - 0,39}{4,0 - 7,0}$	-	-	-
silnie solonczakowe <i>strongly saline</i>	0,6-0,9	$\frac{0,1 - 0,23}{2,7 - 6,4}$	$\frac{0,34 - 0,48}{7,0 - 10,0}$	-	-	-
bardzo silnie solonczakowe <i>extremely saline</i>	> 0,9	$\frac{0,23}{6,4}$	$\frac{0,48}{10,0}$	> 1,7	$\frac{0,2}{5,5}$	$\frac{1,06}{22,0}$
	Siarczanowy / Sulphate Cl:SO ₄ <0,2					
niezasolone <i>none-affected</i>	< 0,3	$\frac{0,01}{0,3}$	$\frac{0,16}{3,4}$	< 0,1	$\frac{0,01}{0,3}$	$\frac{0,68}{14}$
słabo solonczakowe <i>slightly saline</i>	0,3-0,4	$\frac{0,02}{0,6}$	$\frac{0,16 - 0,19}{3,4 - 4,0}$	1,0-1,2	$\frac{0,02}{0,6}$	$\frac{0,68 - 0,82}{14 - 17}$
średnio solonczakowe <i>moderately saline</i>	0,4-0,8	$\frac{0,07}{2,0}$	$\frac{0,19 - 0,48}{4,0 - 10}$	1,2-1,5	$\frac{0,07}{2,0}$	$\frac{0,82 - 0,96}{17 - 20}$
silnie solonczakowe <i>strongly saline</i>	0,8-1,2	$\frac{0,12}{3,5}$	$\frac{0,48 - 0,86}{10 - 18}$	1,5-2,0	$\frac{0,12}{3,5}$	$\frac{0,96 - 1,44}{20 - 30}$
bardzo silnie solonczakowe <i>extremely saline</i>	> 1,2	$\frac{0,12}{3,5}$	$\frac{0,86}{18,0}$	>2,0	$\frac{0,12}{3,5}$	$\frac{1,44}{30}$

ja..., 1983): solonczaki i gleby solonczakowe (0-30 cm), gleby płytko solonczakowate (30-50 cm), gleby średnio głębokosolonczakowate (50-100 cm), gleby głębokosolonczakowate (100-150 cm) oraz gleby głęboko zasolone (150-200 cm).

Solonczaki zawierają powyżej 1% soli łatwo rozpuszczalnych w wodzie (NaCl, Na₂CO₃, NaHCO₃, Na₂SO₄, MgSO₄, MgCl₂, CaCl₂, MgSO₄), natomiast gleby solonczakowe zawierają tych soli od 0,2 do 1%. Sole te tworzą na powierzchni solonczaków i gleb solonczakowych śnieżnobiałe naloty, których grubość dochodzi do 1 cm. Powstawanie solonczaków jest uzależnione od głębokości zalegania zmineralizowanych wód podziemnych. Roślinnością kształtującą solonczaki i gleby solonczakowe są halofity. Zawartość soli maleje w głąb profilu glebowego. W celu użytkowania rolniczego solonczaki i gleby solonczakowe wymagają przemycia profilu. Gleby solonczakowate są to gleby zawierające na głą-

bokości od 30 do 150 cm znaczne ilości łatwo rozpuszczalnych soli, tj. od 0,25 do 1,0% (Monin, 1957). W zależności od głębokości występowania soli, gleby solonczakowate podzielono na: płytko solonczakowate, gleby średnio głębokosolonczakowate, głębokosolonczakowate oraz głęboko zasolone. Sole głęboko zasolonych gleb nie mają wpływu na rozwój roślinności, natomiast przy nieprawidłowym nawadnianiu gleby te mogą zostać wtórnie zasolone. Sólność gleby wyraża się zawartością sodu wymiennego w kompleksie sorpcyjnym w ilości ponad 3% i brakiem łatwo rozpuszczalnych soli w wierzchnich poziomach (Kovda i in., 1967).

Sólność, jak i solonczaki, mieszczą się w kategorii gleb słonych zawierających zaabsorbowane jony sodu w pojemności sorpcyjnej gleby w ilości powyżej 25%. Charakteryzują się one brakiem łatwo rozpuszczalnych soli, wskutek czego cechują się: zasadowym odczynem, znaczną rozpuszczalnością substancji organicznych,

wysokim stopniem dyspersji i ruchliwością ilastej frakcji mineralnej, dużą zwięzłością i lepkością oraz słabą wymianą gazową (Bażenov, 1973). W stanie suchym poziom B sołonce często jest rozbity na charakterystyczne słupowe, pryzmatyczne jednostki strukturalne. Bardzo zwięzła struktura uniemożliwia rozwój korzeni roślin. W stanie mokrym i wilgotnym gleba ta staje się plastyczna i lepka (Kurbatov, 1955). Chlorki i siarczany w sołoncach, w odróżnieniu od sołoneczaków, znajdują się w dolnych poziomach profilu glebowego. Zasadowy odczyn sołonce waha się od 9–10 pH, co jest związane z wysoką zawartością jonów sodu w glebie. W glebach sołonce zawartość zaabsorbowanego sodu w kompleksie sorpcyjnym oscyluje w granicach od 3 do 25% w zależności od stopnia sołonce. Sołonce i gleby sołonce występują sporadycznie wśród gleb słonych.

W podziale sołonce gleb bierze się pod uwagę ich pochodzenie, stopień sołonce, chemizm i głębokość występowania poziomu sołonce. Według pochodzenia dzieli się je na sołonce automorficzne, hydromorficzne i semihydromorficzne. Sołonce automorficzne występują na wychodniach skał słonych, w których wody podziemne znajdują się na głębokości poniżej 10 m i nie mają wpływu na gromadzenie się soli. Sołonce hydromorficzne kształtują się w miejscach o niewielkiej 1-3 m, głębokości zalegania wód podziemnych, natomiast sołonce semihydromorficzne tworzą się przy głębszym, od 3 m do 10 m, zaleganiu wód podziemnych (Egorova i Bazylevič, 1973).

Przedstawienie stopnia sołonce opiera się na oznaczaniu zawartości zaabsorbowanego sodu w kompleksie sorpcyjnym. Zgodnie z tym wydzielono następujące stopnie sołonce, powodujące obniżenie urodzajności gleb (Rekomendacji po melioracji..., 1978):

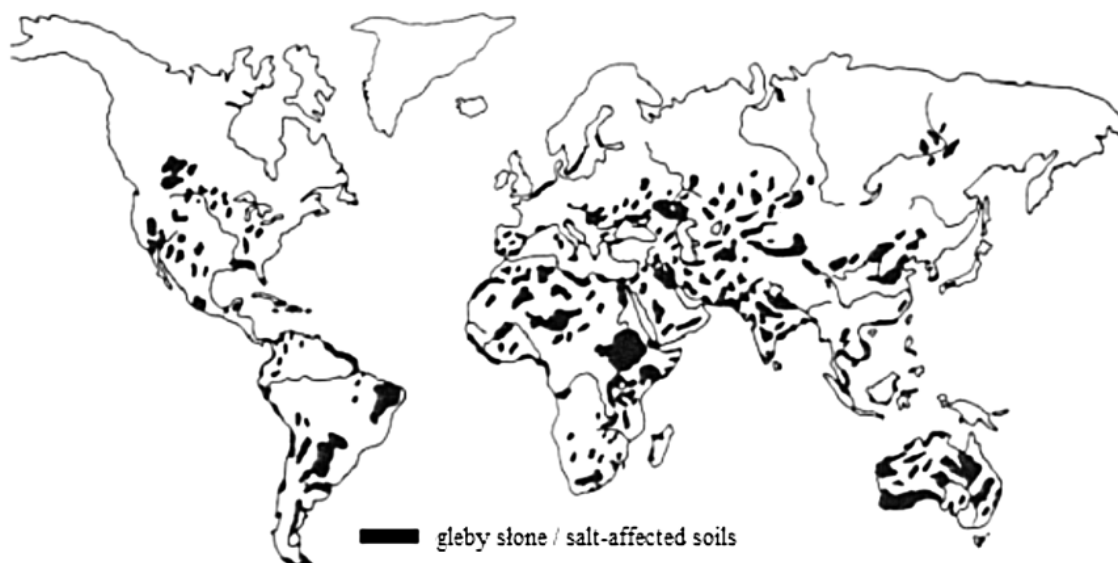
- słabo sołonce, zawierające 3-5% zaabsorbowanego sodu w pojemności sorpcyjnym, powodujące obniżenie urodzajności gleb o 10–20%;
- średnio sołonce, o zawartości zaabsorbowanego sodu 5–10%, powodujące obniżenie urodzajności gleb o 20-50%;
- silnie sołonce, zawierające 10–25% zaabsorbowanego sodu, powodujące spadek urodzajności gleb o 50-80%;
- sołonce lub sołonce sodowe zawierające powyżej 25% zaabsorbowanego sodu, nie użytkowane rolniczo.

Według chemizmu sołonce gleby klasyfikuje się na: sodowe i chlorkowo-siarczanowe (Monin, 1957). Według głębokości zalegania poziomu sołonce, gleby te dzieli się na: płytko słupkowe (do 7 cm), średnio słupkowe (od 7 do 15 cm) i głęboko słupkowe (poniżej 15 cm).

Sołonce są to gleby stanowiące kolejną fazę rozwoju sołonce odsolonych. W procesie odsolnienia w powierzchniowych poziomach następuje wyparcie jonów sodu z kompleksu sorpcyjnego i zastąpienie ich wodorem (Egorova i Bazylevič, 1973). Zachodzi dyspersja koloidów i rozkład krzemianu glinu. Związki żelaza i glinu są wymywane w głębsze poziomy, a bezpostaciowa krzemionka gromadzi się w górnych poziomach gleby. Morfologicznie profil sołonce jest podobny do profilu gleb bielcowych, ale mechanizm i właściwości powstawania tych gleb różnią się od siebie w sposób zasadniczy. Proces wymywania w sołonce zachodzi o wiele szybciej niż w glebach bielcowych (Gedrojc, 1968).

2.3. Rozmieszczenie gleb słonych w świecie

Gleby słone występują na wszystkich kontynentach poza Antarktydą. Tworzą najczęściej nieduże płyty wśród gleb strefy pustynnej i półpustynnej (rys. 1).



Ryc. 1. Rozmieszczenie zasolonych gleb w świecie wg Szabolcsa (1989)

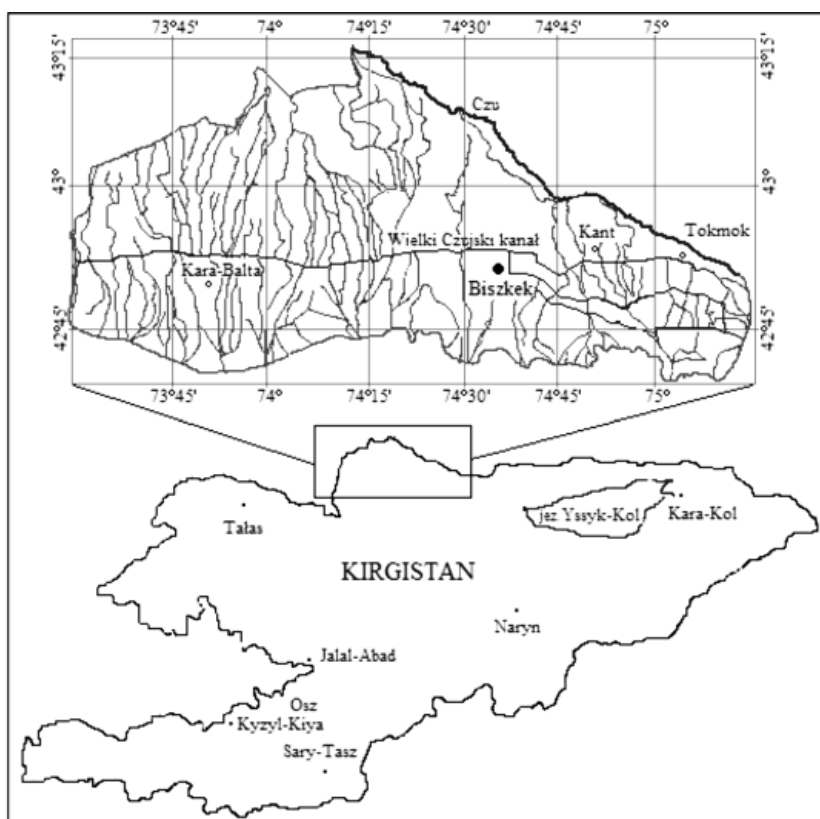
Fig. 1. Global distribution of salt-affected soils, according to Szabolcs (1989)

Łączny areal gleb zasolonych w świecie w połowie lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku szacowano na 955 mld ha, to jest 7% całej powierzchni lądów, z czego 77 mld ha stanowią gleby wtórne zasolone (Ghassemi i in., 1995). Areal solonczków i gleb solonczowatych w świecie wynosi ponad 210 mln ha (Bui i in., 1998). Według danych FAO/UNESCO około 20% powierzchni nawadnianych jest zasolona. W niektórych państwach, takich jak Egipt, Iran i Argentyna, łączna powierzchnia gleb zasolonych wynosi aż 30% powierzchni nawadnianych. Rocznie około 10 mln ha powierzchni nawadnianych gleb staje się nieużyteczna dla rolnictwa w wyniku silnego zasolenia. W świecie gleby słone występują w ponad 100 państwach. W części z nich, wymienionych poniżej, zasolenie stanowi jeden z głównych problemów rolnictwa.

Na poszczególnych kontynentach areal gleb słonych w końcu lat osiemdziesiątych XX wieku wynosił (Szabolcs, 1989):

- Europa – 50,8 mln ha; Austria, Grecja, Francja, Jugosławia, Republika Czeska, Rumunia, Hiszpania, Węgry, Włochy i europejska część Rosji;
- Ameryka Północna i Środkowa – 17,7 mln ha; Haiti, Kuba, Kanada, Meksyk i Stany Zjednoczone;
- Ameryka Południowa – 129,2 mln ha; Boliwia, Brazylia, Ekwador, Chile, Kolumbia, Paragwaj, Peru i Wenezuela;
- Afryka – 80,5 mln ha; Algieria, Angola, Benin, Botswana, Burkina Faso, Burundi, Ghana, Gwinea, Czad, Egipt, Etiopia, Gambia, Kamerun, Kenia, Liberia, Libia, Mali, Mauretania, Maroko, Nigeria, Niger, Senegal, Sierra Leone, Somalia, Sudan, Tanzania, Tunezja, Zair, Zambia i Zimbabwe;
- Azja Południowa i Bliski Wschód – 84,8 mln ha; Afganistan, Arabia Saudyjska, Bangladesz, Birma, Indie, Iran, Irak, Izrael, Jemen, Jordania, Liban, Katar, Kuwejt, Oman, Pakistan, Sri Lanka, Syria i Turcja;
- Azja Północna i Środkowa – 211,7 mln ha; Chiny, Kirgistan, Kazachstan, Mongolia, Uzbekistan, Turkmenistan i Tadżykistan;
- Azja Południowo-Wschodnia – 19,9 mln ha; Indonezja, Tajlandia i Wietnam;
- Australia – 357,3 mln ha.

W Azji Środkowej powierzchnia gleb słonych wynosiła 7,86 mln ha (Szabolcs, 1989), z czego 1,93 mln ha występowało w Kazachstanie (Dukhovny, 1985), w Uzbekistanie około 2,1 mln ha (Pankova i Ruchovič, 1999), w Turkmenistanie 1 mln ha (Pankova i Ruchovič, 1999), a w Kirgistanie 1,17 mln ha (Mamytov, 1995; Mohinder i Mudahar, 1998; Nacional'nyj plan dejstvij..., 2000).



Ryc. 2. Dolina Czuj w granicach Kirgistanu (Atlas Kirgizskoj SSR, 1987)

Fig. 2. Location of the Chuy Valley in Kyrgyzstan

3. Opis obszaru badawczego

3.1. Położenie geograficzne

Dolina Czuj, leżąca w środkowej Azji, w dorzeczu morza Aralskiego, otoczona jest z południa Pasmem Kirgiskim, od północnego-wschodu górami Czu-Zailijskimi, a od zachodu płaskowyżem Betpak-Dala i pustynią Lusok-Kum. Powierzchnia całej doliny wynosi 3,5 mln ha. Dolina Czuj jest położona w obrębie Kirgistanu i Kazachstanu. Kirgiską, to jest lewobrzeżną, południową część doliny rozdziela od części kazachskiej rzeka Czu. Obszarem badań niniejszej pracy jest tylko kirgiska część doliny Czuj. Część ta obejmuje 615 tys. ha i rozciąga się pomiędzy 42°40' a 43°15'N oraz 73°30' a 75°15'E (rys. 2).

Rozciągłość równoleżnikowa tej części doliny wynosi około 250 km. Szerokość zachodniej części wynosi 90–100 km. Część ta stopniowo przechodzi w strefę pustyni Moun-Kum w Kazachstanie. Szerokość wschodniej części wynosi 10–12 km. Łączy się ona z doliną Issyk-Kol przez wąwóz Boom. Rzeka Czu jest głównym źródłem wody dla rolnictwa tej doliny. Średnioroczny odpływ z dorzecza rzeki Czu wynosi 3525 mln m³. Długość rzeki Czu w granicach Kirgistanu wynosi 220 km (Zemel'no-vodnye resursy..., 1990). Dolina znajduje się na wysokości od 550–1500 m n.p.m. W dolinie Czuj mieści się ponad niż 32% powierzchni wszystkich gruntów rolnych kraju, które stanowią tylko 9,4% terytorium Kirgistanu.

3.2. Geologia

Cała dolina Czuj oraz otaczający ją od południa Pasma Kirgiskie znajdują się w obrębie fałdowania kaledońskiego, ulutoo-północno-tienszańskiej strefy facjalnej. W obrębie doliny występują dwie struktury geologiczne: górzysta, zbudowana ze skał prekambryjsko-paleozoicznych, leżąca w południowej części doliny, oraz dolina, mająca prekambryjsko-paleozoiczny fundament i pokrywą mezozoiczno-kenozoiczną (Aliev i in., 1985).

Okres prekambryjski występuje na zboczach Pasma Kirgiskiego, w rejonie rzeki Kegeti-Yssyk-Ata. Zbocza te są zbudowane z łupków węglanowo-kwarcowych, zmarmuryzowanych wapieni węglowych, fyllitów i piaskowców o miąższości wynoszącej 5000-6000 m. Skały prekambryjskie, o miąższości 1800-1950 m, występują również w zachodniej części doliny Czuj i w pobliżu rzeki Aspara. Wschodnie skał paleozoicznych, występujące w zachodniej części doliny Czuj, o miąższości od 500 do 1500 m, składają się ze skał efuzyjno-teryogenicznych (porfirytów diabazowych, tufów, piaskowców i łupków) oraz ze skał wulkanicznych i wulkaniczno-osadowych we wschodniej części doliny. Skały wytworzone w ordowiku występują głównie we wschodniej części doliny Czuj, w dorzeczeniach rzek Szamszy, Aspara i Kurgaty, a także w niewielkich fragmentach wzdłuż wschodniej części przełomu Czou-Kemińskiego. Miąższość tych skał dochodzi do 1400 m. Skały pochodzące z dewonu występują w środkowej części doliny i na zboczach Pasma Kirgiskiego, o miąższości od 700 do 1800 m i składają się z konglomeratów, żwirów, piaskowców i aleurytów. Skały wytworzone w karbonie, o miąższości od 100 do 600 m, spotyka się w rejonie rzek: Kegeti, Aksuu oraz Kara-Balta. Zbudowane są one z szarozielonych i czerwonych piaskowców, wapieni, tufów i aleurytów. Skały permskie, reprezentowane przez utwory wulkaniczno-teryogeniczne o miąższości od 800 do 1732 m, występują tu bardzo rzadko. Spotyka się je tylko w basenie rzek Szamsi, Komorczyk, Kok-Dzar-Suu i Aszkultor.

Skały kenozoiczne pokrywają 70% powierzchni doliny. Są to głównie utwory aluwialne, proluwialne i deluwialne, naniesione przez wody pochodzenia lodowcowego. W dolinach rzecznych tworzą je piaski i pyły o miąższości 550 m. Wyróżnia się w nich część dolną, aluwialną, zbudowaną z piaskowców i aleurytów, oraz część górną proluwialno-deluwialną, złożoną z konglomeratów i piaskowców gruboziarnistych. Skały te, zbudowane z drobnoziarnistych i grubo-ziarnistych utworów o miąższości od 300 do 600 m, występują także w basenie rzeki Noruz. Skały osadowe dolnego czwartorzędu, o miąższości 40 m, znajdują się tylko na niewielkich fragmentach Pasma Kirgiskiego. Zbudowane są one z drobnych kamieni, żwirów i piasków, pokrytych glinami pylastymi. Skały środkowego czwartorzędu w dolinie Czuj, o miąższości 30-40 m, występują w najwyższych terasach oraz na równinach proluwialnych i aluwialno-proluwialnych rzek Sokuluk, Dżylamysz, Alamedin i Noruz. Zbudowane są one ze żwirów, drobnych kamieni i piasków drobnoziarnistych. Skały górnego czwartorzędu doliny Czuj,

zbudowane z gruzu skalnego, głazów, żwiru i piasków o miąższości do 100-150 m, znajdują się w pokrywie akumulacyjnej teras i stożków drugiego piętra i w morenach pierwszego stadium zlodowacenia kirgiskiego.

3.3. Rzeźba terenu

Dolina Czuj jest otwartą od północy formą terenu, tj. od strony pustyni Moun-Kum, a zamkniętą od wschodu i południa Pasmem Kirgiskim i górami Czuj-Zailijskimi. Pasma Kirgiskie zaczyna się na wschodzie górą Kyzyl-Ompol, osiągając w najwyższym punkcie, tj. na szczycie Zachodniego Alamedin, wysokość 4385 m n.p.m. Pasma tych gór rozciąga się dalej 250 km na zachód, stopniowo obniżając się do wysokości 3000 m n.p.m. w pobliżu górnego biegu rzeki Aspara. Pasma Kirgiskie tworzą góry: Oktorkoj, Kok-Dżon, Bajbicze-Soru i Terek-Dżon. Całą dolinę Czuj w obrębie Kirgistanu dzieli się na części: górską, przedgórską i równinną. Górską część obejmuje północne zbocze Pasma Kirgiskiego i zachodni stok gór Czuj-Zailijskich. Duża wysokość Pasma Kirgiskiego powoduje, że jego szczyty pokryte są wiecznymi śniegami i lodowcami. Przedgórze, rozciągające się pomiędzy północnym stokiem Pasma Kirgiskiego a równinną częścią doliny, osiąga wysokość 1800-2200 m n.p.m. Część ta jest silnie urzeźbiona i rozczłonkowana w wyniku działalności rzek górskich, a załęgające tam w skałach sole: halit (NaCl), mirabilit ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) i glauberit ($\text{CaNa}_2(\text{SO}_4)_2$) są wymywane i przenoszone do niżej położonej części równinnej. Równinna część doliny Czuj ma charakter proluwialno-aluwialny i aluwialny. Jej fragment proluwialno-aluwialny, silnie rozczłonkowany parowami i dolinami rzeczny, rozpościera się na wysokości 600-850 m n.p.m. W swej części północnej parowy te osiągają 5 m głębokości, a doliny rzeczne zagłębiają się nawet do 10-15 m, natomiast w południowej części głębokość tych form osiąga jedynie 1,5-3 m. Aluwialna część doliny rzeki Czuj, znajdująca się poniżej 600 m n.p.m. z najniższym punktem na wysokości 539 m n.p.m., ma szerokość od 2 do 8 km na terytorium Kirgistanu.

3.4. Warunki klimatyczne

Dolina Czuj znajduje się w obrębie silnego wpływu kontynentalnych mas powietrza, kształtujących pogodę w Azji Środkowej. Leży ona w strefie klimatu półpustynnego i suchych stepów, z gorącym latem, ostrą zimą oraz opadami przeważającymi w okresie wiosny (Rjazancev, 1965). Ze względu na położenie doliny Czuj między Pasmem Kirgiskim a Górami Czuj-Zailijskimi, rozkład opadów, temperatury i wilgotności powietrza jest nierównomierny na jej obszarze i zależy od wysokości n.p.m. Uwzględniając to Dejč (1973) umiejscawia dolinę Czuj w północno-tienszańskiej prowincji glebowo-klimatycznej i dzieli jej obszar na strefy klimatyczne: dolną, środkową i przedgórską. Strefa dolna, rozpościerająca się w północno-zachodniej części doliny rzeki Czuj na wysokości 550-650 m n.p.m., ma charakter pół-

pustynny ze średnimi rocznymi opadami wynoszącymi zaledwie 282 mm. Środkowa strefa, znajdująca się w środkowej części doliny na wysokości 650–1000 m n.p.m., ma cechy klimatu suchych stepów ze średnimi rocznymi opadami wynoszącymi 401 mm z maksimum przypadającym na marzec i kwiecień oraz minimum na sierpień i wrzesień. Strefa przedgórska, rozciągająca się wzdłuż Pasma Kirgiskiego na wysokościach powyżej 1000 m n.p.m., ma średnie roczne opady wynoszące 501 mm, wzrastające wraz z wysokością. Nierównomierny rozkład opadów w ciągu roku i ich niewielka ilość w lecie powoduje duży niedobór wilgotności powietrza. Średnia roczna wilgotność względna powietrza w dolinie Czuj wynosi 60%. Jej maksymalna wartość dochodzi w zimie i wczesną wiosną do 80%, natomiast minimalna w lecie do 39%. Średnia roczna wielkość parowania terenowego wynosi od 1100 do 1600 mm i jest 2-3 krotne większa od średniej rocznej sumy opadów. Wskaźnik wilgotności, definiowany jako stosunek średnich opadów do średniego parowania w roku, wynosi poniżej 1, co wskazuje na potrzebę sztucznego nawadniania tego obszaru (Bakalo, 1974). Również temperatura powietrza wykazuje znaczne zróżnicowanie pionowe, wyraźnie obniża się wraz z wysokością. Średnia miesięczna temperatura w lipcu na wysokości od 650 do 800 m n.p.m. wynosi 23–24°C, na wysokości powyżej 1500 m n.p.m. – poniżej 17°C, a powyżej 3000 m n.p.m. – poniżej 9°C. Średnia roczna temperatura powietrza w całej dolinie – 9,4°C, a jej wartość maksymalna i minimalna w roku wynosi odpowiednio 41°C i -29°C. Średnia roczna pokrywa śniegu wynosi 15 cm. W znacznej części okresu zimnego dolina Czuj znajduje się pod wpływem niżu syberyjskiego, z południowego-zachodu powodującego mroźną pogodę. Taka pogoda wiąże się także z nadejściem z północnego-zachodu, zachodu oraz z północy silnych wiatrów znad otwartych przestrzeni pustynnych. Nadejście wyzów północnokaspijskiego, murgabskiego i amurdarińskiego powoduje ocieplenie. Wiosna w dolinie trwa krótko. Okres wegetacyjny zaczyna się w drugiej połowie marca i trwa do drugiej połowy października. Posucha glebowa w dolinie zaczyna się w połowie czerwca, często powodując duże straty w uprawach zbożowych na nie-nawadnianych gruntach.

3.5. Sieć hydrograficzna

Sieć hydrograficzną doliny Czuj tworzą rzeki spływające z gór. Rzeki te są zasilane wodami pochodzących ze śniegów i lodowców górskich. Według Maksimova (1964) na północnych stokach Pasma Kirgiskiego znajdują się 483 lodowce o łącznej powierzchni 472,5 km². Średnia powierzchnia lodowców wynosi 1 km², a powierzchnia największego z nich 10 km². W lodowcach tych gromadzi się 29,5 km³ śniegu, co daje 26,2 km³ uwiecznionej w nich wody. Do doliny spływa rocznie 124,5 m³/s wody. Największym ciekim doliny jest rzeka Czu, która w 1/3 swej długości przepływa przez terytorium Kirgistanu. Borovski (1982) zaliczył rzeki doliny Czuj do chlorkowo-siarczanowego basenu Morza Aralskiego.

Zasilanie rzek doliny Czuj podzielono na następujące typy (Zemel'no-vodnye resursy..., 1990):

- śnieżne, charakterystyczne dla niewielkich cieków z równomiernym i niewielkim wiosennym przybojem, takich jak: Taldy-Bulak, Burana, Norus i Czolak-Kaindy;

- śnieżno-lodowcowe, właściwe dla rzek średniej wielkości z przybojem wód w lipcu i sierpniu, takich jak: Kyzyl-Suu, Kegeti, Dżalamasz, Czoz-Kaindy, Dżarly-Kaindy, Alamidin, Sokuluk, Kara-Balta i Ala-Arcza.

