

КАТАСТРОФА КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА: свідчать супутникові знімки

КАКHOVKA RESERVOIR DISASTER: satellite imagery evidence

*За загальною редакцією
члена-кореспондента НАН України
М. Попова*

Київ, 2024



Катастрофа Каховського водосховища: свідчать супутникові знімки / Kakhovka reservoir disaster: satellite imagery evidence. За заг. ред. члена-кореспондента НАН України М. Попова. – Київ: ТОВ «Українська Картографічна Група», 2024. – 92 с.
ISBN 978-617-7447-67-1

Автори:

М.О. Попов, д-р техн. наук, проф., член-кореспондент НАН України (задум, наукове редагування, розділ 2, передмова, висновки); Л.П. Ліщенко, канд. техн. н. (розділи 1, 3, висновки); В.Є. Філіпович, канд. геол. н., с. н. с. (розділ 2); М.С. Лубський, канд. техн. н. (розділи 2-4); А.О. Козлова, канд. техн. н., ст. досл-к (розділ 2); І.О. Пестова, канд. техн. н., ст. досл-к (розділи 2, 3); О.В. Томченко, канд. техн. н. (розділи 2, 3); А.В. Хижняк, канд. техн. н., ст. досл-к (розділ 2); О.В. Титаренко, канд. техн. н., с. н. с. (розділ 2); А.А. Андреев, д-р філософії (розділ 2)

У роботі в систематизованому вигляді містяться результати дистанційного вивчення Каховської катастрофи з аналізом її наслідків на основі матеріалів оптичної і радарної супутникової зйомки з космічних апаратів Sentinel, Landsat, MODIS. Надається об'єктивна і достатньо повна картина Каховської трагедії та її наслідків. Виклад супроводжується понад 50-ма супутниковими знімками та інформаційними продуктами на їх основі, а також картами.

Для екологів, геологів, географів та інших фахівців, діяльність яких пов'язана із захистом довкілля, вивченням регіональних змін у навколишньому середовищі та оцінюванням їх наслідків.

The work contains in a systematized form the results of a remote study of the Kakhovka disaster with an analysis of its consequences based on the materials of optical and radar satellite imaging from Sentinel, Landsat, and MODIS spacecraft. An objective and complete picture of the Kakhovka tragedy and its consequences is provided. Material is accompanied by more than 50 satellite images, information products based on them, and maps.

The book will be useful for ecologists, geologists, geographers, and other specialists whose activities involve environmental protection, the study of regional environmental changes, and the assessment of their consequences.

Рецензенти:

В.І. Осадчий, доктор географічних наук, професор, академік НАН України;
Л.В. Підгородецька, кандидат технічних наук, старший дослідник

Рекомендовано до друку Вченою радою Державної установи “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геобологічних наук Національної академії наук України”, протокол № 4 від 16.04.2024 р.



ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА

РОЗДІЛ 1. ІСТОРИКО-ГЕОЕКОЛОГІЧНИЙ ОПИС РЕГІОНУ

РОЗДІЛ 2. НАСЛІДКИ РУЙНУВАННЯ КАХОВСЬКОЇ ГЕС: ЗА ДАНИМИ КОСМІЧНОЇ ЗЙОМКИ

2.1. Підрив дамби Каховської ГЕС: хронологія подій

2.2. Оперативний супутниковий моніторинг затоплення у оптичному діапазоні електромагнітного спектру

2.3. Оцінка наслідків затоплення населених пунктів та інфраструктури внаслідок руйнування Каховської ГЕС

2.4. Вплив затоплення на природоохоронні території нижнього Дніпра

2.5. Моніторинг змін якісного стану вод Дніпровсько-Бузького лиману та акваторії Чорного моря внаслідок катастрофічного спуску Каховського водосховища

2.6. Стан сільськогосподарських угідь у межах областей, що зазнають впливу наслідків руйнування Каховської ГЕС

РОЗДІЛ 3. ОСУШЕННЯ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА ВНАСЛІДОК ПІДРИВУ ДАМБИ: ЗА ДАНИМИ КОСМІЧНОЇ ЗЙОМКИ

3.1. Методика оцінювання динаміки осушення Каховського водосховища

3.2. Оптичні зображення водосховища у період обміління

3.3. Класифікація даних оптичного знімання

3.4. Дослідження динаміки індексу NDVI у межах Каховського водосховища

3.5. Загальна оцінка динаміки осушення Каховського водосховища

3.6. Дослідження динаміки температурного поля дна Каховського водосховища

РОЗДІЛ 4. ПРОГНОЗ РОЗВИТКУ БІОФІЗИЧНИХ ТА ГЕОЕКОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ УНАСЛІДОК ОСУШЕННЯ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА: “ЗА” І “ПРОТИ” ВІДНОВЛЕННЯ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