Do nawodnień gruntów rolnych doliny Czuj wykorzystuje się wody następujących rzek: Kaindy, Kara-Balta, Ak-Suu, Sokuluk, Ala-Arcza, Alamedin, Yssyk-Ata, Szamsi, Kegeti, Taldy-Bulak i Krasnaja. W obrębie tej doliny w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku wykorzystywany był system nawadniający o łącznej długości 1917,6 km (tab. 4). Ukształtowanie terenu i budowa geologiczna doliny Czuj i jej otoczenia sprzyjają gromadzeniu znacznych zasobów wód podziemnych w dolinie. Wody podziemne są zasilane wodami spływającymi z południowego zbocza Pasma Kirgiskiego. Są one magazynowane głównie w równinnej części doliny Czuj. W tabeli 5 przedstawiono areale nawadnianych gruntów o różnej głębokości zalegania wód podziemnych w poszczególnych rejonach administracyjnych leżących w obrębie badanej części doliny Czuj.

Wody podziemne, płytko zalegające na głębokości od 0,5 do 3,0, występują w równinie proluwialno-aluwialnej. Południowa część tej równiny ma dobrze rozwiniętą naturalną sieć drenującą, a ich wody są słabo zmineralizowane. Północna część charakteryzuje się słabo rozwiniętą siecią drenującą, przy czym wody są zmineralizowane w średnim i silnym stopniu, co jest przyczyną zasolenia gleb. Wody podziemne zalegające na tak małej głębokości powodują zasolenie i zabagnienie gleb. Wody podziemne znajdujące się na głębokości od 3 do 10 m zajmują największe areale słabo nachylonych stoków zachodniej części doliny Czuj i częściowo równinę proluwialno-aluwialną. Te wody podziemne także są zmineralizowane w średnim i silnym stopniu, a pod wpływem nawadniania podnoszą się powodując zasolenie gleb.

3.6. Gleby

Biorąc pod uwagę zróżnicowanie rzeźby terenu, warunki hydrograficzne i geologiczne, dolinę Czuj zalicza się do północno-tienszańskiej prowincji glebowej (Bażenov, 1967; Mamytov i in. 1991). W zależności od wysokości terenu gleby doliny dzieli się na: górsko-dolinne, kształtujące się na pylastych glinach piaszczystych, oraz górskie, formujące się na słonych skałach macierzystych.

W grupie gleb górsko-doliny występują: gleby bagienne, łąkowo-bagienne, aluwialne i aluwialno-łąkowe, szaroziemie łąkowe, szaroziemie północne, gleby kasztanowe, gleby łąkowo-szaroziemne i czarnoziemie (rys. 3).

Tabela 4. Systemy nawadniające w rejonach administracyjnych w obrębie doliny Czuj (Čuj oblusu, 1994)
 Table 4. Irrigation systems of administrative units within the Chuy Valley

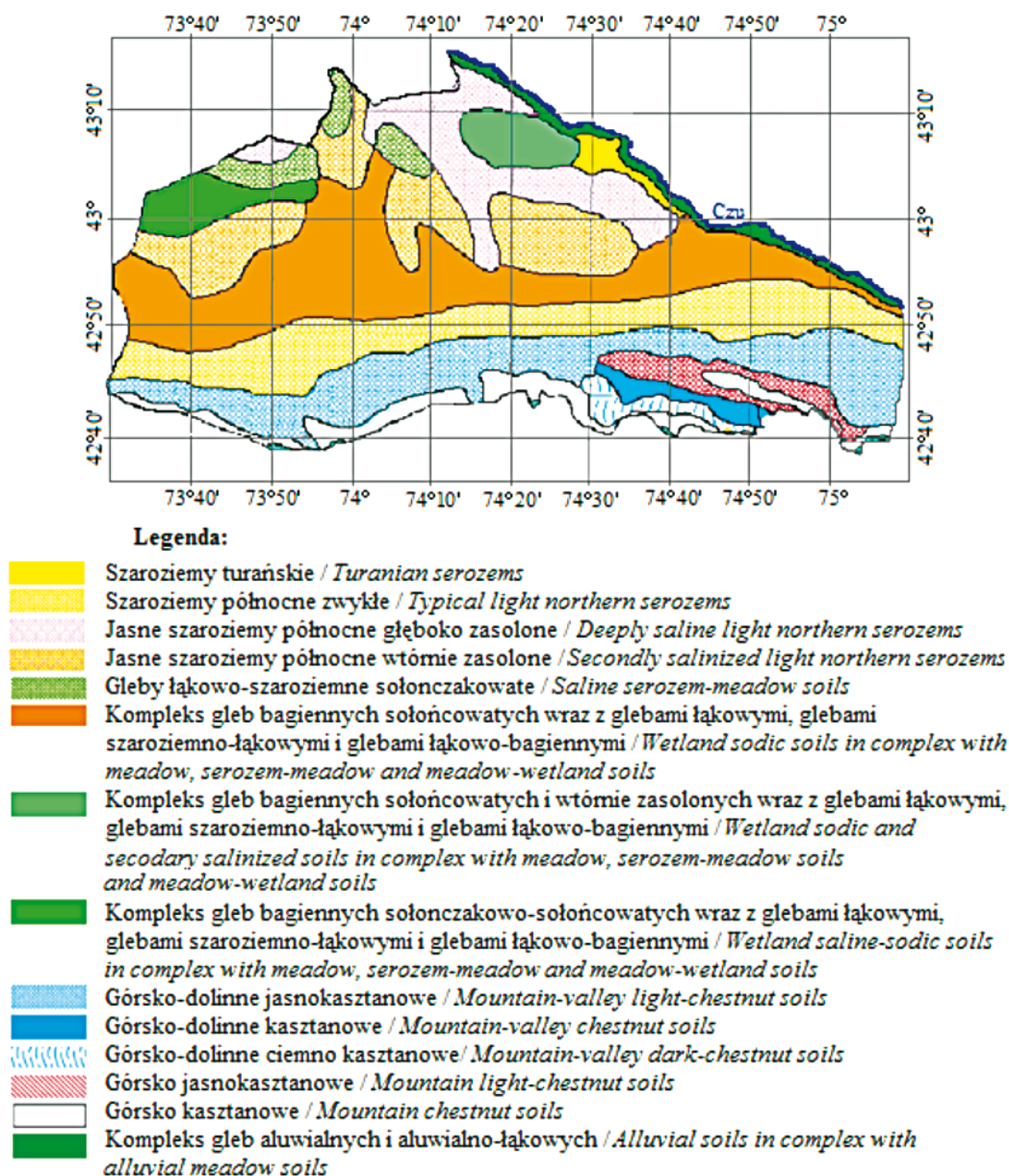
Rejony administracyjne <i>Administrative units</i>	Systemy nawadniające <i>Irrigation systems</i>	Łączna długość [km] <i>Total length [km]</i>	Nawadniany areał [tys. ha] <i>Irrigated areas [thousands ha]</i>
Alamedziński	Zachodni Wielki Czujski Kanał, Wschodni Wielki Czujski Kanał, Południowy Wielki Czujski Kanał, Tusz, Kirgystan, Kara-Koo, Czon-Alysz	434,1	37,9
Dżailski	P-22, LMK, Czon, Dżetigen, Tasz, Otagon	42,3	28,0
Yssyk-Atiński	Zachodni Wielki Czujski Kanał, Wschodni Wielki Czujski Kanał, Krasnoreczeński, Kegeti, Yssyk-Ata, Dungański, Klewerny	522	27,0
Kantski	Zachodni Wielki Czujski Kanał, Południowy Wielki Czujski Kanał	552	28,6
Moskiewski	Ak-Suu, Sokuluk, Wielki Czujski Kanał,	217,3	44,3
Panfilow	Dżardy-Kaindy, Aszmara, Taldy-Bulak, Czolok-Kaindy, Czon-Kaindy	30,1	31,7
Sokulukski	Kazenny, Dżantaj, Dżylamysz, Nowotroizki, Czon-Czujski,	25,3	56,4
Czujski	Wschodni Wielki Czujski Kanał,	94,5	34,8
Cały obszar	wszystkie powyższe kanały	1917,6	288,7

Tabela 5. Areał nawadnianych gruntów w tys. ha w zależności od głębokości zalegania wód podziemnych ustalony na 1 listopada 1990 roku wg Ministerstwa Rolnictwa Kirgistanu (Zemel'no-vodnye resursy..., 2000)
 Table 5. The area of irrigated lands (in thousand ha) depending on the depth of occurring ground water, established November, 1st 1990 according to the Ministry of Agriculture of Kirgystan

Rejony administracyjne <i>Administrative units</i>	Głębokość zalegania wód podziemnych w [m] <i>The depth of occurring ground water</i>						Razem <i>Total</i>
	< 1,0	1,0-1,5	1,5-2,0	2,0-3,0	3,0-5,0	> 5,0	
Alamedziński	0,54	1,1	3	3,54	3,65	18,2	30,03
Yssyk-Atiński	0,51	0,74	0,86	2,24	2,17	20,08	26,61
Dżailski	-	0,32	7,94	13,65	4,85	12,24	39,01
Kantski	0,9	1,93	2,34	6,47	3,32	14,41	29,38
Moskiewski	0,17	2,18	15,21	5,37	3,29	16,83	43,05
Panfilowski	0,07	3,39	6,68	9,48	2,59	10,73	32,94
Sokulukski	0,19	1,77	4,61	20,82	10,52	17,89	55,81
Czujski	-	-	-	-	-	32,32	32,32
Cała dolina	2,38	11,43	40,64	61,57	30,39	142,7	289,15

Gleby bagienne kształtują się przy płytkim zaleganiu słabo węglanowych, zmineralizowanych wód podziemnych. Mają odczyn zasadowy, 8-9 pH, i zawierają od 8 do 12% materii organicznej. Gleby te charakteryzują się wyraźnie zaznaczonym poziomem, zawierającym od 10 do 12% węglanów. Są one często sołńcowate. Gleby łąkowo-bagienne powstają w kompleksie z glebami łąkowymi przy płytkim zaleganiu wód podziemnych na głębokości od 0,5 do 1 m. Zawartość próchnicy dochodzi w nich do 10%. Gleby te w poziomach wierzchnich są słabo węglanowe. Miejscami są one zasolone. W pobliżu koryta rzeki Czuj występują też gleby aluwialne i aluwialno-łąkowe, tworzące się pod wpływem płytkiego zalegania wód podziemnych na głębokości od 1 do 2 m pod roślinnością mezofilną. Gleby te zawierają od 3 do 6% materii organicznej oraz węglany

w powierzchniowych poziomach. Są one w różnym stopniu zasolone. Gleby łąkowo-szaroziemne kształtują się przy bliskim zaleganiu wód podziemnych na głębokości od 1,5 do 3 m pod roślinnością trawiasto-turzycową. Swe największe płaty tworzą w środkowej części doliny Czuj oraz w pobliżu koryta rzeki Czuj. Silnie zmineralizowane wody doprowadziły do powstawania zasolonych kompleksów tych gleb o charakterze siarczanowym, sodowo-siarczanowym i chlorkowo-siarczanowym. Ich odczyn waha się od słabo do mocno zasadowego, a zawartość próchnicy wynosi od 1,5 do 4%. Szaroziemne łąkowe formują się w warunkach dużego uwilgotnienia wynikającego ze stosunkowo głębokiego, większego niż 3 m, zalegania wód podziemnych i obecności roślinności efemeryczno-trawiasto-turzycowej. Gleby tę zajmują północną oraz środkową część doliny Czuj. Zawartość



Ryc. 3. Mapa gleb doliny Czuj (Atlas Kirgizskiej SSR, 1987)

Fig. 3. Soil cover of the Chuy Valley

próchnicy waha się w nich od 2 do 4,5 %. Gleby te zawierają niewiele węglanów w poziomach powierzchniowych, a ilość tej substancji wyraźnie wzrasta wraz z głębokością. Szaroziemny łąkowe są w różnym stopniu zasolone i solonczakowate, co jest skutkiem ich niedostatecznego zdrenowania. Szaroziemny północne zajmują przedgórskie zbocza Pasma Kirgiskiego i dawnej terasy rzeki Czuj na wysokości 600–1000 m n.p.m. Podzielone są one na jasne szaroziemny północne i ciemne szaroziemny północne. Jasne szaroziemny północne kształtują się na pylastych piaszczystych glinach pod roślinnością stepowo efemeryczną i występują w północno-zachodniej części doliny Czuj na wysokości 500-600 m n.p.m. Gleby te mają odczyn słabo zasadowy i zawierają 0,8–1,7% materii organicznej. Zawartość węglanów w powierzchniowych poziomach tych gleb jest niewielka i ilość ich

wzrasta wraz z głębokością. Nawodnienie umożliwia ich wykorzystanie do celów ogrodniczych i sadowniczych. Wody podziemne znajdują się na głębokości 6–15 m, jednak nadmierne ich nawadnianie może podnieść poziom wód podziemnych, spowodować wtórne zabagnienie i w rezultacie także zasolenie i zasolonicowanie.

Ciemne szaroziemny północne kształtują się pod roślinnością efemeryczno-piołunową i spotykane są na wysokości 600-900 m n.p.m. Mają odczyn słabo zasadowy i w odróżnieniu od jasnych szaroziemów północnych charakteryzują się ciemniejszym poziomem próchnicznym, zawierającym materię organiczną w przedziale 1,5–2,5%. Zawierają one małą ilość węglanów, a wody podziemne, niezasolone, zalegają głęboko. Gleby te są również niezasolone. Tylko fragmentarycznie występują ich niewielkie powierzchnie solonczakowate, zawierające

15–19% wymiennego sodu w kompleksie sorpcyjnym. Gleby kasztanowe podzielone są na dwa podtypy: jasno- i ciemnokasztanowe.

Gleby jasnokasztanowe kształtują się pod roślinnością stepową ostnicowo-kostrzewowo-piołunową i występują u podnóża Pasma Kirgiskiego na wysokości od 1000 do 1400 m n.p.m. (Mamytov, 1965). Wody podziemne zalegają w nich dość głęboko i nie mają znaczącego wpływu na procesy glebotwórcze. Gleby te mają odczyn słabo zasadowy, a zawartość próchnicy waha się od 2 do 3,5%. Gleby ciemnokasztanowe występują w górnej części przedgórskiej równiny na wysokości powyżej 1400 m n.p.m. Charakteryzują się one odczynem obojętnym i słabo zasadowym. Zawierają około 3,5-6% próchnicy i nie są zasolone. Po nawodnieniu gleby te wykorzystywane są pod uprawy zbożowe i na trwałe użytki zielone. Czarnoziemy kształtują się pod roślinnością trawiasto-łąkową i występują na zboczach pasma gór Kirgiskich oraz na słabo nachylonych stokach przedgórza na wysokości powyżej 1500 m n.p.m. Ich wody podziemne zalegają dość głęboko. Gleby te mają odczyn obojętny. Zawierają około 9% materii organicznej i są niezasolone.

Do gleb zboczy górskich należą gleby: górsko-kasztanowe, czarnoziemy górskie i gleby górskie podobne do czarnoziemów. Gleby górsko-kasztanowe kształtują się pod roślinnością darniowo-trawiastą i piołunowo-trawiastą, na wysokości 1000–1500 m n.p.m. W zależności od ekspozycji zbocza górskiego gleby te dzieli się na: jasne, zawierające około 3% materii organicznej, występujące na zachodnich zboczach pasma Gór Kirgiskich, oraz ciemne, zawierające 6% materii organicznej, występujące na zboczach wschodnich tych gór. Czarnoziemy górskie, kształtujące się pod roślinnością trawiastą, łąkowo-stepową i łąkową, występują na wysokości powyżej 1400 m n.p.m. Gleby te zawierają do 9% materii organicznej i nie są zasolone. Gleby górskie, podobne do czarnoziemów, są niezasolone i zawierają do 10% materii organicznej. Kształtują się one w siedliskach lasów iglastych i występują na wysokości około 1500 m n.p.m. (Krinickaja i in., 1985).

Według Bażenova (1973) dolina Czuj leży w podprovincji czujskiej prowincji północno-tienszańskiej, jednej z trzech prowincji charakteryzujących się dużym zróżnicowaniem chemizmu gleb słonych. Podprovincja ta według Mamytova i in., (1991) cechuje się:

- przewagą udziału gleb hydromorficznych (206,4 tys. ha) nad glebami automorficznymi (62,7 tys. ha);
- występowaniem następujących typów zasolenia gleb hydromorficznych: wodorowęglanowego – 49% powierzchni, wodorowęglanowo-siarczanowego i siarczanowego – 43,9% oraz chlorkowo-siarczanowego – 6,3%;
- dużym arealem gleb bagiennych o następującej głębokości zalegania wód podziemnych: poniżej 1 m – 25,7 tys. ha, od 1 do 2 m i od 2 do 3 m – po 88,2 tys. ha, od 3 do 5 m – 64,1 tys. ha, od 5 do 10 m – 48,2 tys. ha i powyżej 10 m – 17,8 tys. ha.

Mamytov (1986) lokuje dolinę Czuj w obrębie chlorkowo-siarczanowego i sodowo-siarczanowego typu zasole-

nia. W jej obrębie wydzielił on trzy okręgi zasolenia: zachodnio-czujski, o typie zasolenia siarczanowym i sodowo-siarczanowym, środkowo-czujski o zasoleniu siarczanowym i chlorkowo-siarczanowym oraz wschodnio-czujski, o typie chlorkowo-siarczanowym. Łączna powierzchnia gleb solonczakowych i solonczakowatych w dolinie Czuj została oceniona w 1989 roku przez Mamytova i in. (1991) na 173,3 tys. ha. Według Ministerstwa Rolnictwa Kirgistanu w połowie lat osiemdziesiątych gleby solońcowate w dolinie Czuj zajmowały 86,2 tys. ha (Instrukcja po melioracji..., 1986).

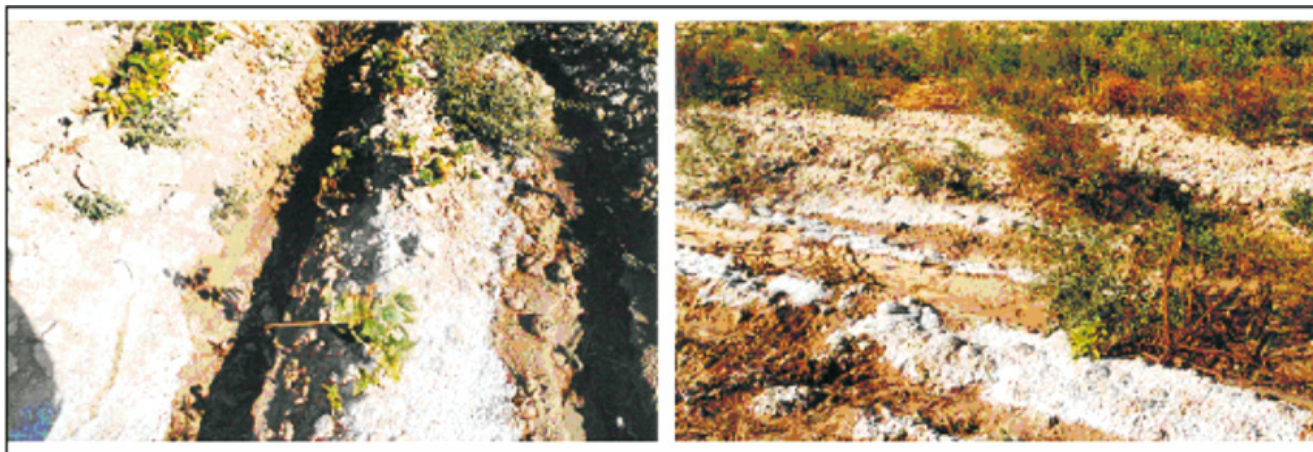
3.7. Pokrywa roślinna

Według Nikitina (1962) w dolinie Czuj oraz na północnych zboczach Pasma Kirgiskiego przed zagospodarowaniem rolniczym występowało ponad 2500 gatunków roślin. Naturalną pokrywą tworzyła półpustynna roślinność efemeryczna i piołunowa z przewagą piołunu (*Artemisia absinthium* L.), wiechliny (*Poa* L.), sitowia (*Scirpus* L.) i turzyc (*Carex* L.). Użytkowanie rolnicze spowodowało istotne zmiany. Dotychczasowa roślinność została zdominowana przez roślinność suchych stepów z przewagą piołunu (*Artemisia absinthium* L.), kostrzewy bruzdkowanej (*Festuca sulcata* Hack L.) i wiązówki (*Filipendula* L.). Naturalna roślinność doliny przetrwała tylko na niewielkich kamienistych fragmentach nie użytkowanych rolniczo. W dolinach rzecznych, w warunkach płytkiego zalegania wód podziemnych, powstały łąki otoczone szarą roślinnością kserofilną. W strefie bagiennej, przy zaleganiu wód podziemnych na głębokości 2-5 m, pojawiła się trzcina pospolita (*Phragmites communis* L.) i lukrecja (*Glycyrrhiza globra* L.).

W obszarze zalewowym rzeki Czuj, gdzie wody podziemne zalegają do głębokości 1 m, spotykamy dzisiaj roślinność błotną trzcinowo-trawiastą. Roślinność północnego zbocza Pasma Kirgiskiego różnicuje się wyraźnie na dwa piętra orograficzne: niższe, rozciągające się od 800 do 1200 m n.p.m., z roślinnością półpustynną piołunowo-efemeryczną i suchostepową oraz średnie piętro, leżące na wysokości powyżej 1200 m n.p.m. z roślinnością łąkowo-stepową i roślinnością lasów i łąk wysokich traw (Nikitina, 1962).

3.8. Użytkowanie terenu

Do 1917 roku rolnictwo doliny Czuj opierało się na koczowniczej hodowli zwierząt. Przejście z koczowniczego na osiadły tryb życia zamieszkującej tam ludności był związany z reformami w rolnictwie w latach 1921–1922, które doprowadziły do stworzenia kolchozów i sowchozów. Intensywne użytkowanie rolnicze doliny Czuj rozpoczęło się po drugiej wojny światowej wraz z zakończeniem budowy sieci kanałów irygacyjnych. Z 615 tys. ha powierzchni doliny Czuj największą jej część, 485 tys. ha, stanowiły wtedy użytki rolne (Mamytov, 1995). Obszary zabagnione, silnie zasolone i bardzo kamieniste zajmowały 52 tys. ha. Tereny zabudowane stanowiły 39 tys. ha. Wody powierzchniowe



Ryc. 4. Uprawa fasoli na powierzchni Panfilow (2004)

Fig. 4. Cultivated beans at the Panfilov tested area (2004)

zajmowały 5,5 tys. ha, a lasy zaledwie 0,03 tys. ha. Dolina Czuj jest jednym z największych zwartych obszarów uprawnych w Kirgistanie, stanowiącym 31,8% wszystkich użytków rolnych tego kraju. Według danych Mamytova (1995) w 1990 roku areał gruntów ornych wynosił 366,5 tys. ha, pastwisk – 90,3 tys. ha, upraw pastewnych – 19,46 tys. ha i trwałych użytków zielonych – 8,71 tys. ha. Na gruntach ornych uprawiano wtedy: buraki cukrowe, zboża, ziemniaki, tytoń, bawełnę, rośliny pastewne, owoce i warzywa.

Warunki klimatyczne doliny Czuj narzucają potrzebę intensywnego nawadniania gruntów części dolinnej i częściowo obszarów przedgórskich. W wyniku postępujących zaniedbań w konserwacji systemów irygacyjnych i przez to niewłaściwego nawadniania upraw, głównie w równinnej części doliny, stan istniejących tam gleb wyraźnie się pogorszył przez ich zasolenie. Według Ormonova (2002) na przełomie XX i XXI wieku, w dolinie Czuj gleby zasolone w różnym stopniu obejmowały 220 tys. ha, co stanowiło 36,7% całkowitej powierzchni tej doliny w obrębie Kirgistanu. Silnie zasolone (sołonzaki) i bardzo silnie zasolone gleby są nieprzydatne dla rolnictwa, a słabo i średnio zasolone gleby wykorzystuje się do uprawy roślin względnie odpornych na sól, takich jak: buraki cukrowe, bawełna, sorgo, jęczmień, żyto i lucerna (Buckman, Brady, 1971). Uprawianie mniej odpornych roślin: fasoli (rys. 4), kukurydzy, koniczyny i warzyw na takich glebach jest mało efektywne.

4. Materiały

4.1. Analogowe materiały kartograficzne i ich przetwarzanie

Do ogólnej charakterystyki doliny Czuj wykorzystano następujące dostępne materiały analogowe: mapy topograficzne w skali 1: 50 000, obejmujące 20 arkuszy opracowanych w latach 1989–1991 równinnej części

doliny Czuj i 8 arkuszy wykonanych w latach 1967–1989 przedgórskiej części oraz mapę fizyczną obwodu Czuj w skali 1: 500 000, mapę geologiczną Kirgistanu w skali 1: 1 500 000 i mapę glebową Kirgistanu w skali 1: 1 500 000.

W procesie klasyfikacji nadzorowanej gleb słonych wykorzystano:

- mapy glebowe gospodarstw rolnych, składające się z 12 arkuszy, obejmujących Moskiewski rejon administracyjny, opracowane w 2001 roku w skali 1:10 000;
- mapy zasolenia gleb gospodarstw rolnych, składające się z 14 arkuszy, obejmujących Panfilowski rejon administracyjny, opracowane w 1996 roku w skali 1:10 000.

Arkusze map topograficznych zostały zeskanowane z rozdzielczością 300 dpi, a następnie przekształcone do formatu *.rvc za pomocą oprogramowania TNTmips (*The Map and Image System*) profesjonalnej wersji 6.4. TNTmips jest oprogramowaniem stworzonym przez amerykańską firmę Microlmages Incorporated. W kolejnym kroku mapom topograficznym doliny Czuj nadano współrzędne układu „1942”. Na podstawie o tak przygotowanych map topograficznych, przez wektoryzację, wyznaczono granicę całej doliny Czuj w obrębie Kirgistanu oraz przebiegi cieków wodnych, kanałów, dróg, linii kolejowych oraz obszary zabudowane. Na podstawie wymienionych elementów wektorowych opracowano następujące mapy tematyczne doliny Czuj: sieć hydrograficzną, sieć drenażowo-irygacyjną, sieć komunikacyjną oraz tereny zabudowane. Pozostałe wymienione analogowe mapy tematyczne zeskanowano i przetworzono w sposób podobny jak mapy topograficzne. Następnie nadano im współrzędne z odpowiednich map topograficznych i dla fragmentów samej doliny Czuj utworzono cyfrowe warstwy tematyczne.

Ponadto wszystkie arkusze map glebowych i map zasolenia przetworzono do postaci cyfrowej, a następnie poddano scaleniu i wektoryzacji. Umożliwiło to stworzenie odpowiedniej bazy danych zawierającej informacje o zasoleniu poziomym powierzchniowego (0–25 cm)

i podpowierzchniowego (25–150 cm), chemizmie zasolenia, uziarnieniu gleb i użytkowaniu terenu. Utworzono również warstwy wektorowe zawierające punkty kontrolne, określające położenie odkrywek glebowych wybranych klas gleb słonych.

4.2. Dane satelitarne

W niniejszej pracy wykorzystano następujące obrazy satelitarne: Landsat TM, Landsat ETM+ oraz TERRA ASTER. Obrazy Landsat TM i Landsat ETM+ pochodzą z serwera FTP GLCF. Scena 30/150 o numerze ID 13935 została zarejestrowana przez satelitę Landsat TM 15 lipca 1994 roku o godzinie 05:05 GMT, przy wysokości Słońca 57° i kącie azymutalnym Słońca 120°. Scena ta zarejestrowana została przy całkowicie bezchmurnym niebie. W pracy wykorzystano wszystkie 7 kanałów: 0,45–0,52 μm (TM1), 0,52–0,6 μm (TM2), 0,63–0,69 μm (TM3), 0,76–0,9 μm (TM4), 1,55–1,75 μm (TM5), 2,08–2,35 μm (TM7) i 10,4–12,5 μm (TM6). Scena 30/150 o numerze ID 7151030000115950 została zarejestrowana przez satelitę Landsat ETM+ 6 czerwca 2001 roku o godzinie 05:35 GMT, przy wysokości Słońca 62,9° i kącie azymutalnym Słońca 131,8°. Scena ta została zarejestrowana przy całkowicie bezchmurnym niebie. Do interpretacji gleb słonych wykorzystane zostały wszystkie kanały, oprócz ósmego: 0,45–0,52 μm (ETM1), 0,52–0,6 μm (ETM2), 0,63–0,69 μm (ETM3), 0,76–0,9 μm (ETM4), 1,55–1,75 μm (ETM5), 2,08–2,35 μm (ETM7) i 10,4–12,5 μm (ETM6). Dwa obrazy z satelity TERRA ASTER: AST_L1B.003:2004370176 i AST_L1B.003:2004370177, zarejestrowane 28 września 2001 roku, zakupiono w Geological Survey US. Pierwsza scena została zarejestrowana o godzinie 06:09:06 GMT, przy wysokości Słońca 43,9°, kącie azymutalnym Słońca 164,5° i 15% pokryciu chmurami. Druga scena została zarejestrowana o 06:09:15 przy wysokości Słońca 44,1° i kącie azymutalnym Słońca 164,4° oraz 7% zachmurzeniu. Zachmurzony obszar znalazł się poza badanym terenem. Do badań gleb słonych spośród 14 kanałów radiometru ASTER wykorzystano 8: 0,52–0,6 μm (A1), 0,63–0,69 μm (A2), 0,78–0,86 μm (A3N), 1,6–1,7 μm (A4), 2,145–2,185 μm (A5), 2,185–2,225 μm (A6), 2,235–2,285 μm (A7) oraz 2,295–2,365 μm (A8) (Abrams i Hook, 2002).

4.3. Dane meteorologiczne

Do oceny wpływu uwilgotnienia powierzchniowej warstwy gleb w dolinie Czuj na jasność ich obrazu w czasie rejestracji z pułapu satelitarnego wykorzystano dane meteorologiczne ze stacji Biszkek (<http://www.wunderground.com>). Dane te obejmują średnie dobowe wartości temperatury powietrza, wilgotności względnej powietrza i wielkości opadów, jakie wystąpiły w ciągu miesiąca przed rejestracją wykorzystanych obrazów: Landsat TM od 14 czerwca do 14 lipca, Landsat ETM+ od 6 maja do 6 czerwca i TERRA ASTER od 28 sierpnia do 28 września.

5. Metody badań

5.1. Klasyfikacja nienadzorowana

Przed przystąpieniem do klasyfikacji nienadzorowanej zgromadzone dane satelitarne przetworzono w następującej kolejności: obrazy satelitarne przekształcono do formatu *.rvc oprogramowania TNTmips i nadano im współrzędne przetworzonych map topograficznych w skali 1:50 000. Po przeprowadzeniu procedur mających na celu usunięcie niekorzystnego wpływu aerozoli w atmosferze na obraz satelitarny przez operację *Scale/Offset* oprogramowania TNTmips, obrazy Landsat TM i Landsat ETM+ w kanale 6 oraz obrazy we wszystkich kanałach TERRA ASTER doprowadzono do jednolitej rozdzielczości naziemnej. Następnie z wymienionych obrazów wycięto fragment doliny Czuj leżący w granicach Kirgistanu.

Klasyfikację nienadzorowaną poprzedzono wyborem odpowiedniej do rozróżniania gleb słonych kombinacji kanałów, liczby klas i najskuteczniejszego algorytmu klasyfikacji nienadzorowanej. W wyborze odpowiednich kombinacji kanałów posłużono się najwyższymi wartościami *Optimal Index Factor* – *OIF*, uzyskanymi według następującego wzoru (Chavez i Bauer, 1982; Jensen i in., 1986; Jensen, 1996):

$$OIF = \frac{\sum_{k=1}^{3-7} S_k}{\sum_{j=1}^{3-7} Abs(r_j)} \quad (1)$$

gdzie, S_k – odchylenie standardowe wartości jaskrawości w poszczególnych kanałach oraz $Abs(r_j)$ – absolutna wartość współczynnika korelacji między dwoma kanałami, wyliczona podczas analizy głównych składowych. Do wybranych kombinacji kanałów o najwyższych wartościach *OIF* zastosowano następujące algorytmy klasyfikacji nienadzorowanej dostępne w oprogramowaniu TNTmips: k-średnia, ISODATA, średnia rozmyta i minimalny rozkład kątów. Na podstawie wielkości odchylenia standardowego rastra odległości, wyliczonego podczas klasyfikacji, wybrano jedną kombinację kanałów i jeden algorytm spośród omówionych. W klasyfikacji tej zbadano sześć różnych pod względem liczebności klas opcji, z których na podstawie wizualnej analizy wybrano jedną, najbardziej właściwą, o najmniejszym odchyleniu standardowym. Następnie wykorzystując narzędzia statystyczne, takie jak dendrogram i analizę współwystępowania wydzielonych klas, powierzchnie pokryte roślinnością oraz tereny rolnicze nieporośnięte roślinnością połączono w jedną wspólną klasę zakładając, że nie są to obszary zasolone.

5.2. Rekonesans terenowy

Rekonesans terenowy badanego obszaru doliny Czuj miał na celu zweryfikowanie wyników klasyfikacji nienadzorowanej oraz przygotowanie do następnego etapu pracy, tj. klasyfikacji nadzorowanej. Rekonesans, przeprowadzony od 5 do 15 lipca 2002 roku, poprzedzono

zgrupowaniem analogowych map glebowych fragmentów doliny Czuj w skali 1:10 000. W trakcie rekonesansu w obrębie wybranych konturów klas, uzyskanych w wyniku procedury nienadzorowanej, opisano profile glebowe. Uwzględniono w nich: głębokość zalegania poszczególnych poziomów genetycznych, charakter granicy między nimi, barwę, uziarnienie, strukturę i konsystencję oraz zawartość węglanów w wyniku reakcji z roztworem 10% HCl. Następnie pobrano próby glebowe do badań laboratoryjnych oraz określono ich współrzędne geograficzne odczytane z urządzenia GPS SP24 MLR, po czym sfotografowano powierzchnie glebowe wokół profili glebowych za pomocą cyfrowego aparatu cyfrowego Olympus Camedia C-3030 ZOOM.

5.3. Klasyfikacja nadzorowana

5.3.1. Eliminacja powierzchni niebędących glebami słonymi

W celu rozdzielenia obiektów niebędących glebami słonymi od słonych gleb posłużono się następującymi wskaźnikami roślinnymi *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)* i *Transformed Vegetation Index (TVI)*, wskaźnikiem słoności *Salinity Index (SI)* oraz wartościami w kanale „jaskrawość” wykonanymi w wyniku zastosowania transformacji *Tasseled Cap* i operacji *Gram-Schmidt*.

Znormalizowany indeks rośliny *NDVI* zastosowano do wydzielenia powierzchni całkowicie pokrytych roślinnością. Obliczono go na podstawie poniższych kanałów Landsat TM, Landsat ETM+ i TERRA ASTER według następujących wzorów (Jensen i in., 1986):

$$\begin{aligned} NDVI_{TM} &= (TM4 - TM3) / (TM4 + TM3), \\ NDVI_{ETM+} &= (ETM4 - ETM3) / (ETM4 + ETM3), \quad (2) \\ NDVI_{ASTER} &= (A3 - A2) / (A3 + A2), \end{aligned}$$

gdzie: $NDVI_{TM}$, $NDVI_{ETM+}$ i $NDVI_{ASTER}$ – wskaźnik *NDVI* dla danego zdjęcia satelitarnego, $TM3$, $TM4$, $ETM3$, $ETM4$, $A2$ i $A3$ – odbicie spektralne w danym kanale.

Przekształcony wskaźnik rośliny *TVI* obliczony z danych satelitarnych Landsat TM, Landsat ETM+ oraz TERRA ASTER posłużył do wyodrębnienia powierzchni częściowo pokrytych roślinnością. Wygenerowano go dla każdego zdjęcia satelitarnego według poniższych wzorów (Getting Started Geospatial Analysis, 2003):

$$\begin{aligned} TVI_{TM} &= 100 * (\sqrt{((TM4 - TM3) / (TM4 + TM3))} + 0,5, \\ TVI_{ETM+} &= 100 * (\sqrt{((ETM4 - ETM3) / (ETM4 + ETM3))} + 0,5, \quad (3) \\ TVI_{ASTER} &= 100 * (\sqrt{((A3 - A2) / (A3 + A2))} + 0,5, \end{aligned}$$

gdzie: TVI_{TM} , TVI_{ETM+} i TVI_{ASTER} – wskaźnik *TVI* dla danego zdjęcia satelitarnego, $TM3$, $TM4$, $ETM3$, $ETM4$, $A2$ i $A3$ – odbicie spektralne w danym kanale.

W celu wyodrębnienia powierzchni pokrytych kamieniami i piaskami, które charakteryzują się jasnością zbliżoną do jasności gleb słonych, posłużono się wskaźnikiem słoności *SI* zaproponowanym przez Al-Khaier'a (2003). Obliczono go dla każdego zdjęcia satelitarnego według następujących wzorów:

$$\begin{aligned} SI_{TM} &= (TM5 - TM7) / (TM5 + TM7), \\ SI_{ETM+} &= (ETM5 - ETM7) / (ETM5 + ETM7), \quad (4) \\ SI_{ASTER} &= (A4 - A5) / (A4 + A5), \end{aligned}$$

gdzie: SI_{TM} , SI_{ETM+} i SI_{ASTER} – wskaźnik *SI* dla danego zdjęcia satelitarnego, $TM5$, $TM7$, $ETM5$, $ETM7$, $A4$ i $A5$ – odbicie spektralne w danym kanale.

Wartości w kanale „jaskrawość” uzyskano w wyniku zastosowania transformacji *Tasseled Cap* (*Tasseled Cap Kauth'a*) wykorzystano do wyodrębnienia terenów rolniczych nieporośniętych roślinnością. Wyliczono go według poniższych formuł (Erdas Field Guide, 1998), wykorzystując sześć kanałów Landsat TM i Landsat ETM+:

$$Jaskrawość_{TM} = 0,33183 * TM1 + 0,33121 * TM2 + 0,40639 * TM3 + 0,85468 * TM4 + 0,05493 * TM5 - 0,11749 * TM7, \quad (5)$$

$$Jaskrawość_{ETM+} = 0,33183 * ETM1 + 0,33121 * ETM2 + 0,40639 * ETM3 + 0,85468 * ETM4 + 0,05493 * ETM5 - 0,11749 * ETM7,$$

gdzie: $Jaskrawość_{TM}$ i $Jaskrawość_{ETM+}$ – wartości w kanale „jaskrawość” z danych Landsat TM i Landsat ETM+, a $TM1$, $TM2$, $TM3$, $TM4$, $TM5$, $TM7$, $ETM1$, $ETM2$, $ETM3$, $ETM4$, $ETM5$ i $ETM7$ – odbicie spektralne w wymienionych kanałach.

Następnie określano przedziały wartości powyższych wskaźników w poszczególnych klasach gleb słonych, posługując się punktami kontrolnymi. Przedziały te pozwoliły na stworzenie masek binarnych, oddzielających powierzchnie gleb słonych od innych powierzchni. Tym pierwszym nadano wartość 1, a drugiem wartość 0, wyłączając je z dalszej analizy obrazu. Przed procesem klasyfikacji przygotowano również maskę binarną, pozwalającą na wyłączenie obszarów zabudowanych. W tym celu warstwę wektorową uzyskaną z mapy topograficznej, przedstawiającą obszary zabudowane, przekonwertowano na warstwę rastrową. Proces wyodrębnienia obszarów wód powierzchniowych polegał na wyznaczaniu próbek prototypowych obiektów wodnych, stosując dane z kanału bliskiej podczerwieni. Na podstawie wydzielonych próbek program automatycznie wyznaczył zakres jasności tych obiektów i wyodrębnił wszystkie piksele, których wartość znajdowała się w tym zakresie. Wszystkie wymienione maski binarne połączono następnie w jedną, którą wykorzystano w procesie klasyfikacji nadzorowanej.

5.3.2. Wyznaczenie pól wzorcowych i ocena dokładności algorytmów klasyfikacyjnych

Procedurę klasyfikacji nadzorowanej rozpoczęto od wyznaczania pól wzorcowych dla poszczególnych klas gleb słonych, złożonych z pikseli reprezentujących klasy gleb słonych w punktach kontrolnych uzyskanych z mapy zasolenia powierzchni testowych. Do klasyfikacji gleb słonych powierzchni testowej Panfilów, przeprowadzonej na zdjęciach Landsat TM z 1994 roku, wykorzystano punkty kontrolne wzięte z mapy zasolenia opracowanej w 1996 roku przez Instytut „Kyrgyzgiprozem”. Do klasyfikacji nadzorowanej gleb słonych powierzchni Moskiewski, przeprowadzonej na obrazach Landsat ETM+ i TERRA ASTER z 2001 roku, wykorzystano punkty kontrolne wzięte z map glebowych opracowanych w 2001 roku.

Do klasyfikacji gleb słonych zastosowano następujące algorytmy klasyfikacji nadzorowanej dostępne w oprogramowaniu TNTmips wersji 6.4: minimalnej odległości od średniej, największego prawdopodobieństwa i propagacji wstecznej. Poddając tym algorytmom wybrane kombinacje kanałów zastosowano również połączone maski binarne pozwalające wyłączyć obszary gleb niezasolonych podczas procedury klasyfikacyjnej. Wyniki przeprowadzonej klasyfikacji nadzorowanej korygowano filtrem przestrzennym *Kernel plot* o macierzy 3x3, osłabiającym zakłócające działanie pojedynczych pikseli należących do sąsiednich klas. Dla każdej rzeczywistej klasy zasolenia obliczano procentowy współczynnik dokładności klasyfikacji nadzorowanej jako stosunek poprawnie wydzielonych pikseli do całkowitej liczby pikseli pól wzorcowych. Na podstawie współczynników dokładności wszystkich klas zasolenia obliczano całkowitą dokładność algorytmu klasyfikacji jako ich średnią arytmetyczną. Spośród powyższych algorytmów klasyfikacji nadzorowanej wybrano ten, który wykazywał największy całkowity współczynnik dokładności. W macierzy błędu uwzględniono także współczynnik Kappa (K_{hat}) (Rosenfield i Fitzpatrick-Lins, 1986; Congalton, 1991; Jensen, 1996; Congalton i Green, 1999):

$$K_{hat} = \frac{N \sum_{j=1}^r x_{ii} - \sum_{j=1}^r (x_{i+} \times x_{+j})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+j})} \quad (6)$$

gdzie, N – suma wszystkich pikseli, r – numer linii w macierzy oraz x_{ii} – numer kolumny, wyrażający zgodność dokładności macierzy błędu z przypadkowym błędem powstającym przy jego obliczeniu.

Klasyfikacja nadzorowana gleb słonych doliny Czuj opierała się na procedurach przeprowadzonych wcześniej na powierzchniach testowych Moskiewski i Panfilów.

5.3.3. Badania terenowe

Dysponując wynikami klasyfikacji nadzorowanej, w centrach największych konturów wydzieleń gleb słonych

na różnym stopniu zasolenia przeprowadzono badania naziemne. Badania te, przeprowadzone na powierzchniach testowych Moskiewski i Panfilów od 25 sierpnia do 10 września 2004 roku, obejmowały:

- określenie współrzędnych punktów pomiarowych geograficznych za pomocą GPS SP24 MLR,
- sfotografowanie powierzchni gleby i otaczającego ją krajobrazu za pomocą aparatu fotograficznego Canon EOS 500/500QD,
- pobranie 3 prób glebowych, oddległych od siebie o 10–20 m, do uzupełniających pomiarów spektralnych i badań laboratoryjnych, a następnie wymieszanie ich zawartości i określenie barwy za pomocą tabel Munsella (Revised standard soil colour charts, 1995).

5.4. Pomiary odbicia spektralnego

Oprócz badań terenowych przeprowadzonych w dolinie Czuj w Kirgistanie wykonano w Polsce (52°27'49"N i 16°56'30"E) w warunkach polowych pomiary odbicia spektralnego od pobranych w terenie prób gleb słonych. Dokonano tego za pomocą luminancjometru CIMEL CE-313-21 (rys. 5).

Próby te umieszczono na kuwetach o wymiarze 23 cm x 35 cm i mierzono luminancję od ich powierzchni przy kątach zenitalnych Słońca (SZA) od 29,3° do 60,6°, w zakresach szerszych niż te, przy których były zarejestrowane obrazy satelitarne wykorzystane w pracy. Luminancjometr rejestrował odbicie w czterech kanałach o długościach fali: 450 nm, 550 nm, 650 nm i 850 nm. Każdej serii pomiarów luminancji materiału glebowego towarzyszył pomiar luminancji halonowego wzorca bieli. Wszystkie pomiary zostały wykonane przy bezchmurnym niebie z wysokości 100 cm.

5.5. Badania laboratoryjne materiału glebowego

Wszystkie pobrane próby glebowe poddano następującym analizom:

- uziarnienia dwoma metodami, sitową i areometryczną według Prószyńskiego. W analizie sitowej posłużono się 12 sitami o średnicy oczek: 1,4 mm; 1 mm; 0,8 mm, 0,63 mm, 0,5 mm, 0,4 mm, 0,315 mm, 0,25 mm, 0,25 mm, 0,16 mm, 0,125 mm i 0,1 mm. W metodzie areometrycznej posłużono się standardowymi czasami odczytów gęstości zawiesiny glebowej zawartych w tablicach Prószyńskiego przy temperaturze 21°C dla utworów ilowych oraz gliniastych (Racinowski i Szczypek, 1980);
- wilgotności gleby oznaczanej metodą suszarkowo-wagową (Mocek i in., 2000);
- odczynu gleby zmierzonego za pomocą pH-metru ze szklaną elektrodą w zawiesinie wodnej w stosunku 1:2,5 (Mocek i in., 2000; Instrukcja obsługi wodoszczelnego..., 2002);
- zawartości materii organicznej oznaczanej przez spalenie w piecu w temperaturze 1200°C (Dzięciołowski, 1980);
- zawartości węgla wapnia oznaczanej metodą Scheiblera (Drzymała i in., 1980);



Ryc. 5. Głowica luminancjometru CIMEL CE-313-21 (Cierniewski, 2001)

Fig. 5. Head of luminancemeter CIMEL CE-313-21

– stężenia soli określonej za pomocą przewodności elektrycznej zmierzonej konduktometrami CPC-401 i SP-64. Pomiar wykonano w zawieszynie wodnej o stosunku 1:2,5 (Mocek i in., 2000),

– zawartości kationów wymiennych (K, Ca, Na, Mg) w materiale glebowym metodą fotometrii płomieniowej i absorpcji atomowej (Mocek i in., 2000), następnie wyliczono procentowy udział sodu wymiennego ESP (*Exchangeable Sodium Percentage*) (Rowell, 1997):

$$ESP(\%) = (\text{wymienny } Na^+ / T), \quad (7)$$

gdzie, T – całkowita kationowa pojemność sorpcyjna (*CEC – Cation Exchangeable Capacity*).

6. Wyniki badań

6.1. Warunki meteorologiczne w trakcie rejestracji obrazów satelitarnych

W celu określenia stanu wilgotności gleb badanego obszaru w chwili rejestrowania obrazów Landsat TM, Landsat ETM+ oraz TERRA ASTER przeanalizowano przebieg średnich, maksymalnych i minimalnych wartości dobowych temperatury i średnich dobowych wartości wilgotności względnej powietrza i opadów, jakie

wystąpiły w ciągu miesiąca poprzedzającego rejestrację obrazów satelitarnych.

Okres od 14 czerwca do 14 lipca 1994 roku, związany z obrazem Landsat TM, był ciepły. Średnia dobową temperaturą w tym okresie wyniosła 24,6°C, a maksymalna i minimalna dobową temperaturą wyniosła średnio odpowiednio 38,5°C i 12,0°C (rys. 6). Średnia wilgotność względna w omawianym okresie wyniosła 54%. Suma opadów w tym czasie wyniosła około 30 mm. 7 dni przed rejestracją zdarzył się dwudniowy 5 mm opad, który nie mógł w sposób istotny zmniejszyć zasolenie gleb w ich poziomie powierzchniowym.

Średnia dobową wartość temperatury powietrza w okresie między 6 maja a 6 czerwca 2001 roku, poprzedzającą rejestrację zdjęcia Landsat ETM+, wyniosła 24,6°C, maksymalna i minimalna dobową temperaturą wyniosła średnio odpowiednio 31,4°C i 10,0°C (rys. 7). Średnia wilgotność powietrza w tym okresie osiągnęła wartość 61,5%. Brak opadów i wysokie temperatury powietrza, jakie panowały w tym okresie nie mogły przemieścić soli z powierzchni gleby do ich głębszych poziomów.

Średnia dobową temperaturą powietrza w okresie od 28 sierpnia do 28 września 2001 roku, poprzedzającą rejestrację obrazów TERRA ASTER, wyniosła 18°C, a maksymalna i minimalna odpowiednio 35°C i 4°C (rys. 8).

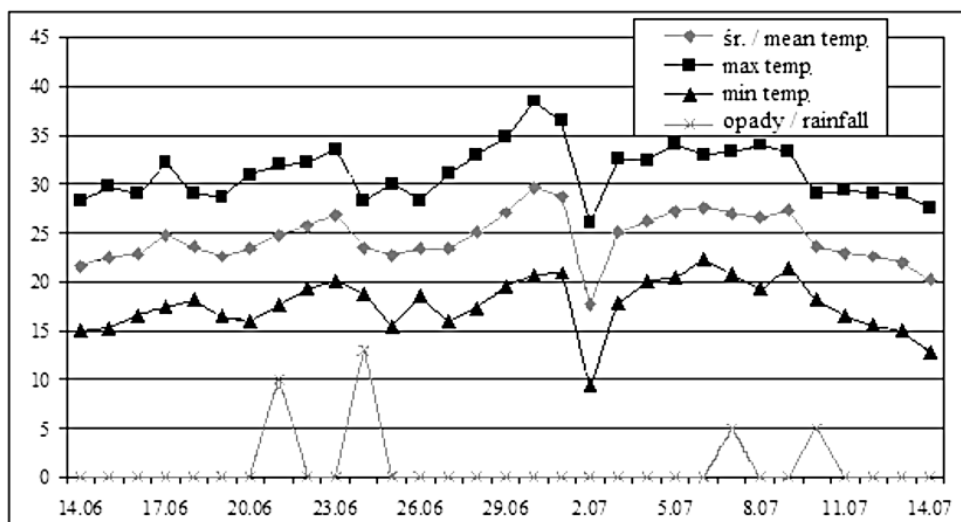
Średnia wilgotność względna wyniosła 46,1%. Ten okres również charakteryzował się brakiem opadów, a więc sole łatwo rozpuszczalne znajdujące się na powierzchni gleb, nie mogły przemieścić się do głębszych poziomów.

6.2. Klasyfikacja nienadzorowana

Przed przystąpieniem do interpretacji gleb słonych za pośrednictwem obrazów satelitarnych nadano im współrzędne w odwzorowaniu UTM poprzez związanie obiektów punktowych, takich jak: skrzyżowania dróg, koleje, cieki wodne oraz kanały irygacyjne, z ich odpowiednikami na mapie topograficznej w skali 1: 50 000. Po przeprowadzeniu procedur mających na celu usunięcie niekorzystnego wpływu aerozoli w atmosferze na obraz satelitarny, obrazy Landsat TM i Landsat ETM+ w kanale 6 oraz obrazy we wszystkich kanałach TERRA ASTER doprowadzono do jednolitej rozdzielczości naziemnej, wynoszącej 28,5 m x 28,5 m. Posługując się wcześniej przygotowanym wektorem, opisującym kształt doliny Czuj, wycięto jej fragment leżący w granicach Kirgistanu. Po tej czynności obraz badanego obszaru składał się z 5231 kolumn i 2411 linii, przedstawiając łącznie 615 tys. ha powierzchni.

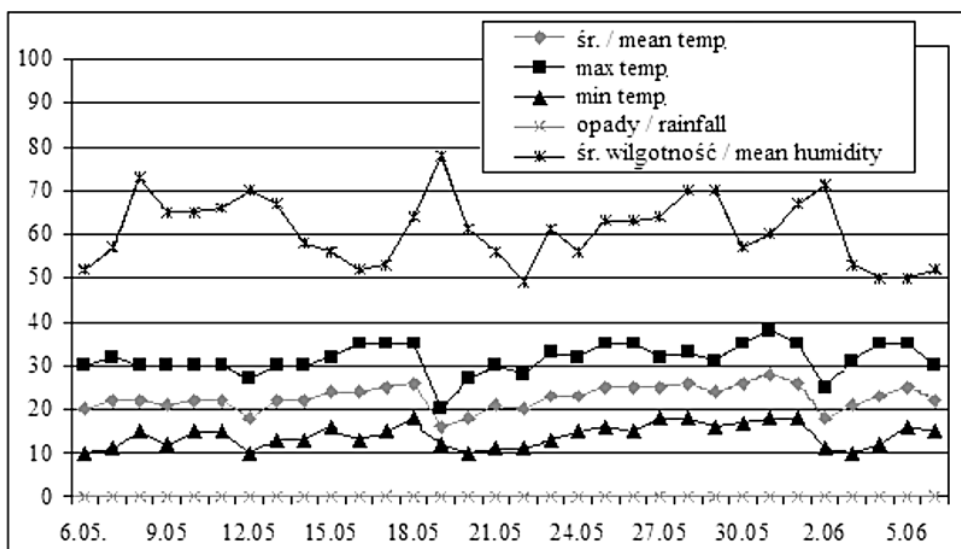
6.2.1. Wybór kombinacji kanałów i algorytmu klasyfikacyjnego

W celu znalezienia odpowiedniej kombinacji kanałów i najskuteczniejszego algorytmu do klasyfikacji nienadzorowanej badanego terenu na obrazach Landsat TM, Landsat ETM+ oraz ASTER wykorzystano analizę



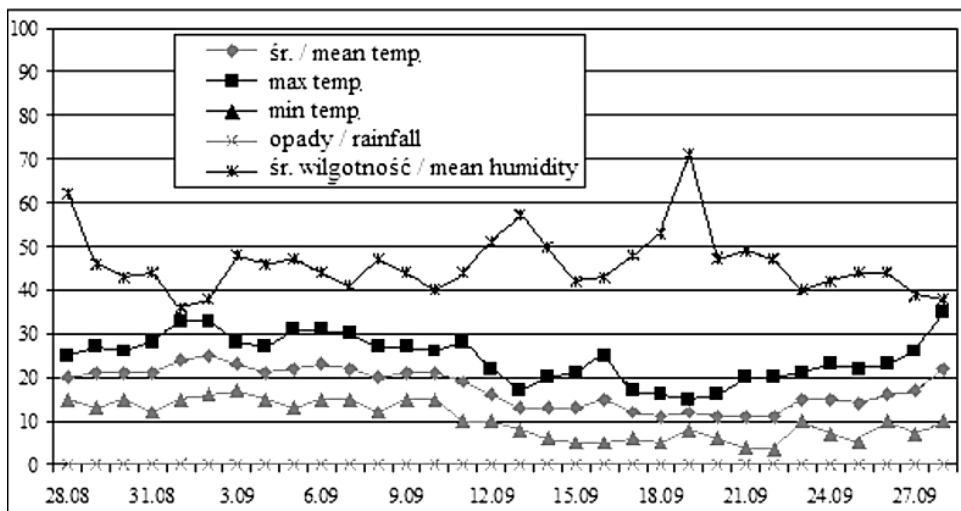
Ryc. 6. Przebieg dobowej temperatury powietrza oraz ilości opadów w okresie od 14 czerwca do 14 lipca 1994 roku na stacji Biszkek

Fig. 6. Daily temperature of air and distribution of rainfall from 14th of June to 14th of July in 1994 at the Bishkek station



Ryc. 7. Przebieg dobowej temperatury i wilgotności względnej powietrza oraz ilości opadów w okresie od 6 maja do 6 czerwca 2001 na stacji Biszkek

Fig. 7. Daily temperature of air, relative humidity and distribution of rainfall from 6th of May to 6th of June in 1994 at the Bishkek station



Ryc. 8. Przebieg dobowej temperatury i wilgotności względnej powietrza oraz ilości opadów w okresie od 28 sierpnia do 28 września 2001 roku na stacji Biszkek

Fig. 8. Daily temperature of air, relative humidity and distribution of rainfall from 28th of August to 6th of September in 1994 at the Bishkek station

głównych składowych dostępnych w oprogramowaniu TNTmips wersji 6.4. Podczas tej analizy wyliczono odchylenie standardowe jaskrawości obrazów w poszczególnych kanałach oraz wszystkie możliwe współczynniki korelacji między jaskrawością obrazów w wykorzystanych kanałach. Wymienione wartości odchylenia standardowego i współczynnika korelacji pozwoliły na wyliczenie *OIF* w przypadku 20 kombinacji kanałów Landsat TM, Landsat ETM+ oraz 41 kombinacji kanałów TERRA ASTER (tab. 6).

Spośród nich wybrano do klasyfikacji nienadzorowanej badanego terenu sześć kombinacji kanałów, o najwyższych wartościach *OIF*, stosując poniższe algorytmy o następujących parametrach:

- ISODATA z liczbą iteracji 10, maksymalnym odchyleniem standardowym 4,5, minimalną odległością kombinacji klas 3,2 i minimalną odległością łączenia 3,2;
- k-średnią z liczbą iteracji 10, początkową minimalną odległością klastra 10, maksymalnym przesunięciem dla stabilizacji 5 oraz minimalnym procentem niezmienności klastra 2;
- minimalny rozkład kątów z liczbą iteracji 10, minimalnym przesunięciem dla stabilizacji 5 oraz minimalnym procentem niezmienności klastra 80;
- średnią rozmytą z liczbą iteracji 10.

Powyższe algorytmy testowano zakładając docelowe wydzielenie następującej liczby klas: 15, 20, 25, 30, 35 i 40. Raster odległości wyliczony w wyniku procedury klasyfikacyjnej posłużył do określenia odchylenia standardowego jaskrawości analizowanych rastrów Landsat TM, Landsat ETM+ i TERRA ASTER. Spośród wartości odchylenia standardowego, zamieszczonych w tab. 7, 8 i 9, do dalszej analizy wybrano te o najniższej wartości.

Najniższą wartość odchylenia standardowego zapewnił wynik algorytmu ISODATA dokonanego przy użyciu kombinacji kanałów 2, 3, 4 zdjęć Landsat TM i Landsat ETM+ oraz 1, 2, 3 zdjęć TERRA ASTER. Odchylenie standardowe nie było przydatne do wyboru odpowiedniej liczby klas, gdyż wartość tego parametru zmniejszała się wraz ze wzrostem liczby klas.

Odchylenie standardowe rastra odległości Landsat TM przy następującej liczbie wydzielonych klas 15 i 40 wyniosło odpowiednio 4,5659 i 3,0462. Odchylenie standardowe rastra odległości Landsat ETM+ oraz TERRA ASTER, przy liczbie wydzielonych klas 15 i 40, wyniosło odpowiednio 6,6820 i 3,8236 oraz 8,3093 i 5,4965. Zatem spośród analizowanych liczb klas jako najwłaściwszą, opartą na wizualnej ocenie konturów wydzieleni klasyfikacji nienadzorowanej, uznano liczbę 35. Łatwo rozpoznawalne na obrazach satelitarnych powierzchnie, takie jak porośnięte roślinnością oraz tereny rolnicze nieporośnięte roślinnością, połączono w jedną klasę gleb niezasolonych.

6.2.2. Wyniki rekonesansu terenowego

Przed rekonesansem terenowym pozyskano analogowe mapy glebowe i mapy zasolenia gleb gospodarstw rolnych znajdujących się w obrębie rejonów administra-

cyjnych Panfilow i Moskiewski opracowane w skali 1:10 000 przez Instytut Rolny „Kirgizgiprozem” w latach 1996 i 2001. Czas opracowania map analogowych był zbliżony do terminów rejestracji obrazów satelitarnych, co pozwoliło na przeprowadzenie klasyfikacji nadzorowanej. W związku z tym obszar rejonów administracyjnych Panfilow i Moskiewski wybrano jako powierzchnie testowe o tej samej nazwie (rys. 9). Dla powierzchni Panfilow ten odstęp wynosił dwa lata, a dla powierzchni Moskiewski niecały rok. Ich łączna powierzchnia wynosi 135,5 tys. ha, w tym areal powierzchni Panfilow – 47,9 tys. ha i powierzchni Moskiewski – 87,6 tys. ha. Wyniki klasyfikacji nienadzorowanej poddano weryfikacji w terenie w zachodniej i środkowej części doliny Czuj. Polegało ono na sprawdzeniu konturów wydzielonych klas (rys. 10).

Łącznie opisano 8 profili glebowych reprezentujących następujące gleby (w nawiasie nazwa gospodarstwa): łąkową jasną słabo solonczakową (Ulan), szaroziem północny słabo solonczakowo-solonczakowy (Besz-Terek), szaroziem łąkowy słabo solonczakowy (Besz-Terek), szaroziem łąkowy średnio solonczakowy (Keleczek), szaroziem północny zwykły słabo solonczakowy (Czapajewo), łąkowo-szaroziemną średnio solonczakową (Predtecenko), łąkową jasną średnio solonczakową (Ulan) i łąkową jasną średnio solonczakowo-solonczakową (Czapajewo).

6.3. Klasyfikacja nadzorowana powierzchni testowych

6.3.1. Punkty kontrolne wydzielonych klas gleb słonych

Warstwy wektorowe przedstawiające w postaci punktów położenie odkrywek profili glebowych o różnym stopniu zasolenia uzyskano z map zasolenia poszczególnych gospodarstw rolnych znajdujących się w obrębie rejonów administracyjnych Panfilow i Moskiewski. Punkty te dotyczą tych profili, w których zasolenie wystąpiło tylko w ich warstwie powierzchniowej, tj. do głębokości 25 cm (tab. 10).

Punkty kontrolne, które odzwierciedlają stan zasolenia w 1996 roku, wykorzystano do interpretacji zasolenia gleb za pośrednictwem obrazów Landsat TM pochodzących z 1994 roku. Przyjęto, że różnica dwóch lat nie wpłynęła w sposób istotny na stan zasolenia gleb. Punkty przedstawiające stan zasolenia z 2001 roku wykorzystano do klasyfikacji gleb słonych za pomocą obrazów Landsat ETM+ i TERRA ASTER pochodzących również z 2001 roku. Łącznie przygotowano 300 punktów kontrolnych, wśród których 216 reprezentuje gleby słone oraz 84 gleby niezasolone.

6.3.2. Eliminacja powierzchni niebędących glebami słonymi

Aby możliwie dokładnie rozdzielić gleby słone od niezasolonych, posłużono się dodatkowo wskaźnikiem słoności *SI* oraz dwoma wskaźnikami roślinnymi *NDVI* i *TVI*. Wskaźnikami tymi określono jaskrawości 300 pikseli, reprezentujących poszczególne klasy gleb słonych w punktach kontrolnych. W analizowanych kla-

Tabela 6. Optimal Index Factor *OIF* 20 kombinacji kanałów zdjęć Landsat TM i Landsat ETM+ oraz 41 kombinacji kanałów zdjęć TERRA ASTER. Tłustą czcionką zaznaczono wysokie wartości

Table 6. *OIF* Optimal Index Factor *OIF* values for 20 three-band combinations of Landsat TM and Landsat ETM+ and 41 bands combinations of TERRA ASTER. The highest values of *OIF* marked in bold

Nr kombinacji <i>N_o of combinations</i>	Kombinacja <i>Combination</i>	Wartości <i>OIF</i> dla / <i>Values of OIF for</i>		
		Landsat TM	Landsat ETM+	ASTER
1	1, 2, 3	12,99	19,39	27,21
2	3, 4, 5	72,07	76,49	11,19
3	1, 4, 5	77,66	92,17	13,36
4	2, 4, 5	63,03	61,27	13,81
5	1, 4, 7	20,72	26,84	13,46
6	1, 5, 7	77,97	85,13	13,88
7	4, 5, 7	62,07	75,70	11,71
8	1, 3, 4	21,09	26,86	26,74
9	1, 2, 5	18,10	22,23	14,71
10	1, 3, 5	68,48	78,38	23,14
11	2, 5, 7	18,91	26,78	13,89
12	2, 3, 5	18,99	26,63	28,88
13	3, 5, 7	21,33	30,31	25,52
14	1, 2, 4	49,71	52,37	15,20
15	2, 4, 7	62,22	69,99	14,34
16	3, 4, 7	78,16	95,31	22,06
17	2, 3, 4	63,19	83,41	24,99
18	1, 3, 7	16,52	24,95	27,58
19	1, 2, 7	13,61	20,55	15,12
20	2, 3, 7	14,89	25,17	29,77
21	1, 2, 8	-	-	15,59
22	1, 3, 8	-	-	29,23
23	1, 4, 8	-	-	14,53
24	1, 5, 8	-	-	13,96
25	1, 6, 8	-	-	14,69
26	1, 7, 8	-	-	14,36
27	2, 3, 8	-	-	31,51
28	2, 4, 8	-	-	14,98
29	2, 5, 8	-	-	14,38
30	2, 6, 8	-	-	15,08
31	2, 7, 8	-	-	14,78
32	3, 4, 8	-	-	23,85
33	3, 5, 8	-	-	27,04
34	3, 6, 7	-	-	27,15
35	3, 7, 8	-	-	26,08
36	4, 5, 8	-	-	12,31
37	4, 6, 8	-	-	12,92
38	4, 7, 8	-	-	12,79
39	5, 6, 8	-	-	12,59
40	5, 7, 8	-	-	12,37
41	6, 7, 8	-	-	13,01

sach gleb słonych określono przedziały jaskrawości pikseli wskaźników *SI*, *NDVI* i *TVI* na obrazach Landsat TM, Landsat ETM+ oraz ASTER. Spośród 300 punktów kontrolnych wybrano do dalszej analizy 108, reprezentujących trzy kategorie gleb sołnczakowe, sołnczakowo-sołncowate oraz sołncowate, każda w trzech stopniach zasolenia (tab. 11, 12 i 13).

Na obrazach Landsat TM największe przedziały jaskrawości pikseli wskaźnika słoności *SI* i najmniejsze

wartości *NDVI* i *TVI* odnosiły się do gleb silnie sołnczakowo-sołncowatych oraz do gleb silnie sołnczakowych. W przypadku gleb słabo sołnczakowych, słabo sołnczakowo-sołncowatych oraz słabo sołncowatych wartości *SI* malały, a wartości wskaźników roślinnych *NDVI* i *TVI* rosły. Na obrazach Landsat ETM+ oraz TERRA ASTER wskaźniki te zachowywały się podobnie jak dla obrazów Landsat TM. Najwyższe przedziały jaskrawości pikseli współczynnika *SI* miały gleby silnie zasolone, a wśród

Tabela 7. Odchylenie standardowe sklasyfikowanych rastrów zdjęcia Landsat TM. Tłustą czcionką zaznaczono ich najniższe wartości

Table 7. Standard deviation of classified Landsat TM raster. The lowest values are marked in bold

Kombinacje kanałów <i>Band combination</i>	Algorytmy klasyfikacji nienadzorowanej <i>Algorithms of unsupervised classifications</i>			
	ISODATA <i>ISODATA</i>	K-średnia <i>K-means</i>	Średnia rozmyta <i>Fuzzy C means</i>	Minimalny rozkład kątów <i>Minimum distribution angle</i>
15 klas				
3, 4, 7	5,4889	9,7447	7,0305	17,0561
2, 3, 4	4,5659	7,1928	7,0259	15,2035
1, 3, 5	6,1498	8,7008	6,9549	29,4168
1, 5, 7	5,8193	9,8670	7,0736	29,3956
1, 4, 5	7,2366	7,9055	9,4506	22,3346
3, 4, 5	6,2057	7,2891	9,1937	24,4448
20 klas				
3, 4, 7	5,2302	8,3509	7,1369	17,0447
2, 3, 4	3,8501	6,1385	5,6488	15,2631
1, 3, 5	4,7927	7,8908	6,7755	29,4024
1, 5, 7	8,3324	9,0373	6,7709	29,3978
1, 4, 5	6,5755	7,7319	9,3251	22,3387
3, 4, 5	5,5143	9,0243	9,1619	24,5258
25 klas				
3, 4, 7	4,8487	9,1718	7,0439	17,0268
2, 3, 4	3,9992	6,1238	5,5078	15,2533
1, 3, 5	4,4720	7,6367	6,6873	29,4217
1, 5, 7	4,0277	8,5215	6,6137	29,4008
1, 4, 5	6,1689	7,0073	9,0353	22,3694
3, 4, 5	6,0905	7,4217	9,2209	24,5297
30 klas				
3, 4, 7	4,5219	7,1626	6,7589	17,0151
2, 3, 4	3,8474	5,3287	5,4778	15,2574
1, 3, 5	4,5577	7,6518	6,6836	29,4024
1, 5, 7	3,9782	6,2142	6,6528	29,5234
1, 4, 5	5,8417	6,9436	8,9927	22,3475
3, 4, 5	5,7412	7,3337	9,3450	24,5390
35 klas				
3, 4, 7	4,1803	6,4473	6,4470	17,0393
2, 3, 4	3, 2471	4,9890	4,9892	15,2567
1, 3, 5	4,3219	6,9962	6,9962	29,4191
1, 5, 7	3,6807	6,4054	6,4298	29,4113
1, 4, 5	5,1099	6,5893	6,5893	22,3660
3, 4, 5	4,8296	7,2677	7,2671	24,5402
40 klas				
3, 4, 7	3,8846	5,0190	6,3110	17,0508
2, 3, 4	3,0462	4,7182	4,8781	15,2513
1, 3, 5	3,8091	4,3621	5,8572	29,4172
1, 5, 7	3,4309	4,3424	5,4771	29,4120
1, 4, 5	4,7966	6,1621	8,2590	22,3386
3, 4, 5	4,5726	5,5971	8,3512	24,4884

nich maksymalne wartości osiągnęły gleby solonczakowo-soloncowate. Wraz ze zmniejszaniem się stopnia zasolenia w glebach słabo zasolonych zmniejszały się również wartości współczynnika *SI* i rosły wartości współczynników roślinnych *NDVI* i *TVI*. Tendencja wzrostu wartości *SI* w przypadku wszystkich gleb słonych wraz z malejącymi wartościami *NDVI* i *TVI* świadczy o tym, że wraz z narastającym zasoleniem coraz mniej roślinności pokrywa jej powierzchnię. Wartości wskaźników *NDVI*

i *TVI* są wyższe ze zdjęcia Landsat TM niż ze zdjęć Landsat ETM+ i TERRA ASTER, gdyż zdjęcia Landsat TM zarejestrowano w tym czasie okresu wegetacyjnego, kiedy masa roślinna była największa. Piksele obiektów, których jasność była większa od maksymalnej wartości wskaźnika *SI* gleb silnie solonczakowo-soloncowatych oraz maksymalnej wartości wskaźnika *NDVI* i *TVI* gleb słabo soloncowatych, uznano jako gleby niezasolone i odrzucono z dalszej klasyfikacji przez maskowanie.

Tabela 8. Odchylenie standardowe sklasyfikowanych rastrów zdjęcia Landsat ETM+. Thustą czcionką zaznaczono ich najniższe wartości

Table 8. Standard deviation of classified raster of Landsat ETM+. The lowest values are marked in bold

Kombinacje kanałów <i>Bands combination</i>	Algorytmy klasyfikacji nienadzorowanej <i>Algorithms of unsupervised classifications</i>			
	ISODATA <i>ISODATA</i>	K-średnia <i>K-means</i>	Średnia rozmyta <i>Fuzzy C means</i>	Minimalny rozkład kątów <i>Minimum distribution angle</i>
15 klas				
3, 4, 7	8,8141	11,8399	9,4825	26,1060
2, 3, 4	6,6820	8,0127	7,5680	20,9307
1, 3, 5	7,3500	10,0290	7,6856	33,8863
1, 5, 7	6,9314	11,9898	7,8921	34,8909
1, 4, 5	8,0033	8,4697	8,1208	22,5596
3, 4, 5	8,9076	11,6587	9,4322	27,7308
20 klas				
3, 4, 7	6,0542	8,5269	7,6975	22,0964
2, 3, 4	5,9507	6,5935	6,2253	20,9250
1, 3, 5	7,4141	8,8224	8,9932	34,0146
1, 5, 7	6,5436	8,2727	7,3423	34,8880
1, 4, 5	7,5499	7,3197	7,2651	22,5568
3, 4, 5	7,8893	8,6543	7,9896	27,7276
25 klas				
3, 4, 7	5,5214	7,3484	7,4440	26,0980
2, 3, 4	4,3323	6,1594	5,6948	20,8438
1, 3, 5	5,4103	6,1349	6,6896	33,8910
1, 5, 7	6,6752	5,8201	7,2413	34,8484
1, 4, 5	7,0351	6,5788	7,1242	22,2128
3, 4, 5	7,4748	7,9456	7,3422	27,7547
30 klas				
3, 4, 7	5,2321	6,8079	6,8591	26,0964
2, 3, 4	3,9888	5,6358	9,8992	20,8635
1, 3, 5	5,5148	5,5483	6,0059	33,8590
1, 5, 7	5,7858	5,3333	6,4563	34,8229
1, 4, 5	6,0432	6,2008	6,5952	22,0872
3, 4, 5	7,0275	7,2049	7,0543	27,5941
35 klas				
3, 4, 7	5,0605	6,6181	6,6374	25,9976
2, 3, 4	3,8516	5,5728	9,6789	20,8498
1, 3, 5	4,9661	5,3677	5,4975	33,8571
1, 5, 7	5,6429	5,2426	6,1292	34,8121
1, 4, 5	6,1962	5,9180	6,4322	21,9980
3, 4, 5	6,9604	6,7313	6,9720	27,5742
40 klas				
3, 4, 7	5,0059	6,3798	6,4217	26,0142
2, 3, 4	3,8236	5,3793	9,9913	20,8413
1, 3, 5	5,6816	5,1585	4,9281	33,8518
1, 5, 7	5,3843	5,1574	5,9975	34,8115
1, 4, 5	6,1140	5,7535	6,2341	21,9932
3, 4, 5	6,6614	6,3154	6,8732	27,5317

Tereny zabudowane, a w szczególności ich fragmenty pokryte betonem, spektralnie przypominają gleby słone. W celu wyeliminowania terenów zabudowanych z dalszej klasyfikacji przygotowano maski binarne. Maski te odpowiadały kształtom terenów zabudowanych przedstawionych na mapach topograficznych. Obszary wód powierzchniowych, z łatwością wyodrębnione od pozostałych obiektów przez ich odmienną charakterystykę spektralną, również objęto maską.

Wszystkie wcześniej przygotowane maski binarne dla analizowanych danych satelitarnych połączono w jedną łączną maskę i w takiej postaci użyto jej w dalszych etapach klasyfikacji nadzorowanej.

Według wskaźnika *NDVI* i *TVI* (Landsat TM) areal terenów całkowicie i częściowo porośniętych roślinnością powierzchni testowej Panfilów w roku 1994 obejmował odpowiednio 9,0 tys. ha i 5,3 tys. ha. Areal powierzchni rolniczych nieporośniętych roślin-

Tabela 9. Odchylenie standardowe sklasyfikowanych rastrów zdjęcia ASTER. Tłustą czcionką zaznaczono ich najniższe wartości

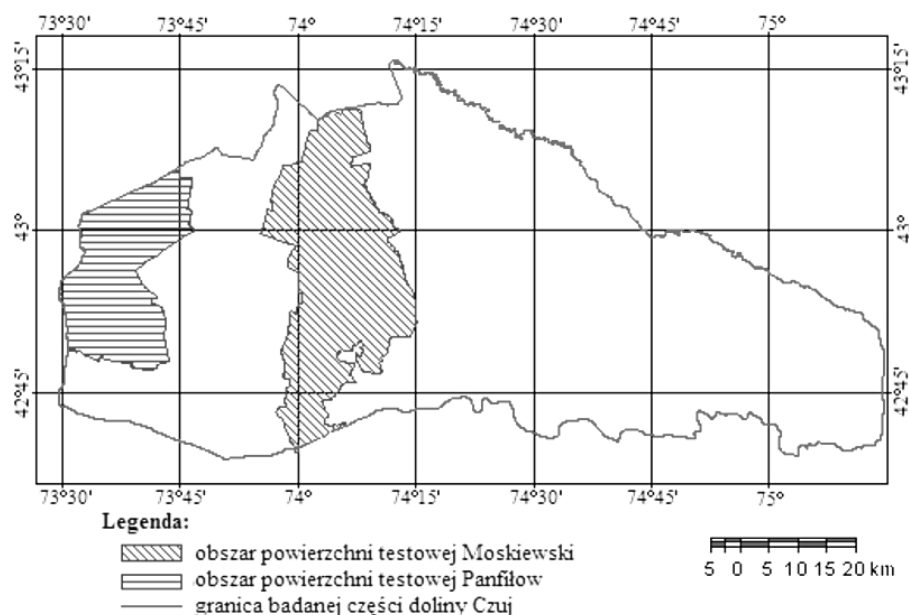
Table 9. Standard deviation of classified raster of TERRA ASTER. The lowest values are marked in bold

Kombinacje kanałów <i>Bands combination</i>	Algorytmy klasyfikacji nienadzorowanej <i>Algorithms of unsupervised classifications</i>			
	ISODATA <i>ISODATA</i>	K-średnia <i>K-means</i>	Średnia rozmyta <i>Fuzzy C means</i>	Minimalny rozkład kątów <i>Minimum distribution angle</i>
15 klas				
1, 2, 3	8,3093	10,6269	9,4446	37,9619
2, 3, 5	11,2604	14,0497	12,8147	38,3422
1, 3, 7	11,1022	13,6498	12,5751	37,8256
2, 3, 7	11,2901	13,8021	12,7178	38,3034
1, 3, 8	10,9861	13,2389	12,5598	37,3161
2, 3, 8	12,6520	14,1912	12,7742	37,7392
20 klas				
1, 2, 3	6,5284	10,0031	8,2172	37,9459
2, 3, 5	10,8726	12,8024	11,8631	38,3242
1, 3, 7	10,4793	12,1108	11,5110	37,7764
2, 3, 7	10,6741	12,2343	11,6803	37,9666
1, 3, 8	10,1209	12,1250	11,5753	37,5952
2, 3, 8	12,3890	12,2620	11,7986	37,7361
25 klas				
1, 2, 3	5,9756	8,6946	8,3476	37,9371
2, 3, 5	10,4041	11,9708	11,0016	38,3324
1, 3, 7	10,2681	11,3315	10,6418	37,8151
2, 3, 7	10,3920	11,4148	10,6562	37,9658
1, 3, 8	9,9621	11,5941	10,7265	37,5721
2, 3, 8	11,5621	11,4162	10,8594	37,7751
30 klas				
1, 2, 3	5,9666	8,3347	6,0280	37,9407
2, 3, 5	10,2584	10,9759	10,3116	38,3071
1, 3, 7	9,8967	10,6960	10,2809	37,7782
2, 3, 7	10,0127	10,3924	10,0083	37,9626
1, 3, 8	8,7843	10,7708	10,3912	37,5682
2, 3, 8	10,4512	10,5695	10,2105	37,7262
35 klas				
1, 2, 3	5,6699	8,3081	5,7915	37,9394
2, 3, 5	9,6918	10,2219	10,5315	38,3238
1, 3, 7	9,5961	10,5463	9,8921	37,7695
2, 3, 7	9,3543	10,0276	9,2019	37,9417
1, 3, 8	8,5621	10,7193	9,9266	37,5564
2, 3, 8	9,6282	10,0956	10,0021	37,7143
40 klas				
1, 2, 3	5,4965	8,21518	5,7198	37,9388
2, 3, 5	9,0904	9,8575	10,8314	37,9295
1, 3, 7	9,0716	10,0088	9,3467	37,7941
2, 3, 7	9,0275	9,8902	9,1230	38,0150
1, 3, 8	8,0451	10,2697	9,4569	37,5376
2, 3, 8	9,1207	9,7852	9,8961	37,7027

nością i powierzchni pokrytych kamieniami i piaskami wyodrębniono za pomocą wartości w kanale „jaskrawość”, uzyskanych w wyniku zastosowania transformacji *Tasseled Cap* oraz wskaźnika słoności *SI*. Ich areal wyniósł odpowiednio 6,6 tys. ha i 1,3 tys. ha. Tereny zabudowane i obszary wód powierzchniowych obejmowały 3,8 tys. ha i 731,9 ha powierzchni. Wszystkie wymienione powierzchnie niebędące glebami słonymi objęto łączną maską binarną odpowiadającą

26,4 tys. ha, tj. 55,2% arealu powierzchni testowej Panfilów.

Według wskaźnika *NDVI* i *TVI* (Landsat ETM+) areal terenów całkowicie i częściowo porośniętych roślinnością na powierzchni testowej Moskiewski w czerwcu 2001 roku wynosił odpowiednio 20,3 tys. ha i 10,1 tys. ha. Areal powierzchni rolniczych nieporośniętych roślinnością i powierzchni pokrytych kamieniami i piaskami, wyodrębnionych odpowiednio za



Ryc. 9. Położenie powierzchni testowych Panfilow i Moskiewski w obrębie doliny Czuj

Fig. 9. The location of the tested areas of Panfilov and Moskovsky in the Chuy Valley

pomocą wartości w kanale „jaskrawość”, uzyskanych w wyniku zastosowania transformacji *Tasseled Cap* oraz wskaźnika słoności *SI*, wyniósł odpowiednio 20,9 tys. ha i 5,3 tys. ha. Tereny zabudowane i obszary wód powierzchniowych obejmowały odpowiednio 7,4 tys. ha i 423,8 ha. Wszystkie wymienione powierzchnie niebędące glebami słonymi objęto łączną maską binarną odpowiadającą 64,7 tys. ha, tj. 65% areалу powierzchni testowej Moskiewski.

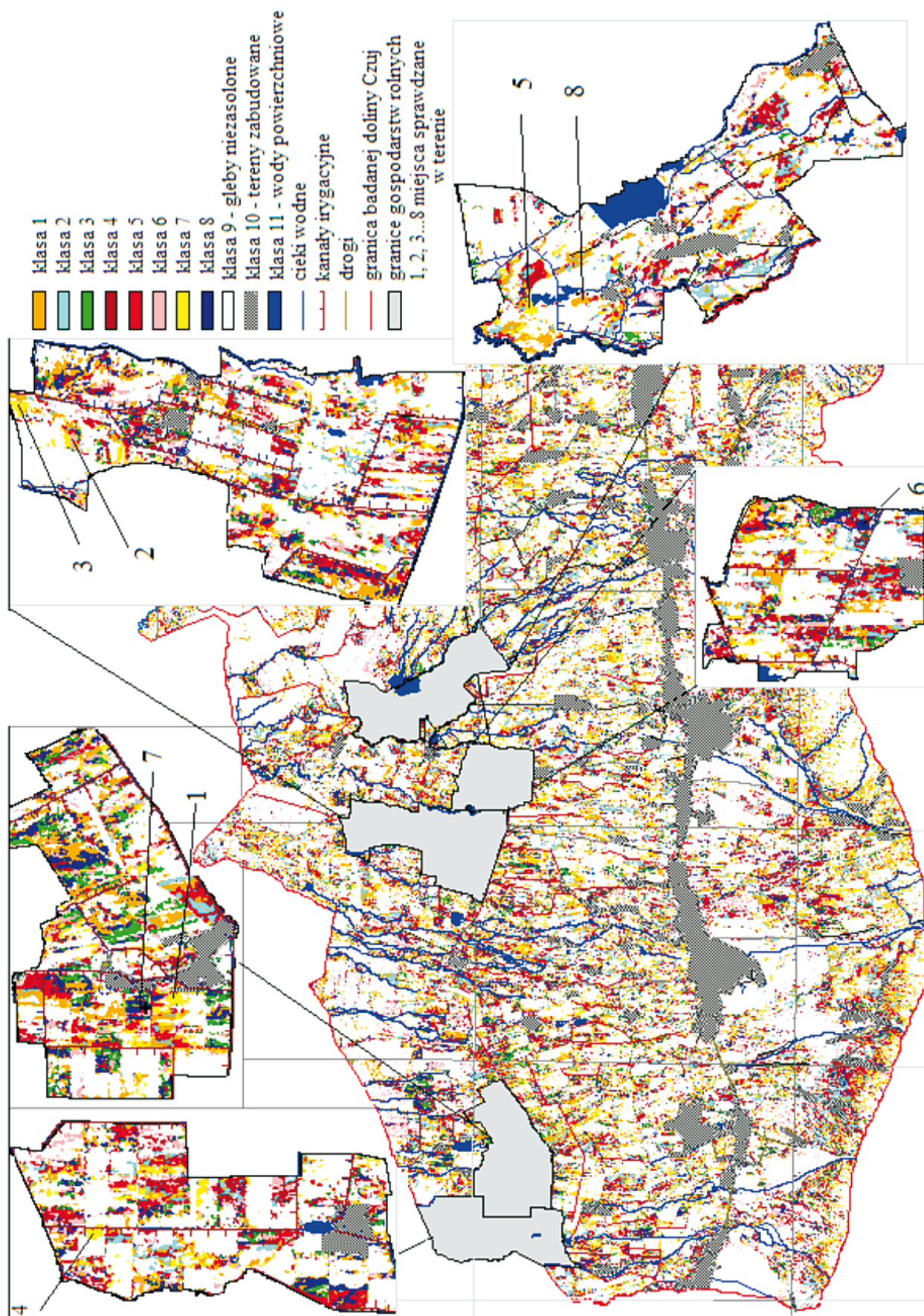
Według wskaźnika *NDVI* i *TVI* (TERRA ASTER) areal terenów całkowicie i częściowo porośniętych roślinnością na powierzchni testowej Moskiewski we wrześniu 2001 roku obejmował odpowiednio 20,1 tys. ha i 10,2 tys. ha. Areal powierzchni rolniczych nieporośniętych roślinnością i powierzchni pokrytych kamieniami i piaskami, wyodrębnionych odpowiednio za pomocą operacji *Gram-Schmidt* oraz wskaźnika słoności *SI*, wyniósł odpowiednio 21,5 tys. ha i 5,6 tys. ha. Tereny zabudowane i obszary wód powierzchniowych obejmowały 7,4 tys. ha i 423,8 ha. Wszystkie wymienione powierzchnie niebędące glebami słonymi objęto łączną maską binarną odpowiadającą 65,5 tys. ha, tj. 61,7% areálu powierzchni testowej Moskiewski.

Areal terenów porośniętych roślinnością w roku 1994 był większy areal niż w roku 2001. Wynikało to z daty rejestracji analizowanych obrazów satelitarnych. Gleby na obrazie Landsat TM, pochodzącym z 14 lipca, były bardziej przykryte roślinnością niż gleby na obrazie Landsat ETM+ z 6 czerwca. Całkowity obszar terenów nieprzykrytych maską binarną na obrazach Landsat TM w roku 1994 wynosił 212,4 tys. ha, co odpowiada 34,5% powierzchni badanej części doliny Czuj. W roku 2001 natomiast na obrazach Landsat ETM+ ten obszar wyniósł 235,4 tys. ha, co odpowiada 38,9% tego obszaru doliny. Po objęciu łączną maską binarną terenów niebędących glebami słonymi poddano je dalszej klasyfikacji nadzorowanej.

6.3.3. Pola wzorcowe i ocena algorytmów klasyfikacji nadzorowanej

Klasyfikacja nadzorowana była poprzedzona przygotowaniem 240 pól wzorcowych. Z tej liczby do klasyfikacji obrazów Landsat TM i Landsat ETM+ wykorzystano po 120 pól, w tym po 12 pól z każdej klasy gleb słonych. Korzystając z przygotowanych pól wzorcowych, posługując się maską binarną oraz stosując wybrane kombinacje kanałów 2, 3, 4 do zdjęć Landsat TM i Landsat ETM+, zastosowano następujące algorytmy klasyfikacji nadzorowanej: minimalnej odległości od średniej, największego prawdopodobieństwa i wstecznej propagacji. W celu dokonania wyboru najlepszego algorytmu spośród wymienionych wyniki klasyfikacji oceniono na podstawie macierzy błędów. Macierz ta powstaje na podstawie analizy dwóch rastrów: wynikowego rastra klasyfikacji i rastra zawierającego rzeczywiste rozmieszczenie 240 pól wzorcowych. Dodatkowo w każdej rzeczywistej klasie zasolenia obliczono procentowy współczynnik dokładności klasyfikacji nadzorowanej jako stosunek poprawnie wydzielonych pikseli do całkowitej liczby pikseli pól wzorcowych. Na podstawie współczynników dokładności wszystkich klas zasolenia obliczono całkowitą dokładność algorytmu klasyfikacji jako ich średnią arytmetyczną. Spośród podanych algorytmów klasyfikacji nadzorowanej wybrano ten, który wykazywał największy całkowity współczynnik dokładności (tab. 14). Był to algorytm największego prawdopodobieństwa.

W tabeli 15 przedstawiono dokładność wydzielenia poszczególnych klas gleb słonych doliny Czuj na obrazach Landsat TM, Landsat ETM+ oraz TERRA ASTER. Uwzględniono także współczynnik Kappa (K_{hat}) wyrażający zgodność dokładności macierzy błędów z przypadkowym błędem powstającym przy jego obliczeniu. Wartość tego współczynnika w przypadku sklasyfikowanego rastra Landsat TM wyniósł 69,9%, a Landsat



Ryc. 10. Położenie profili glebowych na tle wyników klasyfikacji nienadzorowanej obrazu Landsat ETM+
 Fig. 10. The location of soil profiles against a background of unsupervised classification results of Landsat ETM+ images

Tabela 10. Liczba punktów kontrolnych wydzielonych kategorii glebowych
 Table 10. Number of training points for selected categories of salt-affected soils

Gleby słone <i>Salt-affected soils</i>	dla obrazów Landsat TM (1994) <i>for images of</i>	dla obrazów Landsat ETM + i TERRA ASTER (2001) <i>for images of</i>	Razem <i>Total</i>
silnie solonczakowe / <i>strongly saline</i>	12	12	24
średnio solonczakowe / <i>moderately saline</i>	12	12	24
słabo solonczakowe / <i>slightly saline</i>	12	12	24
silnie solonczakowo-słońcowate <i>strongly saline-sodic</i>	12	12	24
średnio solonczakowo-słońcowate <i>moderately saline-sodic</i>	12	12	24
słabe solonczakowo-słońcowate <i>slightly saline-sodic</i>	12	12	24
silnie słońcowate / <i>strongly sodic</i>	12	12	24
średnio słońcowate / <i>moderately sodic</i>	12	12	24
słabe słońcowate / <i>slightly sodic</i>	12	12	24
niezasolone / <i>non-affected</i>	42	42	120
Razem / <i>Total</i>	150	150	300

Tabela 11. Przedziały jaskrawości pikseli obliczone wg wskaźnika słoności *SI* w punktach kontrolnych reprezentujących 9 klas gleb słonych na obrazach Landsat TM, Landsat ETM+ oraz TERRA ASTER
 Table 11. Range of brightness values of pixels calculated according to the salinity index for 9 representative classes of salt-affected soils in Landsat TM, Landsat ETM+ and TERRA ASTER images

Gleby słone <i>Salt-affected soils</i>	Przedziały jaskrawości gleb słonych w punktach kontrolnych <i>Brightness values range of control points</i>		
	Landsat TM _{SI}	Landsat ETM _{SI}	TERRA ASTER _{SI}
silnie solonczakowe / <i>strongly saline</i>	21-26	21-28	19-22
średnio solonczakowe / <i>moderately saline</i>	16-18	16-18	15-17
słabo solonczakowe / <i>slightly saline</i>	8-13	10-14	7-16
silnie solonczakowo-słońcowate <i>strongly saline-sodic</i>	24-29	27-32	29-31
średnio solonczakowo-słońcowate <i>moderately saline-sodic</i>	16-20	21-25	20-24
słabo solonczakowo-słońcowate <i>slightly saline-sodic</i>	12-18	16-19	14-19
silnie słońcowate / <i>strongly sodic</i>	18-23	20-25	19-23
średnio słońcowate / <i>moderately sodic</i>	14-16	18-20	12-18
słabo słońcowate / <i>slightly sodic</i>	8-13	9-12	7-11

ETM+ 72,8%. Analizując powyższe wyniki stwierdzono, że gleby silnie solonczakowo-słońcowate i silnie solonczakowe są glebami najdokładniej identyfikowanymi na wszystkich obrazach satelitarnych. Najgorzej identyfikowane, z dokładnością 62%, były gleby słabo słońcowate. Dokładność poprawnej interpretacji gleb słabo solonczakowo-słońcowatych i gleb słabo solonczakowych wyniosła odpowiednio 70 i 67%. Wynikało to z faktu, że gleby te trudno było oddzielić od gleb niezasolonych pokrytych roślinnością uprawną odporną na sól, taką jak jęczmień, buraki cukrowe i pszenica. Wyniki klasyfikacji nadzorowanej dokonanej algorytmem największego prawdopodobieństwa na obrazach Landsat

TM, Landsat ETM+ oraz TERRA ASTER przedstawiono w tabeli 16, gdzie pokazano areale wydzielonych w ten sposób klas gleb słonych.

6.3.4. Naziemna weryfikacja wyników klasyfikacji nadzorowanej

Wyniki klasyfikacji nadzorowanej sprawdzano bezpośrednio w terenie w sierpniu i wrześniu 2004 roku na 40 polach wzorcowych, znajdujących się w centrach największych wydziałów gleb słonych o różnym stopniu zasolenia w zachodniej i środkowej części doliny Czuj. Na rysunku 11 przedstawiono uziarnienie wierzchniej

Tabela 12. Przedziały jaskrawości pikseli obliczone wg wskaźnika *NDVI* w punktach kontrolnych reprezentujących 9 klas gleb słonych na obrazach Landsat TM, Landsat ETM+ oraz TERRA ASTER

Table 12. Range of brightness values of pixels calculated according to the *NDVI* for 9 representative classes of salt-affected soils in Landsat TM Landsat ETM+ and TERRA ASTER images

Gleby słone <i>Salt-affected soils</i>	Przedziały jaskrawości gleb słonych w punktach kontrolnych <i>Brightness values range of control points</i>		
	Landsat TM _{NDVI}	Landsat ETM _{NDVI}	TERRA ASTER _{NDVI}
silnie solonczakowe / <i>strongly saline</i>	6-10	0-11	0-6
średnio solonczakowe <i>moderately saline</i>	12-19	10-15	6-14
słabo solonczakowe / <i>slightly saline</i>	16-37	16-38	13-30
silnie solonczakowo-solonoćcowate	5-14	0-8	0-3
średnio solonczakowo-solonoćcowate <i>moderately saline-sodic</i>	16-19	13-25	3-13
słabo solonczakowo-solonoćcowate <i>slightly saline-sodic</i>	26-38	30-40	15-28
silnie solonoćcowate / <i>strongly sodic</i>	12-19	4-14	0-12
średnio solonoćcowate / <i>moderately sodic</i>	18-27	15-28	14-19
słabo solonoćcowate / <i>slightly sodic</i>	22-35	28-43	19-36

Tab. 13. Przedziały jaskrawości pikseli obliczone wg wskaźnika *TVI* w punktach kontrolnych reprezentujących 9 klas gleb słonych na obrazach Landsat TM, Landsat ETM+ oraz TERRA ASTER

Table 13. Range of brightness values of pixels calculated according to the *TVI* for 9 representative classes of salt-affected soils in Landsat TM, Landsat ETM+ and TERRA ASTER images

Gleby słone <i>Salt-affected soils</i>	Przedziały jaskrawości gleb słonych w punktach kontrolnych <i>Brightness values range of control points</i>		
	Landsat TM _{TVI}	Landsat ETM _{TVI}	TERRA ASTER _{TVI}
silnie solonczakowe / <i>strongly saline</i>	25-39	0-12	7-16
średnio solonczakowe / <i>moderately saline</i>	35-46	20-29	26-34
słabo solonczakowe / <i>slightly saline</i>	47-57	35-51	37-41
silnie solonczakowo-solonoćcowate <i>strongly saline-sodic</i>	24-36	0-10	0-14
średnio solonczakowo-solonoćcowate <i>moderately saline-sodic</i>	41-46	12-31	16-33
słabo solonczakowo-solonoćcowate <i>slightly saline-sodic</i>	48-53	34-49	28-38
silnie solonoćcowate / <i>strongly sodic</i>	29-49	8-17	15-22
średnio solonoćcowate / <i>moderately sodic</i>	42-52	15-28	29-39
słabo solonoćcowate / <i>slightly sodic</i>	50-62	38-53	34-49

warstwy pól wzorcowych na tle trójkąta Ferreta przedstawiającego grupy granulometryczne według polskiej normy PN-R-04033.

W tabeli 17 zestawiono barwę, uziarnienie i zawartość próchnicy 40 prób glebowych pobranych podczas prac terenowych. Większość badanych gleb jest wytworzona z materiału gliniastego, w tym z: gliny (nr 4, 14 i 22), gliny pylastej (nr 2, 3, 8, 10, 20, 26, 27, 31, 37, 38 i 40) oraz gliny ciężkiej (nr 1, 5, 11 i 23).

Wśród badanych gleb były także wytworzone z materiału pylastego, w tym z pyłu piaszczystego (nr 6, 16, 18 i 34) i pyłu ilastego (nr 9, 12, 13, 17, 28 i 33) oraz z materiału ilastego, w tym z iłu (nr 21, 24, 25 i 39) i iłu pylastego (nr 7, 19, 29, 30, 32, 35 i 36). Zawartość ma-

terii organicznej w glebach gliniastych mieści się między 3,7% a 13,1%, w glebach pylastych między 2,8% i 9,9%, a w glebach ilastych od 3,4% do 8,9%. Odczyn badanych gleb wahał się od 7,7 do 9,2 pH, a ich przewodnictwo elektryczne oscylowało od 0,4 do 65,7 dS/m (tab. 18). Większość tych gleb charakteryzowała się także dużą zawartością węglanów, dochodzącą do 29,8%. Zdjęcia powierzchni tych pól przedstawiono na rysunku 12. Na podstawie wartości odczynu, przewodności elektrycznej (EC) oraz udziału sodu wymiennego w kompleksie sorpcyjnym (ESP) ustalono przynależność 40 pól wzorcowych do następujących klas gleb słonych:

– solonczakowych, w tym: silnie – pola o numerach 7, 10, 21, 27, 29, 32 i 36; średnio – pola o numerach 22,

Tab. 14. Całkowity współczynnik dokładności (%) wybranych algorytmów klasyfikacji nadzorowanej
 Table 14. Overall accuracy (%) of selected algorithms of supervised classification

Algorytmy klasyfikacji nadzorowanej <i>Algorithms of supervised classification</i>	Landsat TM	Landsat ETM+	TERRA ASTER
Minimalna odległość od średniej / <i>Minimum Distance to Mean</i>	71,2	76,7	75,1
Największe prawdopodobieństwo / <i>Maximum Likelihood</i>	80,0	81,1	80,3
Wsteczna propagacja / <i>Back Propagation</i>	62,7	65,5	64,9

Tab. 15. Dokładność wydzielonych klas gleb (%) doliny Czuj na analizowanych obrazach w wyniku zastosowania algorytm największego prawdopodobieństwa klasyfikacji nadzorowanej
 Table 15. The accuracy of selected salt-affected soils classes (%) of the Chuy Valley using The Maximum Likelihood algorithm of supervised classification

Gleby / <i>Soils</i>	Kombinacja kanałów 2, 3, 4 dla <i>Bands combination 2, 3, 4 for</i>		
	Landsat TM	Landsat ETM +	TERRA ASTER
silnie solonczakowe / <i>strongly saline</i>	87	89	88
średnio solonczakowe / <i>moderately saline</i>	80	78	77
słabo solonczakowe / <i>slightly saline</i>	71	67	65
silnie solonczakowo-solońcowate <i>strongly saline-sodic</i>	89	92	91
średnio solonczakowo-solońcowate <i>moderately saline-sodic</i>	83	87	86
słabo solonczakowo-solońcowate <i>slightly saline-sodic</i>	67	69	69
silnie solońcowate / <i>strongly sodic</i>	85	88	87
średnio solońcowate / <i>moderately sodic</i>	78	79	79
słabo solońcowate / <i>slightly sodic</i>	62	65	64
niezasolone / <i>non-affected</i>	95	98	97

Tabela 16. Areał gleb słonych powierzchni testowej Moskiewski ustalony w wyniku klasyfikacji nadzorowanej obrazów Landsat ETM+ i TERRA ASTER
 Table 16. Area of salt-affected soils of the tested surface of Moskovsky, established by using supervised classification of Landsat ETM+ and TERRA ASTER images

Gleby słone <i>Salt-affected soils</i>	Poprzez klasyfikację obrazów Landsat TM z 1994 roku [tys. ha] <i>According to the classification of Landsat TM images from 1994</i>	Poprzez klasyfikację obrazów z 2001 roku [tys. ha] <i>According to the classification of images from 2001</i>	
		Landsat ETM+	TERRA ASTER
silnie solonczakowe / <i>strongly saline</i>	0,6	2,2	2,21
średnio solonczakowe <i>moderately saline</i>	3,2	5,7	5,6
słabo solonczakowe / <i>slightly saline</i>	4,2	6,6	6,67
silnie solonczakowo-solońcowate <i>strongly saline-sodic</i>	2,8	0,53	0,52
średnio solonczakowo-solońcowate <i>moderately saline-sodic</i>	2	2,7	2,8
słabo solonczakowo-solońcowate <i>slightly saline-sodic</i>	2,7	2,6	2,69
silnie solońcowate / <i>strongly sodic</i>	0,8	0,49	0,51
średnio solońcowate <i>moderately sodic</i>	1,3	3,2	3,3
słabo solońcowate / <i>slightly sodic</i>	3,3	5,4	5,51
razem / <i>total</i>	20,9	29,4	29,8

24, 26, 28 i 39; słabe – pola o numerach 4, 8, 14, 17, 18, 34, 35 i 37;

– solonczakowo-soloncowatych, w tym: silnie – pola o numerach 1, 2, 9, 11, 12, 19, 23, 30, średnio – pola o numerach 3, 5, 15, 20, 31, 33 i 38 oraz słabe – pola o numerach – 16, 25 i 40;

– soloncowatych, w tym: silnie – pole o numerze 6, średnio – pole o numerze 13 oraz słabe – pole o numerze 34.

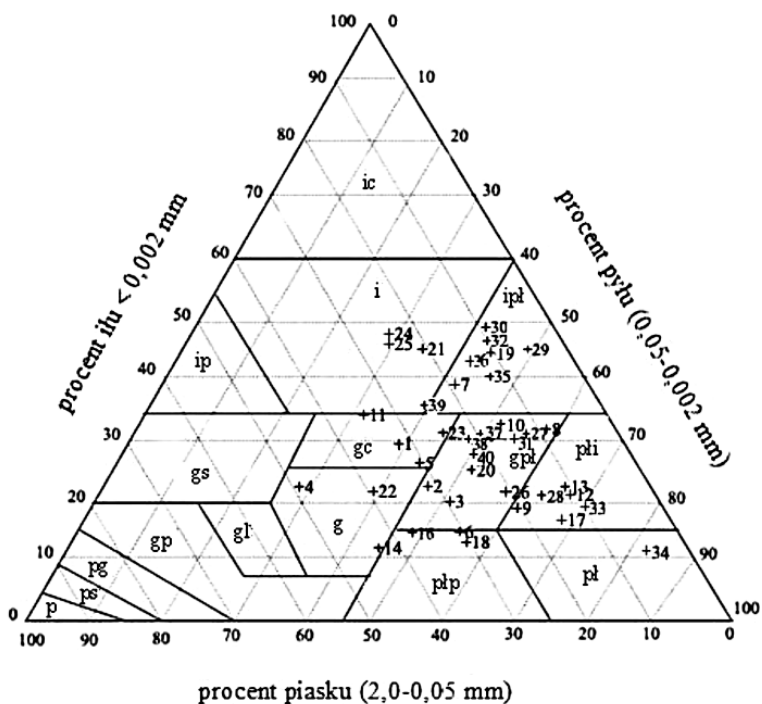
Wszystkie wydzielenia reprezentujące gleby silnie zasolone znalazły bezbłędne potwierdzenie na 7 polach gleb solonczakowych, 8 polach gleb solonczakowo-soloncowatych oraz na 1 polu gleb soloncowatych. Gleby te, stanowiące nieużytki, charakteryzują się dużym udziałem białych wykwitów soli na ich powierzchni i niewielką przykrywą roślinną (rys. 12, nr 1, 2, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 19, 21, 23, 27, 29, 30, 32 i 36). Wśród 13 wydzieleni gleb średnio zasolonych, błędnie sklasyfikowano za pomocą obrazów Landsat TM oraz Landsat ETM+ i TERRA ASTER wydzielenia sprawdzane w terenie polami próbnymi nr 24 i 31 oraz polami nr 13 i 22 (rys. 12, nr 3, 5, 13, 15, 20, 22, 24, 26, 28, 31, 33, 38, i 39). Dwa pierwsze wydzielenia sklasyfikowano jako gleby silnie i słabo solonczakowate, a dwa ostatnie jako gleby słabo soloncowate. Większość średnio zasolonych gleb nie była użytkowana rolniczo. Były one częściowo przykryte takimi gatunkami roślin jak trzcina pospolita (*Phragmites communis* L.) i piołun (*Seriphidium Artemisia viridis* L.). Duże błędy w toku klasyfikacji nadzorowanej stwierdzono w odniesieniu do wydzieleni gleb słabo zasolonych (rys. 12, nr 4, 8, 14, 16, 17, 18, 25, 34, 35, 37 i 40).

Na 10 tych wydzieleni uzyskanych przez interpretację obrazów Landsat TM, Landsat ETM+ i TERRA ASTER błędnie sklasyfikowano 4 wydzielenia zweryfikowane za pomocą pól wzorcowych. Gleby w tych wydzieleniach w większości były użytkami rolnymi, a mniejsza ich część była porośnięta trzcina pospolita (*Phragmites communis* L.) i piołunem (*Seriphidium Artemisia viridis* L.).

6.4. Klasyfikacja nadzorowana gleb słonych doliny Czuj

6.4.1. Eliminacja obiektów niebędących glebami słonymi

Wszystkie czynności poprzedzające klasyfikację gleb doliny Czuj w obrębie Kirgistanu przy użyciu obrazów Landsat TM i Landsat ETM+ wykonano w taki sam spo-



Legenda:

- | | |
|---------------------------------------|--|
| p - piasek / sand | i - il / clay |
| ps - piasek słabogliniasty / sand | ic - il ciężki / clay |
| pg - piasek gliniasty / loamy sand | ipl - il pylasty / silty clay |
| gp - glina piaszczysta / sandy loam | pl - pył / silt |
| gl - glina lekka / sandy loam | ppl - pył piaszczysty / silty loam |
| gs - glina średnia / sandy clay loam | pli - silty clay loam |
| g - glina / loam | |
| gc - glina ciężka / clay loam | od +0 dp +40 - numer materiału glebowego |
| gpl - glina pylasta / silty clay loam | |
| ip - il piaszczysty / sandy clay | |

Ryc. 11. Trójkąt Ferreta przedstawiający uziarnienie materiału glebowego warstwy powierzchniowej 40 pól wzorcowych (Soil Survey Staff, 1975)

Fig 11. Ferret's triangle describing the texture of soil materials from surfaces of 40 test fields

sób jak na powierzchniach testowych Panfilów i Moskiewski. Obrazy TERRA ASTER nie pokrywały w pełni doliny Czuj, dlatego nie zostały wykorzystane.

Areal terenów całkowicie i częściowo porośniętych roślinnością w roku 1994 według wskaźników *NDVI* i *TVI* obliczonych ze zdjęcia Landsat TM wynosił odpowiednio 151,4 tys. ha i 59,5 tys. ha, co stanowi odpowiednio 24,6% i 9,7% obszaru doliny Czuj (rys. 13). Areal powierzchni rolniczych nieporośniętych roślinnością i powierzchni pokrytych kamieniami i piaskami wyniósł odpowiednio 91,6 tys. ha i 38,1 tys. ha, co wynosi odpowiednio 14,9% i 6,2% powierzchni doliny. Tereny zabudowane i obszary wód powierzchniowych obejmowały 57,5 tys. ha i 4,9 tys. ha, co stanowi 9,3% i 0,8% powierzchni. Wszystkie te powierzchnie niebędące glebami słonymi objęto łączną maską binarną odpowiadającą 403 tys. ha, tj. 65,5% arealu badanej części doliny Czuj. Areal terenów całkowicie i częściowo porośniętych roślinnością na obrazie Landsat ETM+ wyniósł w 2001 roku odpowiednio 108,2 tys. ha i 37,2 tys. ha, co stano-

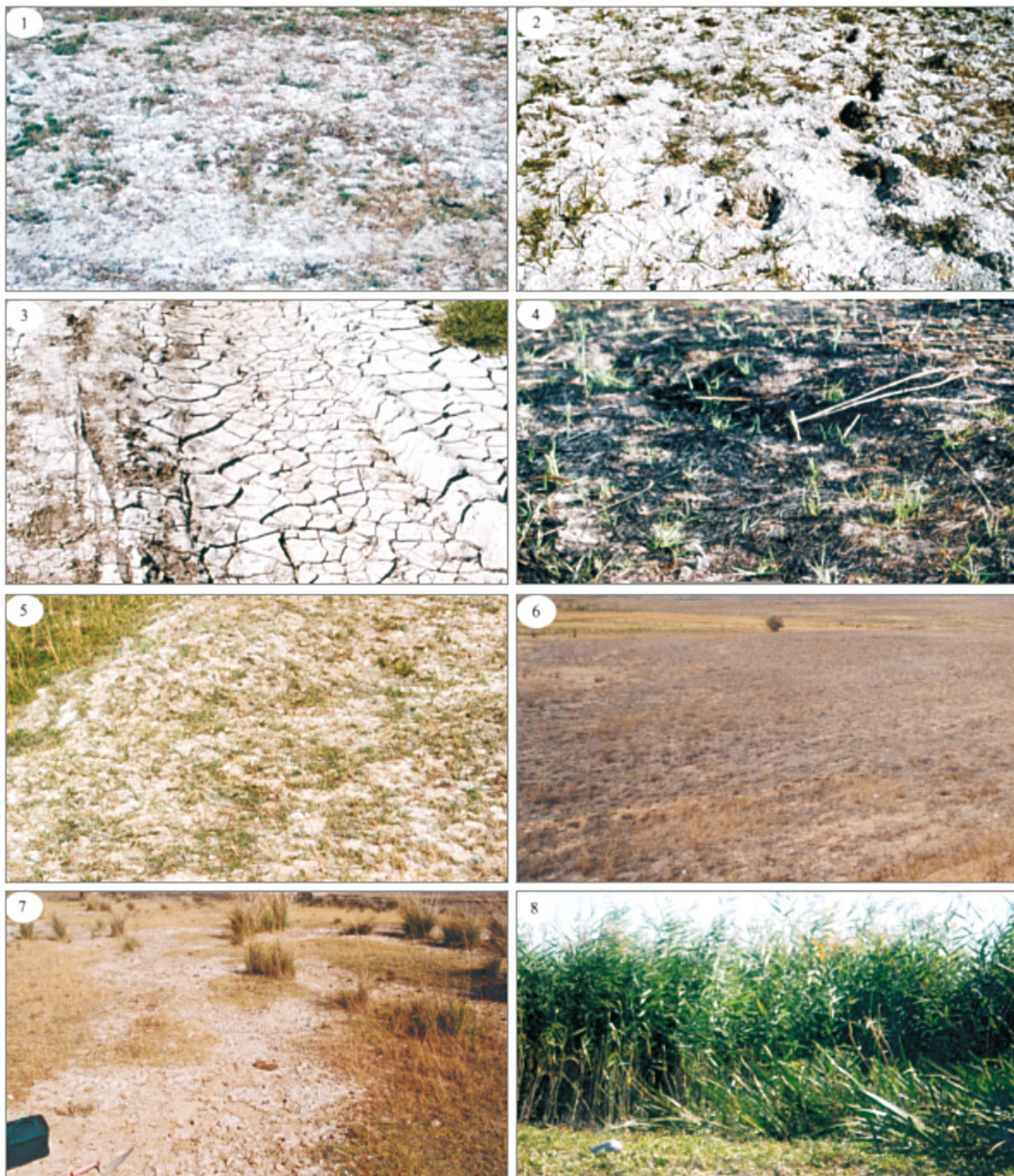
Tabela 17. Niektóre właściwości materiału glebowego pobranego z 40 pól wzorcowych
 Table 17. Certain properties of soil materials collected from 40 test fields

Nr pola <i>No of fields</i>	Barwa wg Munsella <i>Colour according to Munsell</i>	Zawartość frakcji mechanicznych <i>Mechanical fraction content [%]</i>			Klasa uziarnienia* <i>Texture content**</i>	Zawartość próchnicy <i>Organic matter content [%]</i>
		2-0,05 mm	0,05-0,002 mm	<0,002 mm		
1	10YR 7/3	32,2	38,4	29,4	gc	3,3
2	10YR 7/2	32,2	44,7	23,1	gpł	3,9
3	10YR 6/4	29,3	50,7	20,0	gpł	6,6
4	10YR 5/3	49,2	28,8	22,0	g	7,7
5	10YR 7/4	30,6	44,0	25,4	gc	8,9
6	10YR 6/4	30,4	54,8	14,8	plp	5,8
7	10YR 7/2	18,3	42,8	38,9	ipl	7,4
8	10YR 6/4	9,4	58,3	32,3	gpł	8,5
9	10YR 7/3	21,0	60,6	18,4	pli	5,8
10	10YR 6/3	16,2	52,8	31,0	gpł	2,1
11	10YR 7/2	34,5	31,0	34,5	gc	9,7
12	10YR 6/1	10,7	68,0	21,3	pli	2,8
13	10YR 6/2	11,1	67,5	21,4	pli	6,2
14	10YR 6/2	43,8	45,0	11,2	g	3,7
15	10YR 6/4	32,3	54,4	11,8	plp	8,7
16	10YR 7/2	37,4	47,8	14,8	plp	9,5
17	10YR 5/3	14,7	68,6	16,7	pli	7,3
18	10YR 5/2	30,1	56,6	13,3	plp	6,2
19	10YR 7/2	10,6	44,5	44,9	ipl	4,2
20	10YR 7/3	23,9	51,3	24,8	gpł	2,6
21	10YR 7/4	20,2	35,2	44,6	i	4,2
22	10YR 6/4	39,6	38,5	21,9	g	3,1
23	10YR 7/2	25,7	43,6	30,7	gc	9,9
24	10YR 5/3	24,3	29,0	46,7	i	8,1
25	10YR 5/2	18,3	64,1	17,6	i	6,5
26	10YR 6/4	20,7	58,6	20,5	gpł	4,8
27	10YR 7/3	12,2	55,5	32,3	gpł	7,8
28	10YR 7/3	17,1	62,4	20,5	pli	6,7
29	10YR 5/1	5,7	49,0	45,3	ipl	8,9
30	10YR 7/3	9,1	41,2	49,7	ipl	3,4
31	10YR 6/3	15,2	54,8	30,0	gpł	2,1
32	10YR 7/3	10,1	42,6	47,1	ipl	14,1
33	10YR 7/2	9,9	71,0	19,1	pli	3,1
34	10YR 6/1	6,4	83,0	12,6	pl	4,9
35	10YR 6/2	13,8	46,0	40,1	ipl	3,5
36	10YR 6/2	14,5	42,3	43,2	ipl	1,2
37	10YR 6/4	19,6	49,4	31,0	gpł	4,1
38	10YR 7/2	22,1	47,4	30,5	gpł	2,5
39	10YR 5/3	25,0	38,9	36,1	i	4,2
40	10 YR 7/2	22,8	50,6	27,6	gpł	5,5

*Uziarnienie wg normy PN04033, **Texture content according to the USDA (Soil Survey Staff, 1975)

Tabela. 18. Właściwości chemiczne materiału glebowego 40 pól wzorcowych
 Table 18. Chemical properties of soil materials from 40 test fields

Nr pola wzorcowego <i>No of test field</i>	Odczyn gleby [pH]	Zawartość CaCO_3 <i>Content of CaCO_3</i> [%]	Przewodność elektryczna <i>Electrical conductivity</i> [dS/m]	ESP <i>Exchangeable Sodium Percentage</i> [%]
1	9,1	19,2	54,0	79,0
2	8,9	17,6	65,3	69,0
3	8,6	24,8	13,9	37,2
4	8,5	5,5	5,3	14,2
5	8,8	13,8	14,6	38,5
6	9,0	16,3	0,63	77,1
7	7,8	11,9	63,0	4,2
8	7,8	20,1	0,5	2,6
9	8,0	10,9	0,7	2,1
10	8,6	18,8	49,9	2,0
11	8,7	12,4	42,4	60,3
12	8,6	14,0	31,8	39,8
13	8,9	11,8	0,46	16,9
14	8,1	11,6	7,4	2,8
15	9,0	9,7	28,0	25,1
16	9,1	18,9	13,1	26,7
17	8,3	11,9	4,0	7,1
18	7,8	10,1	7,0	5,8
19	8,8	14,2	34,0	46,8
20	9,4	12,6	36,4	73,3
21	8,2	14,2	65,5	2,2
22	8,6	13,1	29,9	8,7
23	8,5	29,9	37,3	53,2
24	9,2	18,1	25,7	35,4
25	8,9	16,5	12,0	18,3
26	8,5	14,8	26,8	14,6
27	8,3	17,8	42,1	13,6
28	8,5	16,8	23,7	3,9
29	8,3	18,9	59,8	1,8
30	9,6	13,4	59,5	59,4
31	8,1	7,8	23,3	1,2
32	8,0	5,2	7,5	2,8
33	8,6	7,4	6,3	16,6
34	8,3	3,6	0,2	15,8
35	8,0	6,3	5,4	2,3
36	8,4	6,3	32,1	1,2
37	8,0	11,5	5,1	0,9
38	9,0	4,6	12,1	31,4
39	8,2	9,4	14,0	2,2
40	7,9	8,1	4,6	15,7



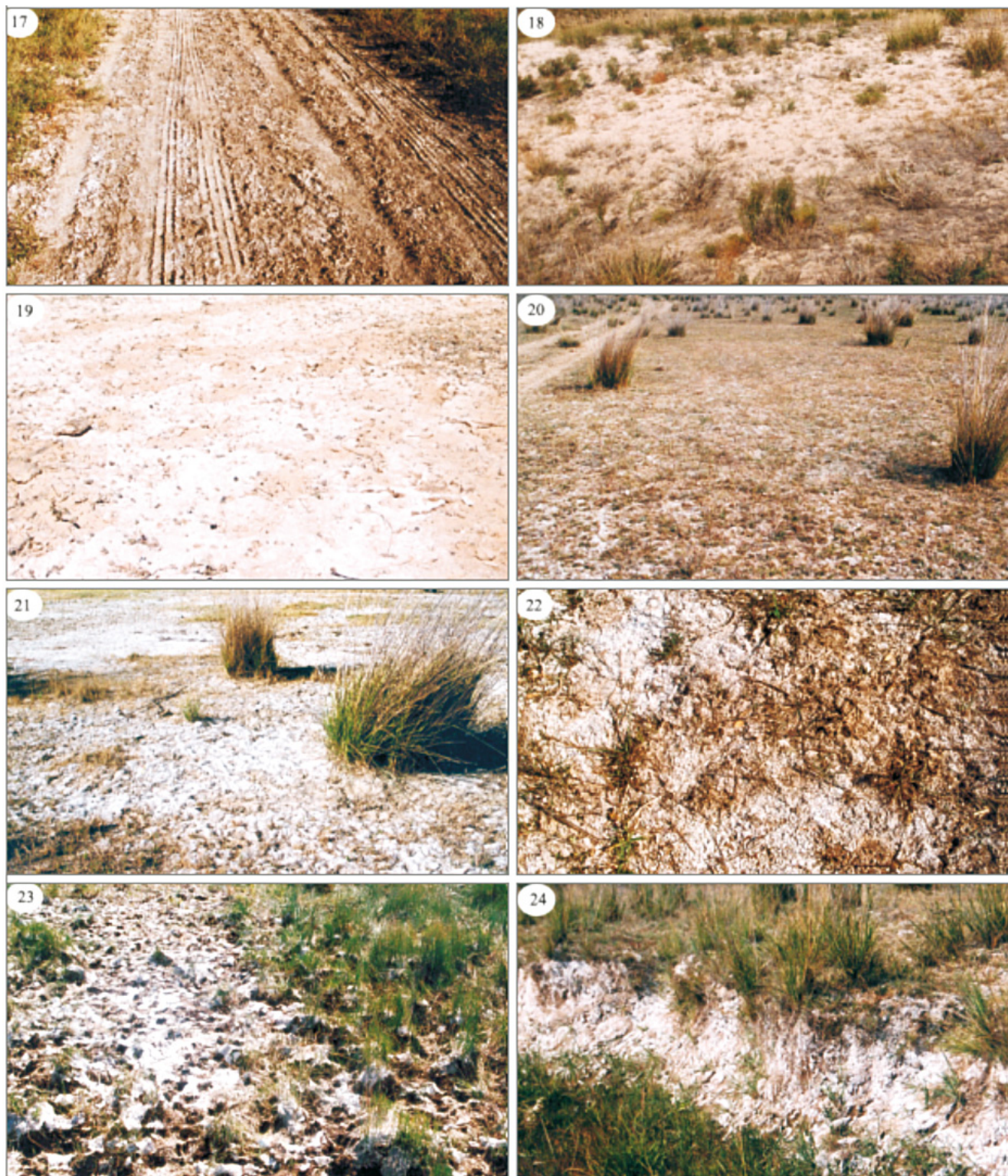
Ryc. 12. Fotografie 40 pól wzorcowych: 1 – szaroziemny łąkowe silnie solonczakowo-solońcowate, 2 – gleby łąkowo-bagienne silnie solonczakowo-solońcowate, 3 – szaroziemny jasne średnio solonczakowo-solońcowate, 4 – szaroziemny jasne słabo solonczakowe, 5 – łąkowe jasne średnio solonczakowo-solońcowate, 6 – szaroziemny jasne silnie solońcowate, 7 – szaroziemny jasne silnie solonczakowe, 8 – łąkowo-szaroziemne słabo solonczakowe

Fig. 12. Photograph of 40 test fields: 1 – strongly saline-sodic serozem-meadow soils, 2 – strongly saline-sodic meadow-wetland soils, 3 – moderately saline-sodic light serozems, 4 – slightly saline light serozems, 5 – moderately saline-sodic light meadow soils, 6 – strongly sodic light serozems, 7 – strongly saline light serozems, 8 – slightly saline meadow-serozems



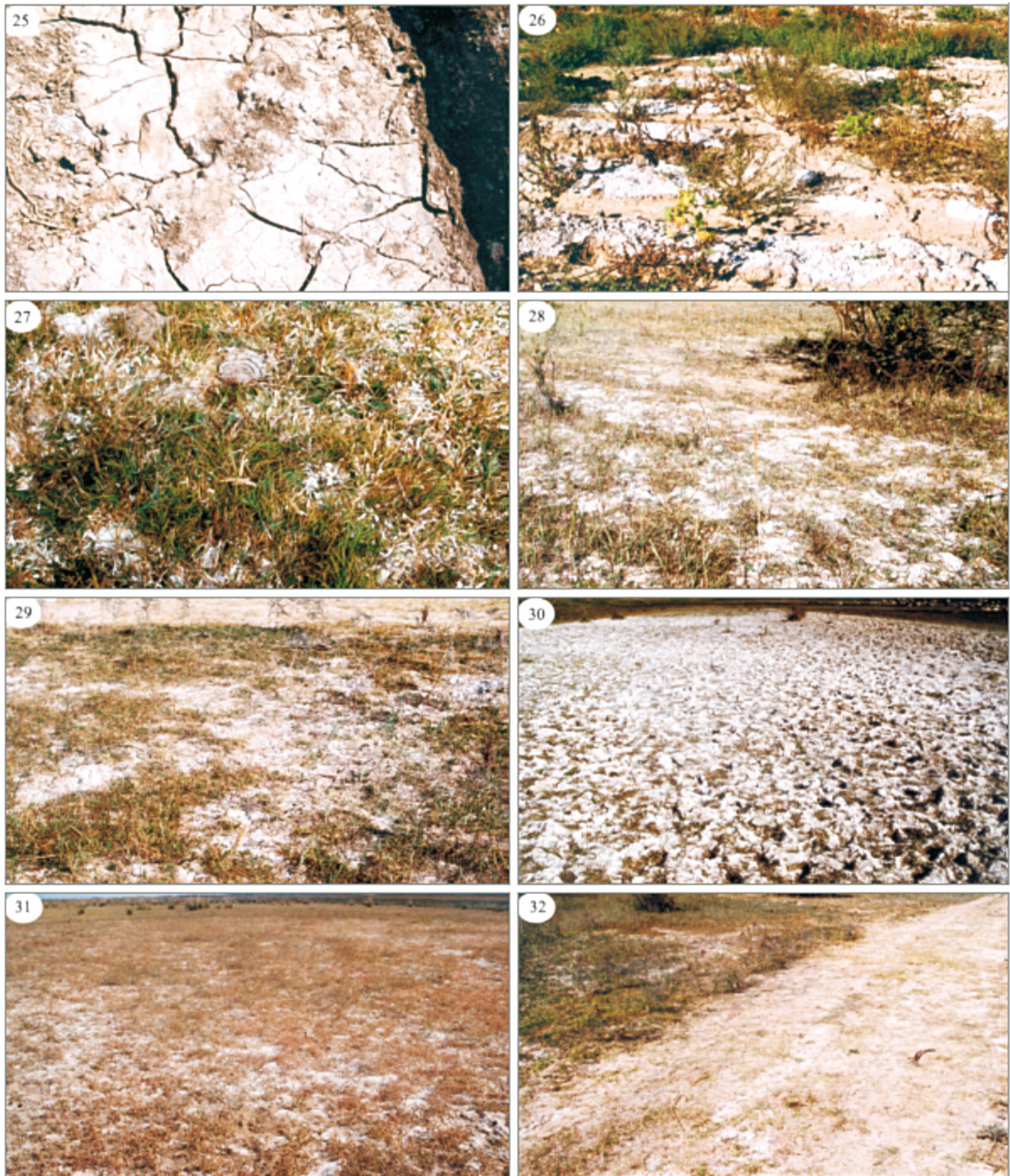
Ryc. 12. cd. 9 – szaroziemy jasne niezasolone, 10 – szaroziemy łąkowe silnie solonczakowe, 11 – łąkowe jasne silnie solonczakowo-słońcowate, 12 – szaroziemy jasne silnie solonczakowo-słońcowate, 13 – szaroziemy jasne średnio słońcowate, 14 – szaroziemy łąkowe słabo solonczakowe, 15 – szaroziemy jasne średnio solonczakowo-słońcowate, 16 – szaroziemy jasne słabo solonczakowo-słońcowate

Fig. 12. cont. 9 – none-affected light serozems, 10 – strongly saline serozem-meadow soils, 11 – strongly saline-sodic light meadow soils, 12 – strongly saline-sodic light serozem, 13 – moderately sodic light serozems, 14 – slightly saline serozem-meadow soils, 15 – moderately saline-sodic light serozems, 16 – slightly saline-sodic light serozems



Ryc. 12. cd. 17 – szaroziemny jasne średnio solonczakowe, 18 – szaroziemny jasne słabo solonczakowe, 19 – szaroziemny jasne silnie solonczakowe-solońcowate, 20 – szaroziemny północne zwykle średnio solonczakowo-solońcowate, 21 – szaroziemny łąkowe silnie solonczakowe, 22 – szaroziemny jasne średnio solonczakowe, 23 – łąkowo-bagienne gleby silnie solonczakowo-solońcowate, 24 – łąkowo-szaroziemne gleby średnio solonczakowe

Fig. 12. cont. 17 – moderately saline light serozems, 18 – slightly saline light serozems, 19 – strongly saline-sodic light serozems, 20 – moderately saline-sodic typical northern serozems, 21 – strongly saline serozem-meadow soils, 22 – moderately saline light serozems, 23 – strongly saline-sodic meadow-wetland, 24 – moderately saline meadow-serozems



Ryc. 12. cd. Fotografie 40 pól wzorcowych: 25 – szaroziemny jasne słabo solonczakowo-solońcowate, 26 – szaroziemny łąkowe średnio solonczakowe, 27 – łąkowo-szaroziemne gleby silnie solonczakowe, 28 – szaroziemny jasne średnio solonczakowe, 29 – szaroziemny jasne silnie solonczakowe, 30 – łąkowo-szaroziemne gleby silnie solonczakowo-solońcowate, 31 – szaroziemny łąkowe średnio solonczakowo-solońcowate, 32 – szaroziemny jasne silnie solonczakowe

Fig. 12. cont. 25 – slightly saline-sodic light serozems, 26 – moderately saline serozem-meadow soils, 27 – strongly saline meadow-serozems, 28 – moderately saline light serozems, 29 – strongly saline light serozems, 30 – strongly saline-sodic meadow-serozems, 31 – moderately saline-sodic serozem-meadow soils, 32 – strongly saline light serozems



Ryc. 12. cd. Fotografie 40 pól wzorcowych: 33 – szaroziemny łąkowe średnio solonczakowo-solońcowate, 34 – łąkowe jasne słabo solońcowate, 35 – łąkowo-szaroziemne gleby słabo solonczakowe, 36 – szaroziemny jasne silnie solonczakowe, 37 – łąkowe jasne słabo solonczakowe, 38 – szaroziemny łąkowe średnio solonczakowo-solońcowate, 39 – szaroziemny łąkowe średnio solonczakowe, 40 – łąkowe jasne gleby słabo solonczakowo-solońcowate

Fig. 12. cont. 33 – moderately saline-sodic meadow-serozems, 34 – slightly sodic light meadow, 35 – slightly saline meadow-serozems, 36 – strongly saline light serozems, 37 – slightly saline light meadow soils, 38 – moderately saline-sodic serozem-meadow soils, 39 – moderately saline serozem-meadow soils, 40 – slightly saline-sodic light sierozems

wi odpowiednio 17,9% i 6,1% powierzchni badanego obszaru. Areal powierzchni rolniczych nieporośniętych roślinnością i powierzchni pokrytych kamieniami i piaskami wyniósł odpowiednio 125,9 tys. ha i 35,1 tys. ha, co stanowi odpowiednio 20,8% i 5,8% powierzchni doliny. Tereny zabudowane i wody powierzchniowe obejmowały 58,3 tys. ha i 4,9 tys. ha, co stanowi 9,6% i 0,8% powierzchni doliny. Wszystkie wymienione powierzchnie niebędące glebami słonymi objęto łączną maską binarną odpowiadającą 369,6 tys. ha, tj. 60,1% areалу doliny Czuj. Areal terenów porośniętych roślinnością w roku 1994 był większy niż w roku 2001. Wynikało to z daty rejestracji analizowanych obrazów satelitarnych. Gleby na obrazach Landsat TM, pochodzących z 14 lipca, były bardziej przykryte roślinnością niż gleby na obrazach Landsat ETM+ z 6 czerwca.

Całkowity obszar terenów nieprzykrytych maską binarną na obrazach Landsat TM w roku 1994 wynosił 212,4 tys. ha, co odpowiada 34,5% powierzchni badanej części doliny Czuj. W roku 2001 natomiast na obrazach Landsat ETM+ ten obszar wyniósł 235,4 tys. ha, co stanowi 38,9% tego obszaru doliny. Po objęciu łączną maską binarną terenów niebędących glebami słonymi poddano je dalszej klasyfikacji nadzorowanej.

6.4.2. Pola wzorcowe

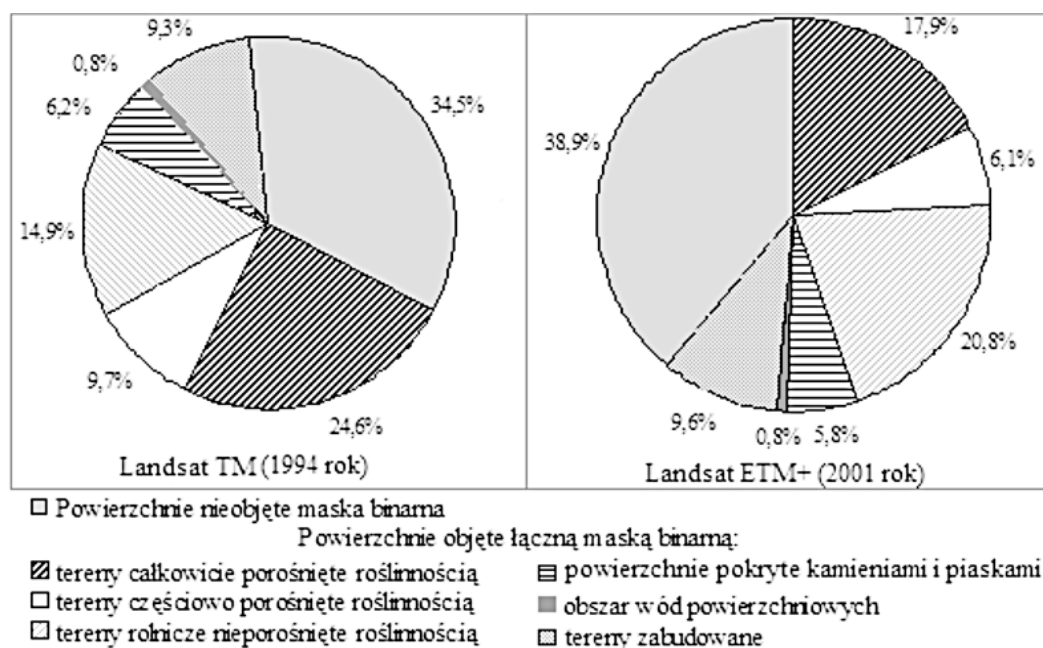
Obrazy Landsat TM i Landsat ETM+ w ich najważniejszych kanałach dla dokonywanej klasyfikacji gleb słonych, tj. 2, 3 i 4, przetworzono za pomocą najodpowiedniejszego do tego celu algorytmu, jakim jest algorytm największego prawdopodobieństwa, pomijając za pomocą łącznej maski binarnej obiekty niebędące glebami słonymi. Podczas tej procedury wykorzystano łącz-

nie 240 pól wzorcowych, znajdujących się w obrębie powierzchni testowych Panfilow i Moskiewski. Z tej liczby do klasyfikacji obrazów Landsat TM i Landsat ETM+ wykorzystano po 120 pól. Wyniki klasyfikacji nadzorowanej gleb słonych doliny Czuj, poza powierzchniami testowymi Panfilow i Moskiewski, nie były weryfikowane w terenie i nie była tu również oceniana dokładność wydzielonych klas gleb słonych.

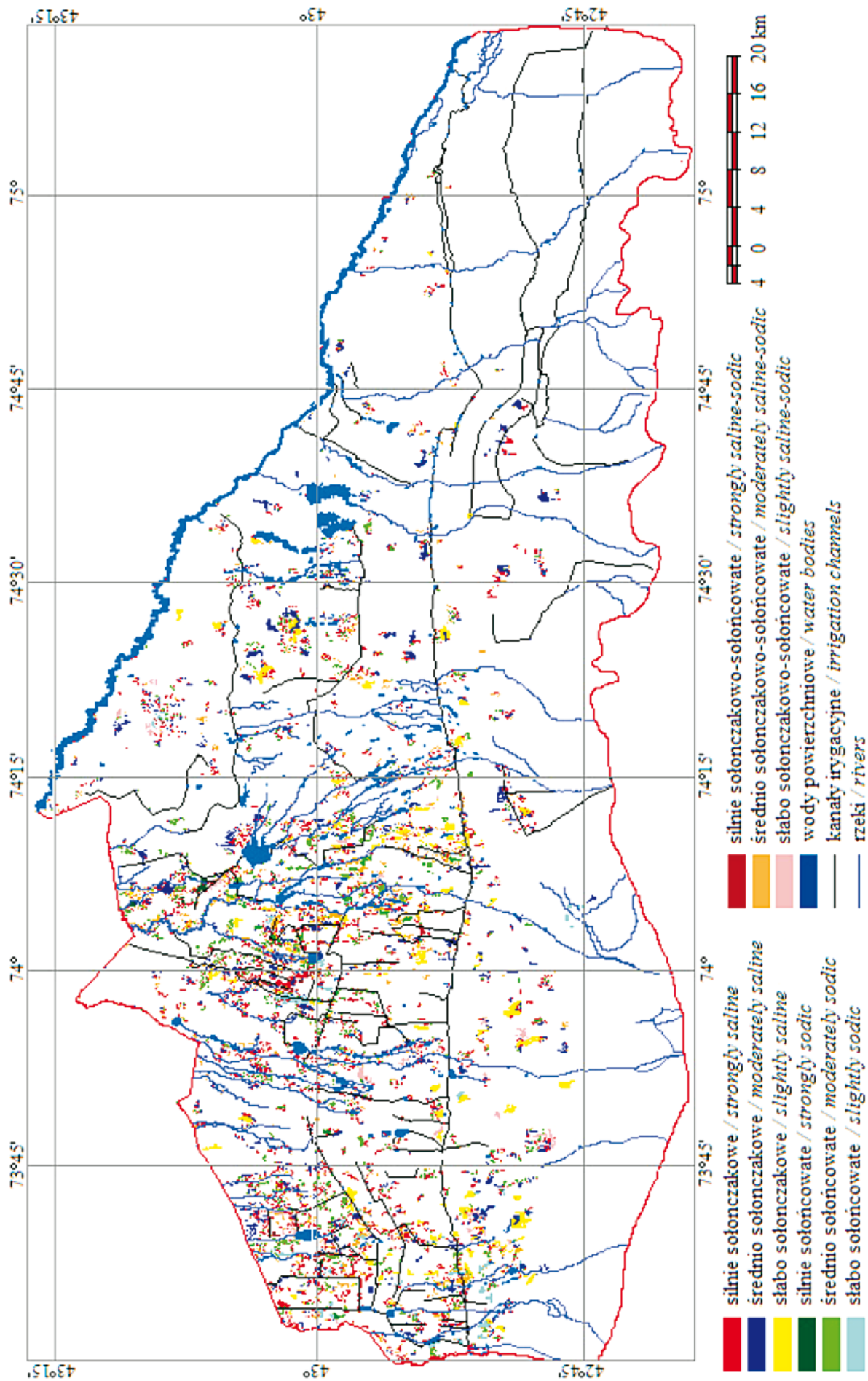
6.5. Porównanie areалу gleb słonych w dolinie Czuj w latach 1994 i 2001

Wyniki klasyfikacji nadzorowanej przedstawiającej stan zasolenia gleb doliny Czuj w granicach Kirgistanu w latach 1994 i 2001 są prezentowane na rysunkach 14 i 15. Silnie urzeźbiona i rozczłonkowana w wyniku działalności rzek przedgórska część doliny Czuj, przykryta glebami ciemnokasztanowymi, jasnokasztanowymi oraz szaroziemami ciemnymi, nie była zasolona w 1994 i 2001 roku. Natomiast równinna część doliny Czuj, pokryta glebami kasztanowymi (K), szaroziemami północnymi jasnymi (C3C), szaroziemami północnymi zwykłymi (C2C), szaroziemami łąkowymi (C3L), glebami łąkowo-szaroziemnymi (LC3) oraz glebami łąkobiennymi (LB) i bagiennymi (B), a także glebami aluwialnymi (A) i glebami aluwialno-łąkowymi (AL), wykazywała zasolenie o różnej intensywności.

Gleby kasztanowe, występujące u podnóża Pasma Kirgiskiego na wysokości od 1000 do 1400 m, były zasolone tylko miejscami. Ich łączny areal wyniósł w roku 1994 0,07 tys. ha, a w roku 2001 wzrósł do 0,09 tys. ha. Szaroziemy północne jasne, zajmujące przedgórskie zbocza Pasma Kirgiskiego i dawnej terasy rzeki Czuj na wysokości od 600 do 1000 m n.p.m., były również zasol-

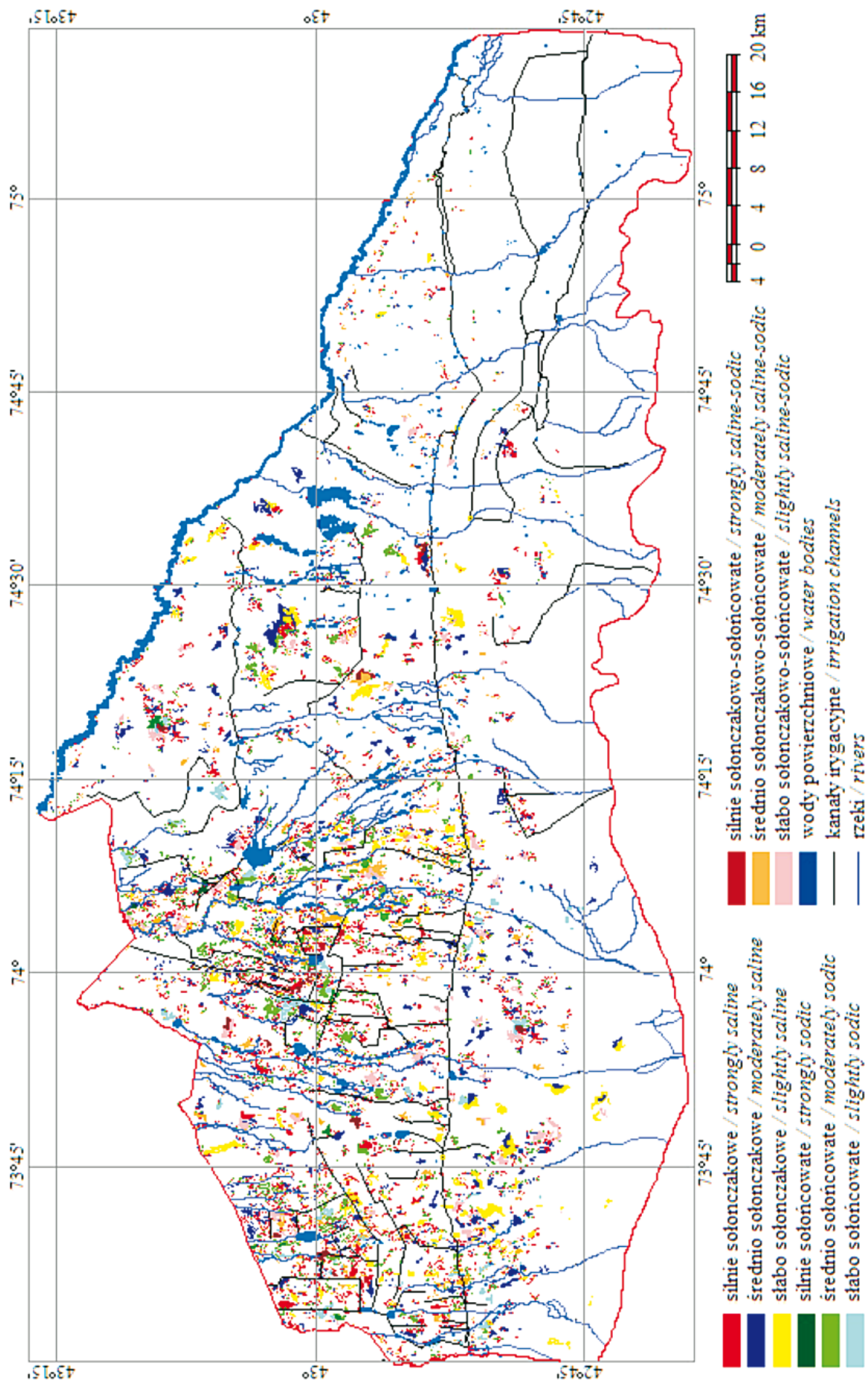


Ryc. 13. Udział powierzchni niebędących glebami słonymi doliny Czuj na obrazach Landsat TM i Landsat ETM+
 Fig. 13. Part of the surface with none-affected soils of the Chuy Valley on Landsat TM and Landsat ETM+ images



Ryc. 14. Obszary gleb słonych doliny Czuj w roku 1994 zinterpretowane przy użyciu obrazów Landsat TM

Fig. 14. Area of salt-affected soils of the Chuy Valley in 1994 interpreted by using Landsat TM images



Ryc. 15. Obszary gleb słonych doliny Czuj w roku 2001 zinterpretowane przy użyciu obrazów Landsat ETM+

Fig. 15. Area of salt-affected soils of the Chuy Valley in 2001 interpreted by using Landsat ETM+ images

lone. Ich łączny areal w roku 1994 wynosił 4,4 tys. ha, a w roku 2001 powiększył się do 6,9 tys. ha.

Szaroziemi północne zwykle, zajmujące północno-zachodnią część doliny Czuj na wysokości 500-600 m, były także w różnym stopniu zasolone. Ich łączny areal w roku 1994 wynosił 4,8 tys. ha, a w roku 2001 zwiększył się do 7,2 tys. ha. Szaroziemi łąkowe, obejmujące środkową część doliny Czuj, również uległy zasoleniu. Ich łączny areal w roku 1994 wyniósł 12,9 tys. ha, w roku 2001 natomiast wzrósł do 16,2 tys. ha. Gleby łąkowo-szaroziemne są jednymi z najbardziej zasolonych dolinie Czuj. Ich największe płaty są skoncentrowane w środkowej i północno-zachodniej części doliny Czuj, a także w pobliżu jej koryta. Ich łączny areal w roku 1994 wyniósł 60,4 tys. ha, a w roku 2001 zwiększył się do 68,8 tys. ha.

Gleby łąkowe jasne, występujące w północno-zachodniej oraz zachodniej części doliny Czuj na wysokości 500-600 m, również podlegały intensywnemu zasoleniu. Gleby te zaliczano również do najbardziej zasolonych gleb doliny. Ich łączny areal w roku 1994 wyniósł 62,4 tys. ha, a w 2001 roku – 71,2 tys. ha. Gleby łąkobiagienne oraz biagienne, występujące w kompleksie razem z glebami łąkowymi, były zasolone tylko miejscami. Ich łączny areal wyniósł w 1994 roku – 0,7 tys. ha, a w roku 2001 wzrósł on do 0,81 tys. ha.

Gleby aluwialne i aluwialno-łąkowe, występujące w pobliżu koryta rzeki Czuj, były w różnym stopniu zasolone. W roku 1994 ich areal wyniósł 490 ha, a w roku 2001 wzrósł o 145 ha.

Łączny areal gleb słonych doliny Czuj w granicach Kirgistanu w roku 1994 wyniósł 155,3 tys. ha, w tym: silnie zasolonych – 39 tys. ha, średnio zasolonych – 57 tys. ha i słabo zasolonych – 59,5 tys. ha. W 2001 roku natomiast według wyników klasyfikacji nadzorowanej powiększył się do 177,4 tys. ha, w tym: silnie zasolonych do 46,8 tys. ha, średnio zasolonych do 65, 2 tys. ha, słabo zasolonych do 65,4 tys. ha. Gleby słone badanej części doliny Czuj w latach 1994 i 2001 stanowiły odpowiednio 25,5% i 28,8% tego obszaru. Zasolenie gleb doliny Czuj w okresie od 1994 do 2001 zwiększyło się o 22,1 tys. ha. W tym areal gleb solonczakowych w ciągu siedmiu lat powiększył się o 10,4 tys. ha, gleb solonczakowo-sołońcowatych o 7,9 tys. ha, a gleb sołońcowatych o 3,8 tys. ha (tab. 19).

Przyczyną tak gwałtownego pogorszenia się stanu gleb jest zmiana własności gruntów rolnych. Po uzyskaniu przez Kirgistan niepodległości w 1991 roku grunty rolne wcześniej należące do gospodarstw państwowych i spółdzielni produkcyjnych rozparcelowano między wszystkich obywateli. Nowi właściciele gruntów rolnych, niemający odpowiedniej kwalifikacji i doświadczenia w gospodarzeniu gruntami rolnymi, doprowadzili do szybkiej degradacji gleb. Degradacja ta została przyspieszona przez brak bieżącej konserwacji lub wręcz zniszczenie wielu systemów irygacyjnych. Nieodpowiednio uprawiane grunty rolne były porzucane z powodu ich postępującego zasolenia, ich powierzchnię w coraz większym stopniu zajmowała roślinność halofitowa, odporna na działanie wysokiego stężenia soli.

6.6. Przyczyny różnic dokładności klasyfikacji gleb słonych

W celu stwierdzenia przyczyn zróżnicowania dokładności klasyfikacji poszczególnych typów gleb słonych wykonano badania spektralne luminancjometrem CIMEL CE-313-21. 16 spośród 34 prób glebowych pobranych z pól wzorcowych powierzchni testowych Panfilow i Moskiewski, omówionych w poprzednim rozdziale, przeanalizowano pod względem odbicia spektralnego w zakresie odpowiadającym kanałom satelitarnym wykorzystanym do klasyfikacji nadzorowanej. Wybrane próby glebowe reprezentowały następujące gleby słone:

– solonczakowo-sołońcowate, w tym silnie solonczakowo-sołońcowate (SA3) z pól próbnych nr 1, 2, 11, 12, 19, 23 i 30 oraz gleby średnio solonczakowo-sołońcowate (SA2) z pola nr 15,

– solonczakowe, w tym silnie solonczakowe (S3) z pól nr 10, 21 i 27, średnio solonczakowe (S2) z pól nr 22, 26 i 28, a także słabo solonczakowe (S1) z pól nr 4, 18.

Materiał glebowy wybranych prób glebowych, luźno rozłożony w kuwetach, mierzono w czterech długościach fal, odpowiadających następującym zakresom kanałów Landsat TM i Landsat ETM+: 450 nm (TM1 i ETM1), 550 nm (TM2 i ETM2), 650 nm (TM3 i ETM3) i 850 nm (TM4 i ETM4) oraz kanałów TERRA ASTER: 550 nm (A1), 650 nm (A2) i 850 nm (A3). Pomiary spektralne luminancji przeprowadzono na powierzchniach gleb słonych przy kątach zenitalnych Słońca od 28,6° do 29,5° (rys. 16 A), od 30,2° do 32,9° (rys. 16 B) oraz od 44,7° do 47,9° (rys. 16 C); przedziały te są zbliżone do kątów, przy których zarejestrowano wykorzystane obrazy satelitarne: 27,7° zdjęcia Landsat ETM+ z 6 czerwca 2001 roku, 30,4° zdjęcia Landsat TM z 14 lipca 1994 roku oraz 45,4° zdjęcia TERRA ASTER z 28 września 2001 roku.

Na rysunku 16 A przedstawiono krzywe współczynnika odbicia gleb o różnym stopniu zasolenia przy kątach zenitalnych Słońca w zakresie od 28,6° do 29,5°, odpowiadającym przybliżonym warunkom oświetlenia podczas rejestracji obrazów Landsat ETM+. Przy tych kątach zenitalnych Słońca współczynniki odbicia gleb silnie solonczakowo-sołońcowatych (SA3, nr 2 i 30) były najwyższe. W przypadku fali o długości 450 nm wyniosły 28,2 %, a fali 850 nm – 54,8%. Wraz ze zmniejszającą się zawartością soli w glebach średnio solonczakowo-sołońcowatych, mierzoną przewodnością elektryczną oraz zawartością sodu wymiennego, ich współczynniki odbicia malały we wszystkich analizowanych kanałach. Były one 1,7-krotne niższe od wartości współczynników odbicia gleb silnie solonczakowo-sołońcowatych. Współczynnik odbicia gleby silnie solonczakowej (S3, nr: 21) wyniósł 25,6% dla fali o długości 450 nm oraz 50,2% dla fali 850 nm. Gleby średnio (S2, nr: 22 i 26) i słabo solonczakowe (S1, nr: 4 i 18) wykazały odpowiednio 1,4 i 2-krotne niższy współczynnik odbicia od współczynnik odbicia gleb silnie solonczakowej.

Współczynnik odbicia spektralnego uzyskany przy kątach zenitalnych Słońca w zakresie od 30,2° do 32,9°,

Tab. 19. Areał gleb słonych sklasyfikowanych za pomocą algorytmu największego prawdopodobieństwa
 Table 19. The area of salt-affected soils classified by applying the Maximum Likelihood algorithm

Klasa gleb słonych <i>Classes of salt-affected soils</i>	Areał wydzielonych gleb słonych [tys. ha] <i>The area of selected salt-affected soils</i>	
	Landsat TM	Landsat ETM+
silnie solonczakowe / <i>strongly saline</i>	15,6	19,4
średnio solonczakowe / <i>moderately saline</i>	22,4	25,9
słabo solonczakowe / <i>slightly saline</i>	19,8	23,1
silnie solonczakowo-solonoćcowate <i>strongly saline-sodic</i>	16,9	20,5
średnio solonczakowo-solonoćcowate <i>moderately saline-sodic</i>	13,1	15,5
słabo solonczakowo-solonoćcowate <i>slightly saline-sodic</i>	14,9	16,8
silnie solonoćcowate / <i>strongly sodic</i>	6,5	6,9
średnio solonoćcowate / <i>moderately sodic</i>	21,3	23,8
słabo solonoćcowate / <i>slightly sodic</i>	24,8	25,5
razem / <i>total</i>	155,3	177,4

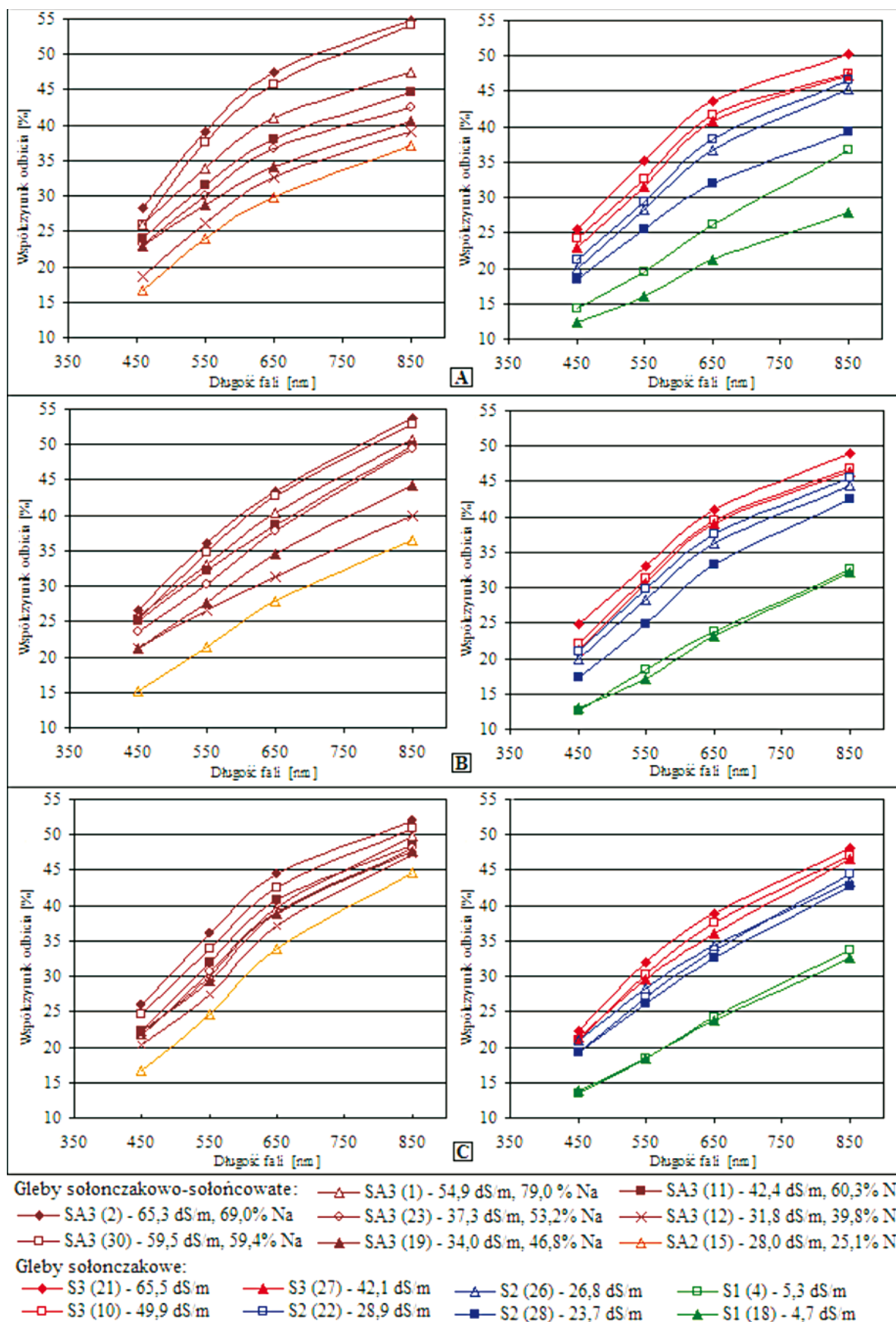
odnoszący się do rejestracji obrazów Landsat TM, przedstawiono na rysunku 16 B. Powierzchnie gleb silnie solonczakowo-solonoćcowatych (SA3, nr 2 i 30) charakteryzują się największym współczynnikiem odbicia wynoszącym 26,7% w przypadku fali o długości 450 nm oraz 53,7% fali 850 nm. Współczynnik odbicia gleb średnio solonczakowo-solonoćcowatych (SA2, nr 22 i 26) był 1,7-krotnie mniejszy od współczynnika odbicia gleb silnie solonczakowo-solonoćcowatych. W przypadku gleb silnie solonczakowych (S3, nr 10, 21 i 27) wyniósł on 24,9% w przypadku fali 450 nm i 48,9% fali 850 nm. Gleby średnio (S2, nr 22 i 26) i słabo solonczakowe (S1, nr 4 i 18) miały odpowiednio 1,3 oraz 2-krotnie mniejszy współczynnik odbicia niż gleby silnie solonczakowe.

Współczynnik odbicia uzyskany przy kątach zenitalnych Słońca w zakresie od 44,7° do 47,9°, odpowiadający w przybliżeniu warunkom oświetlenia podczas rejestracji obrazów TERRA ASTER, przedstawiono na rysunku 16 C. Powierzchnie gleb silnie solonczakowo-solonoćcowatych (SA3, nr 2 i 30), o największej przewodności elektrycznej 65,3 dS/m i zawartości sodu wymiennego wynoszący 69%, wykazały najwyższy współczynnik odbicia 26,7% w przypadku fali o długości 450 nm oraz 53,7% fali 850 nm. Wraz ze zmniejszaniem się przewodności elektrycznej do 28,0 dS/m i zawartości Na w kompleksie sorpcyjnym do 25,1%, współczynnik odbicia gleby średnio solonczakowo-solonoćcowatej (SA2, nr 15) zmniejszył się 1,5 razy: do 16,8% dla fali 450 nm oraz do 44,6% fali 850 nm. Gleby silnie solonczakowe (S3, nr 10 i 21), o przewodności elektrycznej 49,9 i 65,5 dS/m, charakteryzowały się niższym współczynnikiem odbicia niż gleby silnie solonczakowo-solonoćcowate. Współczynnik odbicia gleb S3 wyniósł 22,4% w przypadku fali o długości 450 nm oraz 48,2% fali 850 nm. Gleby średnio (S2, nr 26 i 28) i słabo solonczakowe (S1, nr 4 i 18) we wszystkich kanałach wykazały odpowiednio 1,2 oraz 1,6-krotnie niższy współczynnik odbicia niż gleby silnie solonczakowe.

Przedstawione wyniki dowodzą, że największe kontrasty między glebami silnie zasolonymi a średnio i słabo zasolonymi występowały przy największych kątach zenitalnych Słońca, przy których rejestrowane były obrazy Landsat ETM+ (27,7°) i Landsat TM (30,1°). Kontrast między tymi glebami był istotnie mniejszy przy małych kątach zenitalnych Słońca, przy których zostały zarejestrowane obrazy TERRA ASTER (45,4°). Prezentowane wyniki wykazały również następującą prawidłowość: im wyższa wartość przewodności elektrycznej i udziału sodu wymiennego w kompleksie sorpcyjnym, tym wyższe wartości współczynnika odbicia i większy kontrast spektralny między silnie zasolonymi a pozostałymi glebami.

7. Dyskusja

Według Mamytova i in., (1991) powierzchnia doliny Czuj w obrębie Kirgistanu wynosi 600 tys. ha, a według danych Ministerstwa Melioracji i Gospodarstwa Wodnego Kirgistanu (*Nacional'nyj plan dejstvij...*, 2000) aż 740 tys. ha. W związku z rozbieżnościami w tym względzie, wynikającymi z różnego definiowania południowej granicy doliny Czuj w granicach Kirgistanu, w pracy granicą tę ustalono jako przebiegającą wzdłuż poziomic 1500 m n.p.m. Stąd określona w niniejszej pracy powierzchnia badanej części doliny wynosi 615 tys. ha. Na tak dużej powierzchni wyznaczono dwie powierzchnie testowe, Panfilow i Moskiewski, cechujące się dużym zróżnicowaniem chemizmu zasolenia gleb i zawartości soli. Powierzchnie te w roku 1996 i 2001 zostały szczegółowo badane przy wykorzystaniu tradycyjnych metod kartowania naziemnego. Obrazy satelitarne wykorzystane w pracy zostały zarejestrowane w niewielkim odstępnie czasowym od daty opracowania tych map, co pozwoliło na przeprowadzenie klasyfikacji nadzorowanej, w przypadku powierzchni Panfilow ten odstęp wynosił dwa lata, a powierzchni Moskiewski niecały rok.



Ryc. 16. Krzywe współczynnika odbicia gleb słonych przy kątach zenitalnych Słońca: 28,6°-29,5° (A), 30,2°-32,9° (B), 44,7°-47,9° (C) w czterech kanałach spektralnych

Fig 16. Reflectance coefficient curves of salt-affected soils at the Solar Zenith Angles: 28.6°-29.5° (A), 30.2°-32.9° (B), 44.7°-47.9° (C) for the four channels

Badania Lauera i Waltza (1983) wykazały, że kombinacje kanałów 3, 4 i 5 oraz 2, 3 i 4 Landsat TM są odpowiednie do oddzielenia gleb słonych od niezasolonych. Menenti i in. (1984) w swoich badaniach wyznaczyli inną kombinację kanałów Landsat TM – 1, 5 i 7, jako najskuteczniejszą w identyfikacji gleb słonych Tunezji. Dwivedi i Rao (1992), szukając odpowiedniej kombinacji kanałów Landsat TM do klasyfikacji gleb słonych równiny Indo-Gang w Indiach, posłużyli się wartościami *OIF* i określili kombinację kanałów 1, 3 i 5 jako najlepszą. W niniejszej pracy również posłużono się wartościami *OIF* do znalezienia najlepszej kombinacji kanałów w celu wydzielenia gleb słonych doliny Czuj. Do klasyfikacji nienadzorowanej wybrano sześć kombinacji kanałów o najwyższych wartościach *OIF*. Wybrane kombinacje kanałów Landsat TM były analogiczne do kombinacji kanałów w pracach wymienionych autorów. W prezentowanej pracy spośród sześciu kombinacji kanałów wybrano kanały 2, 3, 4 Landsat TM i Landsat ETM+ oraz kanały 1, 2, 3 TERRA ASTER jako zapewniające najniższe wartości odchylenia standardowego rastra odległości.

W interpretacji zdjęć satelitarnych wartość osiąganych wyników zależy od stopnia rozpoznawania treści przedstawionej na zdjęciach, wiarygodności tego rozpoznawania i jego dokładności (Olędzki, 1992). W niniejszej pracy przyjęto zasady Stara i Estesa (1990) mówiące o tym, że interpretowany obraz powinien odnosić się do danych pozyskanych w terenie w czasie możliwie zbliżonym do daty rejestracji obrazów satelitarnych. Zatem do klasyfikacji nadzorowanej gleb słonych powierzchni Panfilów, przeprowadzonej na obrazach Landsat TM z 1994 roku, wykorzystano dane glebowe Instytutu „Kyrgyzgiprozem” pochodzące z 1996 roku. Do klasyfikacji nadzorowanej gleb słonych powierzchni Moskiewski, przeprowadzonej na obrazach Landsat ETM+ i TERRA ASTER z 2001 roku, wykorzystano pola wzorcowe odnoszące się do badań własnych zweryfikowanych naziemnie w 2002 i 2004 roku oraz dane z 2001 roku uzyskane z map zasolenia opracowanych przez Instytut „Kyrgyzgiprozem”. W pracy do klasyfikacji nadzorowanej gleb słonych powierzchni testowych Panfilów i Moskiewski, o łącznym areale 135,5 tys. ha, wykorzystano 240 pól wzorcowych, czyli przeciętnie 1 pole wzorcowe na 560 ha. Natomiast do klasyfikacji nadzorowanej doliny Czuj w granicach Kirgistanu, o łącznym areale 615 tys. ha, wykorzystano 283 pola wzorcowych, tj. 1 pole na 2,17 tys. ha. Metternicht (2003) w klasyfikacji gleb słonych doliny Punata-Cliza w Boliwii, o łącznym obszarze 44 tys. ha, wykorzystał 95 pól wzorcowych, tj. 1 pole przypadało na 500 ha. Dwivedi i in. (1999) w klasyfikacji nadzorowanej gleb słonych obszaru Uttar Pradesh w Indiach, o powierzchni wynoszącej 602,4 tys. ha, wykorzystali 54 pola wzorcowe, czyli 1 pole na 11,2 tys. ha. W niniejszej pracy przeprowadzono klasyfikację nadzorowaną na powierzchniach testowych Panfilów i Moskiewski przy podobnym zagęszczeniu pól wzorcowych jak w pracy Metternichta (2003).

Spośród trzech algorytmów klasyfikacji nadzorowanej: minimalnej odległości od średniej, największego prawdopodobieństwa i propagacji wstecznej, wybrano jako najodpowiedniejszy do wydzielenia gleb słonych algorytm największego prawdopodobieństwa. Jego działanie, zgodnie z propozycją Landisa i Kocha (1977), oceniono jako dające wysoką dokładność zastosowanej klasyfikacji, gdyż całkowity współczynnik dokładności przekroczył 80%. Uznanie w pracy algorytmu największego prawdopodobieństwa jako najlepszego w wydzieleniu gleb słonych jest zgodne z wynikami innych autorów, Metternichta i Zincka (1997), Goosensa i Ransta (1998) i Abuzara i in. (2001). Metternicht i Zinck (1997), którzy również wykorzystali algorytm największego prawdopodobieństwa do klasyfikacji gleb słonych doliny Punata-Cliza w Boliwii, osiągnęli całkowitą dokładność 64%. Abuzar i in. (2001), klasyfikując nawadniane gleby Australii o różnym stopniu zasolenia, również skorzystali z algorytmu największego prawdopodobieństwa. Całkowita dokładność ich klasyfikacji wyniosła 85,2%.

Dokładność wydzielenia gleb silnie zasolonych na analizowanych obrazach satelitarnych wahała się od 85 do 90%, gleb średnio zasolonych od 70 do 80%, a słabo zasolonych od 63 do 70%. Wyniki tej klasyfikacji nadzorowanej sprawdzano w terenie na 40 polach wzorcowych, które zgodnie z propozycją Richardsa (1954), Lamonda i Whitneya (1992), Rowella (1997), Rao i in. (1995) oraz Rengasamy (1998) odniesiono do gleb solonczakowych, solonczakowo-soleńcowatych i soleńcowatych. Przyjęto, że gleby solonczakowe charakteryzują się odczynem mniejszym od 8,5 pH, przewodnością elektryczną (EC) powyżej niż 4 dS/m i zawartością sodu wymiennego w kompleksie sorpcyjnym (ESP) mniejszą niż 15%. Według powyższych czynników gleby solonczakowe podzielono na: słabo solonczakowe (EC 4-8 dS/m; ESP poniżej 15%), średnio solonczakowe (EC 8-30 dS/m; ESP poniżej 15%) i silnie solonczakowe (EC 30 dS/m; ESP poniżej 15%).

Gleby solonczakowo-soleńcowate cechują się odczynem powyżej 8,5 pH, przewodnością elektryczną powyżej 4 dS/m oraz zawartością sodu wymiennego powyżej 15%. Gleby solonczakowo-soleńcowate podzielono na: słabe (EC 4-8 dS/m; ESP 15–25%), średnie (EC 8-30 dS/m; ESP 25-40%) i silnie (EC powyżej 30 dS/m; ESP powyżej 40%).

Gleby soleńcowate charakteryzują się odczynem gleby większym od 8,5 pH, przewodnością elektryczną mniejszą od 4 dS/m i zawartością sodu w kompleksie sorpcyjnym większą od 15%. Gleby te podzielono na: słabo soleńcowate (EC poniżej 4 dS/m; ESP 15–25%), średnio soleńcowate (EC poniżej 4 dS/m; ESP poniżej 25-40%) i silnie soleńcowate (EC poniżej 4 dS/m; ESP powyżej 40%).

Różnice dokładności w klasyfikacji nadzorowanej poszczególnych klas gleb słonych odniesiono do wyników pomiarów odbicia spektralnego od sztucznie spreparowanych powierzchni gleb słonych. Wyniki te dotyczą odbicia spektralnego zmierzonego przy kącie

zenitalnym Słońca zbliżonym do tego, przy którym zarejestrowano obrazy Landsat TM, Landsat ETM+ i TERRA ASTER. W odniesieniu do obrazów Landsat TM przydatne okazały się wyniki pracy Rao i in. (1995). Autorzy ci mierzyli odbicie spektralne od gleb słonych doliny Indo-Gang w warunkach naturalnych przy kącie zenitalnym Słońca oraz w zakresie spektralnym podobnym do tych wykonanych w niniejszej pracy. Powierzchnie gleb silnie solonczakowo-soloncowatych w niniejszej pracy i w pracy Rao i in. (1995) charakteryzowały się największym współczynnikiem odbicia fali o długości 850 nm. Współczynnik odbicia od sztucznie przygotowanej powierzchni gleby silnie solonczakowo-soloncowatej wyniósł 53,7%, a w podobnej glebie w pracy Rao i in. 61%. Takie zróżnicowanie mogło wynikać z większego stężenia soli w glebie w warunkach naturalnych. Współczynnik odbicia od gleb średnio solonczakowo-soloncowatych fali o długości 850 nm, sztucznie spreparowanych i gleb w warunkach naturalnych przedstawionych w pracy Rao i innych, był 1,7-krotnie mniejszy od współczynnika odbicia od gleb silnie solonczakowo-soloncowatych. Współczynnik odbicia gleb silnie solonczakowych, opisany w niniejszej pracy, wyniósł 48,9%, a w pracy Rao i in. – 49,8%. Andronikow (1986) przeprowadził pomiary odbicia spektralnego od gleb strefy suchej w warunkach laboratoryjnych w zakresie widzialnym od 440 do 720 nm. Do eksperymentu wybrał gleby bardzo silnie i silnie solonczakowe. Współczynnik odbicia fali o długości 650 nm gleby bardzo silnie solonczakowej wynosił 45%, a gleby silnie solonczakowej 44%. Choć nie określił on dokładnie kąta zenitalnego Słońca w trakcie pomiarów, jego wyniki wykazywały podobną wartość do otrzymanej w odniesieniu do fali czerwonej przy kącie zenitalnym Słońca wynoszącym 27,7°. Orlov i in. (1992) przedstawili również wyniki pomiarów odbicia spektralnego w zakresie widzialnym od powierzchni gleb strefy półpustynnej Uzbekistanu. Spośród badanych przez nich gleb, takich jak: gleba niezasolona, soloncowata oraz silnie solonczakowa, maksymalne odbicie wykazała gleba silnie solonczakowa przy długości fali 650 nm.

Na podstawie klasyfikacji nadzorowanej przedstawionej w niniejszej pracy, areal gleb słonych powierzchni testowej Panfilów wyniósł 20,9 tys. ha w roku 1994, natomiast według danych Instytutu „Kirgizgiprozem” pochodzących z roku 1996 areal ten wyniósł aż 34,7 tys. ha. Areal gleb słonych powierzchni testowej Moskiewski w roku 2001, obliczony za pośrednictwem klasyfikacji nadzorowanej obrazów Landsat ETM+ i TERRA ASTER, wyniósł odpowiednio 29,4 tys. ha i 29,8 tys. ha. Według danych Instytutu „Kirgizgiprozem” z tego samego roku ich areal również został oszacowany znacznie wyżej, na 45 tys. ha. Dane odnoszące się do tych dwóch powierzchni testowych są znacznie wyżej oszacowane przez Instytut „Kirgizgiprozem” niż za pomocą procedury proponowanej w niniejszej pracy, gdyż były pozyskiwane dwoma różnymi metodami. Areal gleb słonych określony na podstawie interpretacji obrazów satelitarnych obejmuje tylko zasolenie powierzch-

niowego poziomu gleb, natomiast areal gleb słonych ustalony przez Instytut „Kirgizgiprozem” uwzględnia zasolenie w całym profilu glebowym. Aby móc porównać wyniki klasyfikacji gleb słonych na tych dwóch powierzchniach testowych, uzyskane w toku niniejszej pracy i przez wspomniany Instytut, przygotowano cyfrowe mapy uwzględniające tylko zasolenie powierzchniowego poziomu gleb. Według tej mapy cyfrowej łączny powierzchni testowej Panfilów w roku 1996 wyniósł 17,2 tys. ha, natomiast areal gleb słonych powierzchni testowej Moskiewski w 2001 roku 27,2 tys. ha. Porównując te liczby z wynikami klasyfikacji nadzorowanej można powiedzieć, że areal gleb słonych powierzchni testowej Panfilów ustalony na podstawie obrazów Landsat TM był o 3,7 tys. ha większy od określonego z cyfrowej mapy zasolenia. Areal gleb słonych powierzchni testowej Moskiewski w roku 2001, określony za pośrednictwem obrazów Landsat ETM+ i TERRA ASTER, był odpowiednio o 2,2 tys. ha i 2,6 tys. ha większy od arealu tych gleb odczytanego z cyfrowej mapy zasolenia.

Łączny areal gleb słonych doliny Czuj w granicach Kirgistanu w roku 1994 wyniósł 155,3 tys. ha, natomiast w 2001 roku ich areal zwiększył się o 22,1 tys. ha, i wyniósł 177,4 tys. ha. Według Mamytova (1991) oraz danych Ministerstwa Rolnictwa Kirgistanu (Instrukcja po melioracji ..., 1986), łączny areal gleb słonych w dolinie Czuj w 1985 roku wyniósł 259,5 tys. ha., według Ormonova (2002) natomiast 220 tys. ha. Określenie większego arealu gleb słonych przez wymienionych autorów jest spowodowane tym, że, obliczając areal brali pod uwagę zasolenie całego profilu glebowego, a w wynikach przeprowadzonych w niniejszej pracy uwzględniono tylko zasolenie poziomu powierzchniowego. Istnieje możliwość, że areal gleb słonych opisywany przez przytoczonych autorów mógł być obarczony błędami, gdyż mapy zasolenia całej doliny Czuj w skali 1:500 000 były mniej dokładne niż mapy zasolenia powierzchni testowe Panfilów i Moskiewski wykonanych w skali 1:10 000. Duża różnica arealu gleb słonych między wynikami klasyfikacji nadzorowanej i danymi omawianych autorów może być również spowodowana przewagą zasolenia poziomu podpowierzchniowego gleb nad zasoleniem poziomu powierzchniowego. Nie dysponując żadnymi dokładniejszymi danymi, charakteryzującymi zasolenie gleb poza powierzchniami testowymi Panfilów i Moskiewski, nie można było zatem oszacować dokładności klasyfikacji nadzorowanej całej doliny Czuj.

8. Wnioski

Wyniki badań przedstawionych w niniejszej pracy, dotyczące wydzielenia gleb słonych doliny Czuj w granicach Kirgistanu za pomocą obrazów Landsat TM i Landsat ETM+, wykazały wzrost arealu gleb słonych między rokiem 1994 a 2001. Areal gleb słonych w roku 1994 wyniósł 155,3 tys. ha., to stanowi 25,5% obszaru

doliny Czuj w granicach Kirgistanu. W roku 2001 areal gleb słonych zwiększył się o 22, 1 tys. ha, tj. o 3,7% powierzchni tej części doliny. W roku 1994 gleby solonczakowe zajmowały powierzchnię wynoszącą 58,0 tys. ha, a w roku 2001 ich areal powiększył się o 10,4 tys. ha, gleby solonczakowo-soloncowate w 1994 roku zajmowały powierzchnię 34,5 tys. ha, która w roku 2001 wzrosła o 7,9 tys. ha. Areal gleb soloncowatych w roku 1994 wyniósł 52,6 tys. ha i wzrósł do roku 2001 o 3,8 tys. ha.

Spośród 20 analizowanych kombinacji kanałów obrazów Landsat TM i Landsat ETM+ oraz 40 kombinacji obrazów TERRA ASTER jako najwłaściwsze do interpretacji gleb słonych wybrano kombinacje kanałów 2, 3, 4 Landsat TM i Landsat ETM+ oraz kombinację kanałów 1, 2, 3 TERRA ASTER. Spośród zastosowanych algorytmów klasyfikacji nienadzorowanej: k-średniej, średniej rozmytej, minimalnego rozkładu kątów i ISODATA, największą dokładność interpretacji osiągnięto za pomocą algorytmu ISODATA.

Zastosowanie łącznej maski binarnej, uzyskanej za pośrednictwem dodatkowych wskaźników roślinnych *NDVI* i *TVI*, wskaźnika słoności *SI* oraz wartości w kanale „jaskrawość” uzyskanych w wyniku zastosowania transformacji *Tasseled Cap* i operacji *Gram-Schmidt*, pozwoliło wyeliminować powierzchnie niebędące glebami słonymi.

Spośród zastosowanych w klasyfikacji nadzorowanej algorytmów, takich jak minimalna odległość od średniej, największe prawdopodobieństwo i propagacja wsteczna, algorytm największego prawdopodobieństwa zapewnił najlepsze wyniki. Skuteczność działania tego algorytmu, sprawdzonego na powierzchniach testowych Panfilów i Moskiewski, wyrażona wartością średnią arytmetyczną współczynników dokładności poszczególnych klas gleb słonych, wyniosła w przypadku obrazów Landsat TM, Landsat ETM+ oraz TERRA ASTER odpowiednio: 80,0, 81,1 i 80,3%.

Poszczególne klasy gleb słonych były wydzielane z niejednakową dokładnością. Dokładność ta była zdecydowanie największa w przypadku gleb silnie zasolonych i stopniowo malała wraz ze spadkiem zasolenia gleb. Współczynniki odbicia fal o długości 450 nm, 550 nm, 650 nm i 850 nm, odpowiadające kanałom 1, 2, 3 i 4 Landsat TM i Landsat ETM+ oraz kanałom 1, 2, 3 TERRA ASTER, od gleb silnie solonczakowych o najwyższej przewodności elektrycznej wynoszącej się od 42,1 do 65,5 dS/m, były 1,4 razy i 2 razy większe niż od gleb średnio i słabo solonczakowych, o przewodności odpowiednio od 23,7 do 28,9 dS/m i od 4,7 do 5,3 dS/m. Spośród gleb solonczakowo-soloncowatych najwyższy współczynnik odbicia wykazywały gleby silnie solonczakowo-soloncowate. Cechowały się one 1,7-krotne większym współczynnikiem odbicia niż gleby średnio solonczakowo-soloncowate. Pomiarzy odbicia spektralnego badanych materiałów glebowych dowiodły również, że obrazy Landsat ETM+ i Landsat TM, zarejestrowane przy kącie zenitalnym Słońca 27,7° i 30,2°, w stosunku do obrazu TERRA ASTER zarejestrowanego przy kącie zenitalnym Słońca 44,5°, umożliwiły większą dokładność interpretacyjną badanych gleb ze względu na więk-

szy kontrast spektralny między glebami silnie zasolonymi a średnio i słabo zasolonymi. Kontrast ten, bowiem jest wyraźnie większy przy małych niż dużych kątach zenitalnych Słońca.

Podziękowania

Składam serdecznie wyrazy podziękowania Panu prof. dr hab. inż. Jerzemu Cierniewskiemu, promotorowi niniejszej pracy, za okazaną pomoc w jej przygotowaniu, a także za opiekę podczas mojego pobytu w Polsce. Dziękuję również Panu dr. inż. Janowi Piekarczykowi za pomoc w przeprowadzeniu pomiarów spektralnych odbicia oraz Panu dr. Sławomirowi Królewiczowi za udzielenie porad i zeskanowanie map glebowych.

9. Literatura

- Abrams M., Hook S., 2002, *Aster User Handbook*, USA Jet Propulsion Laboratory, 2.
- Abuzar M., McAllister A., Morris M., 2001, *Classification of seasonal images for monitoring irrigated crops in a salinity-affected area of Australia*, International Journal of Remote Sensing, 22, 5, 717-726.
- Al-Khaier F., 2003, *Soil salinity detection Using Satellite Remote Sensing*, International Institute for Geo-information science and Earth observation Enschede, the Netherlands. PhD Thesis.
- Aliev Z.A., Bevza J.W., Ibragimov I.M., 1985, *Geologičeskoe stroenie i rel'ef Čujskoj upadiny*, Ilim, Frunze, 2 (in Russian).
- Andronikow W. L., 1986, *Teledetekcja gleb*, Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.
- Atlas Kirgizskoj SSR*, 1987, Ilim, Frunze, 112 (in Russian).
- Bakalo B. J., 1974, *Pokazateli vlagobespečennosti i režimu orošenia trav v vysokogornych rajonach Kirgizii*, Frunze, Kyrgyzstan, 178 (in Russian).
- Baženov N. K., 1967, *Ulučenie zasolennyh i soloncovatyh počv Kirgizii*, Ilim, Frunze, 94 (in Russian).
- Baženov N. K., 1973, *Zasolenye počvy Kirgizii i puti ich melioracii*, Kyrgyzstan, Frunze (in Russian).
- Borovski B. M., 1982, *Formirovanie zasolennyh počv i gidrochimičeskie provincii Kazachstana*, Nauka, Alma-Ata, 256 (in Russian).
- Bui S., Sumner M. E., Naidu R., 1998, *Sodic soils*, Copyright Oxford University Press, New York.
- Buckman H. C., Brady N. C., 1971, *Gleba i jej właściwości*, przekład z ang. pod red. Dobrzańskiego B., Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- Cierniewski J., 2001, *Model kierunkowego odbicia spektralnego gleb uprawnych uwzględniający obecność agregatów glebowych oraz mikroreliefu powierzchni gleby*. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań.
- Chavez P.C., Bauer B., 1982, *An automatic Optimum Kernel size Selection Techniques for Thematic Mapper*, Remote Sensing Environmental, 12, 23-38.
- Congalton R. G., 1991, *A review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely sensed Data*, Remote Sensing Environment, 37, 35-46.

- Congalton R. G., Green K., 1999, *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*, Lewis publishers.
- Čuj oblusu, *encyklopedija*, 1994, Kyrgyzpoligrafkombinat, Biškeek, Kyrgyzstan (in Kyrgyz).
- Dejč G.S., 1973, *Agroklimatičeskie resursy rajonov respublikanskogo podčinenija, Issyk-Kulskoj i Narynskoj oblastej Kirg SSR.*, L., Gidrometeoizdat, 240 (in Russian).
- Dobrzański B., Zawadzki S., 1995, *Gleboznawstwo*, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- Drzymała S., Maszner P., Michałek K., Mocek A., 1980, *Ćwiczenia z gleboznawstwa*, pod red. Dzieciolowskiego W., Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Poznaniu, Poznań.
- Dukhovny V.A., 1985, *Irrigation farming in Central Asia and it's effectiveness*, Proceeding of the 10th Session of the Committee of National Resources. United Nations, New York. National Resources /Water Series, 59, 391.
- Dwivedi R.S., 1996, *Monitoring of salt-affected soils of the Indo-Gangetic alluvial plains using principal component analysis*, International Journal of Remote Sensing, 17, 10, 1907–1914.
- Dwivedi R. S., Ramana K.V., Thammapa S.S., Singh A. N., 2001, *The Utility of IRS-1C LISS-III and PAN-Merged Data for Mapping Salt-Affected Soils*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 67, 10, 2051–2058.
- Dwivedi R. S., Rao R.M., 1992, *The selection of the best possible Landsat TM band combination for delineating salt-affected soils*, International Journal of Remote Sensing, 13, 11, 2051–2058.
- Dwivedi R. S., Sreenivas K., 1998, *Delineation of salt-affected soils and waterlogged areas in the Indo-Gangetic plains using IRS-1C LISS-III data*, International Journal of Remote Sensing, 19, 14, 2739–2751.
- Dwivedi R. S., Sreenivas K., Ramana K.V., 1999, *Inventory of salt-affected soils and waterlogged areas: remote sensing approach*, International Journal of Remote Sensing, 20, 8, 1589–1599.
- Dzieciolowski W., 1980, *Skrypty akademii rolniczej w Poznaniu*. Poznań.
- Egorova W. W., Bazylevič N. I., 1973, *Karta tipov zasolenija počv SSSR 1:2 500 000*, Nauka, Moskva (in Russian).
- Erda Field Guide *Przewodnik geoinformacyjny*, 1998, GEOSYSTEMS Polska, Warszawa (przekład z jęz. ang. J. Domański i in.).
- Evans F.H., Caccetta P.A., Ferdowsian R., Kiiveri H.T., Campbell N.A., 1995, *Predicting salinity in the Upper Kent River Catchment*, A report from the LWRRDC project, CSIRO Devision of Mathematics & Statistics, Department of Agriculture Western Australia.
- FAO, 1988, *Soil Map of the World. Revised Legend*, Reprinted with corrects, World Soil Resources Report 60, FAO, Rome.
- Gedrojc K.K., 1968, *Kolloidal'naja chimija v voprosach počvo-vedenija*. Izbr. Naučnych Trudov, Moskva, 50–107 (in Russian).
- Getting Started Geospatial Analysis*, 2003, Microimages, Inc. Lincoln, Nebraska, 1, 2.
- Ghassemi F., Jakeman A. J., Nix H. A., 1995, *Salinisation of land and water resources: human causes extent management and case studies*, Canberra Australia, The Australian National University Wallingford Oxon UK, CAB International.
- Goossens R., Van Ranst E., 1998, *The use of remote sensing to map gypsiferous soils in the Ismailia Province (Egypt)*, Geoderma, 87, 47–56.
- Instrukcja obsługi wodoszczelnego pH / konduktometru / solomierza CPC-401*, 2002, Elmetron, Warszawa.
- Instrukcja po učetu zasolonych počv*, 1968, Ministerstvo Melioracii i Vodnogo Chozjajstva SSSR. Gosizdat, Moskva (in Russian).
- Instrukcija po melioraciji soloncev i soloncevatych počv*, 1986, Nauka, Moskva (in Russian).
- Jensen J. R., Hodgson M. E., Christensen E., Mackey H. E., Tinney L. R., Sharitz R., 1986, *Remote sensing Inland Wetlands: a Multispectral Approach*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 52(2), 87–100.
- Jensen J. R., 1996, *Introductory Digital Images Processing, A Remote Sensing Perspective*. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey
- Karavanova E. I., 1999, *Spectral reflectance as a Tool to Study Soils in semi-arid region*, 10th Int. Conservation Org. Meeting at Purdue University and the USDA-ARS Soil Erosion Research Laboratory.
- Keys to Soil Taxonomy*, 2003, United States Department of Agriculture, 9.
- Koniecka-Betley K., 1968, *Zagadnienie żelaza w procesie glebotwórczym*, Rocz. Glebozn. t. 19, 1, Warszawa.
- Kovda B. A., Egorov B. B., Muratova B. S., Stroganov B. P., 1960, *Klassifikacija počv po stepeni i kačestvu zasolenija w svjazi s soleustojčivost'ju rastenij*, Botaničeskij žurnal, 8, 189–201 (in Russian).
- Kovda B. A., Bolubuev B.P., Dregne X., 1967, *Melioracija zasolennyh počv*, M., Izd-vo Nauka, 30-73 (in Russian).
- Krinickaja R.R., Bobušev T.S., Kadyrkulov M.K., Alamanov S.K., Kulmatov T.N., 1985, *Dinamika landšaftov Čujskoj doliny*, Sbornik naučnych trudov, Fruzne, KGU (in Russian).
- Kurbatov. M.S., 1955, *Soloncevatye počvy Čujskoj doliny i ich ulučenje*, Akademija Nauk Kirgizskoj SSR, Ilim, Frunze (in Russian).
- Lamond R. E., Whitney D. A., 1992, *Management of Saline and Sodic Soils*. Cooperative Extention Service, Manhattan, Kansas.
- Landis J., Koch G., 1977, *The measurement of observer agreement for categorical data*, Biometrics, 33, 159–174.
- Lauer D.T., Waltz F.A., 1983, *Landsat-4 investigation of Thematic Mapper and Multispectral Scanner applications*, Proceedings of the Symposium on Landsat-4 Scientific Characterisation – Early resultes, Greenbelt, Maryland.
- Loyer J.Y., 1998, *A sound reference base for soils (the "referentiel pedologique")*, Insitute National de la Recherche agronomique, Baize D., Paris, France.
- Madani A., 2005, *Soil Salinity Detection and Monitoring Using Landsat Data: A Case Study from Siwa Oasis, Egypt*, GIScience and Remote Sensing, 42, 2, 171–181(11).
- Maksimov E.W., 1964, *Osnovnye zakonomernosti sovremenno-go oledenienija v Kirgizskom Ala-Too*, Sovremennye vopro-

- sy glacialologii i paleogljacialologii, Geografičeskij sbornik XVII, Moskva .
- Mamytov A. M., 1965, *Geografija i klassifikacija počv Azii*, Nauka, Moskva (in Russian).
- Mamytov A. M., 1986, *Klassifikacija, vertikalnaja pojasnost' i provincialnost' počv Kirgizskoj SSR*, Geografija i klassifikacija počv Azii, Nauka, Moskva (in Russian).
- Mamytov A. M., Džumabekov E. J., Mamytova A.A., Čoroev M.J., 1991, *Melioracija i povyšenie plodorodija zasolennyh počv Čujskoj doliny*, Akademia Nauk Respubliki Kyrgyzstan, Ilim, Biškeek (in Russian).
- Mamytov A. M., 1995, *Počvennyye resursy i voprosy zemel'nogo kadastra KR*, 3, 90-91 (in Russian).
- Menenti M., 1984, *Physical Aspects and Determination of Evaporation in Deserts*, Applying Remote Sensing Techniques, ICW Report 10, ICW, Wageningen, The Netherlands.
- Metodičeskie ukazaniya po provedeniju sol'evoj s'ëmki na meliorirovannyh (orošaemyh) zemljach Kirgizskoj SSR, 1983, Kirgizsel'chozchimija, Frunze (in Russian).
- Metternicht G. I., Zink J. A., 1997, *Spatial discrimination of salt- and sodium-affected soil surfaces*, International Journal of Remote Sensing, 18, 12, 2571–2586.
- Metternicht G. I., 2003, *Categorical fuzziness: a comparison between crisp and fuzzy class boundary modeling for mapping salt-affected soils using Landsat TM data and a classification based on anion ratios*, Ecological Modeling 168, 371-389.
- Metternicht G. I., Zink J. A., 2003, *Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints*, Remote sensing of Environmental, 85, 1–20.
- Mohinder S. Mudahar, 1998, *Kyrgyz Republic: strategy for rural growth and poverty alleviation*, The International Bank for Reconstruction and Development / The World bank, Washington D.C., USA.
- Mocek A., Drzymala S., Maszner P., 2000, *Geneza, analiza i klasyfikacja gleb*, Poznań, 350-352.
- Monin S. A., 1957, *Geografija počv s osnovami počvovedenija*, Moskva, 213–226 (in Russian).
- Moreau, 1996, *Application of remote sensing and GIS to the mapping saline/sodic and evaluation of sodification risks in the province of Villarreal*, Central Altiplano, Bolivia. 4th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography.
- Nacional'nyj plan dejstvij po bor'be s opustynivaniem v Kyrgyzskoj Respublike, 2000, Ministerstvo Sel'skogo Chozjajstva i Vodnogo Chozjajstva Kyrgyzskoj Respubliki. Kyrgyzskij Nacional'nyj Centr po realizacii Konvencii OON po bor'be s opustynivaniem (in Russian).
- Nikitina E.W., 1962, *Flora i rastitelnost' pastbišč i senokosov chrebtu Kirgizskogo Ala-Too*, izd. AN. Kirg. SSR, Frunze (in Russian).
- Obšesouznaja instrukcija po počvennym obsledovanijam i stavleniju krupnomasštabnyh kart zemlepol'zovanija, 1973, Ministerstvo Sel'skogo Chozjajstva SSSR. Kolos, Moskva (in Russian).
- Ołędzki J., 1992, *Geograficzne uwarunkowania zróżnicowania obrazu satelitarnego Polski i jego podziału na jednostki fotomorfoliczne*, Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa.
- Orlov D. S., Karavanova E. I., Pankova E. I. (1992). Effect of readily soluble salts on the spectral reflectivity of soils of the serosem zone. *Eurasian Soil Science*, 24(1): 104–118.
- Ormonov U. S., 2002, *Glebovo-melioracyjnoe sostojanie počv ajyl okmotu „Keleček”*, Kyrgyzskaja Agrarnaja Akademia im. K. I. Skrajbina, Biškeek (in Russian).
- Pankova E. I., Golovina N.N., Weneckaja S.D., Panadiadze E.A., 1986, *Opyt ocenki zasolenija počv orošaemyh territorij Srednej Azii po materialam kosmičeskoj s'ëmki*, Počvovedenie, 3, 138–146 (in Russian).
- Pankova E.I., Ruchovič D.I., 1999, *Distancionnyj monitoring zasolenija orošaemyh počv aridnyh territorij*, Počvovedenie, 2, 253–263 (in Russian).
- Racinowski R., Szczypek T., 1980, *Prezentacja i interpretacja wyników badań uziarnienia osadów czwartorzędnych*, Katowice, 359.
- Rao B., Sankar T., Dwivedi R., Thammappa S., Venkataratnam L., Sharma R., Das S., 1995, *Spectral behavior of salt-affected soils*, International Journal of Remote Sensing, 16, 2125–2136.
- Rekomendacii po melioracii soloncevatych počv v Kirgizskoj SSR, 1978, Ministerstvo sel'skogo chozjajstva Kirgizskoj SSR. Frunze (in Russian).
- Rengasamy P., 1998, *Sodic soils*, By Lal R., Blum W.H., Valentine C., Stewart B.A. Methods for assessment of soil degradation (Advances in Soil Science). CRC Press LLC.
- Revised standard soil color charts, 1995, Eijelkamp Agrisearch equipment, Giesbeek, The Netherlands.
- Richards, 1954, *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*, USDA/Agric. Handbook, 60, 160.
- Rjazancev Z. A., 1965, *Klimat Kirgizskoi SSR*, Ilim, Frunze (in Russian).
- Rosenfield G.H. and Fitzpatrick-Lins K., 1986, *A Coefficient of Agreement as a Measure of Thematic Classification Accuracy*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 52(2), 223–227.
- Rowell D. L., 1997, *Soil Science Methods & Applications*, Edinburgh, England.
- Singh A. N., Dwivedi R. S., 1989, *Delineation of salt-affected soils through digital analysis of Landsat MSS data*, International Journal of Remote Sensing, 10, 1, 83-92.
- Soil Survey Staff, 1975, *Soil Taxonomy*, Handbook, U.S. Department of Agriculture, Washington D.C., 436.
- Soliman A.S., 2004, *Detecting salinity in early stages using electromagnetic survey and multivariate geostatistical techniques: a case study Nong Sung district (Thailand)*, ITC, Enschede, Netherland. PhD thesis.
- Sreenivas K., Venkataratnam L., Rao P. V. N., 1995, *Dielectric properties of salt-affected soils*, International Journal of Remote Sensing, 16, 14, 641-649.
- Srivastava A., Tripathi N., Gokhale K., 1997, *Mapping groundwater salinity using IRS-1B LISS II data and GIS techniques*, International Journal of Remote Sensing, 18, 13: 2853–2862.
- Systematyka gleb Polski, 1989, Roczn. Glebozn., 40, 3/4.
- Star J., Estes J., 1990, *Geographic Information Systems: An Introduction*, Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.
- Szabolcs I. 1989, *Salt-affected soils*, CRC Press, Florida.

- Wiliams B.P., 1949, *Počvovedenie. Zemledelie s osnovami počvovedenija*, Moskva, 6, 471 (in Russian).
- White R. E., 1997, *Principles and Practice of Soil Science (The Soil as a Natural Resource)*, 3rd ed., Australia, 185–191.
- Zemel'no-vodnyje resursy, gidrologičeskaja charakterystyka rek i pasporta vodozabornych uzlov orositel'nych sistem Čujskoj doliny*, 1990, Ministerstvo melioracii i vodnogo chozjajstva Kirgiskoj SSR, Frunze, čast'-1 (in Russian).



Dr Gulzat Kokoeva rozpoczęła studia na Wydziale Geografii i Ochrony Środowiska w Kirgiskim Narodowym Uniwersytecie im. Dż. Bałasagyna, następnie specjalizowała się na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, na Wydziale Nauk Geograficznych i Geologicznych. Pracę magisterską i doktorską wykonała pod kierownictwem prof. dr hab. inż. Jerzego Cierniewskiego w Zakładzie Gleboznawstwa i Teledetekcji Gleb. W chwili obecnej uczestniczy w projekcie finansowanym przez Szwajcarski Konsorcjum i Uniwersytet Wisconsin. Jej zainteresowania naukowe dotyczą zastosowania metod teledetekcji w identyfikacji gleb słonych oraz w szacowaniu ryzyka zagrożenia związanego z osuwiskami ziemnymi. E-mail: kgulzat@gmail.com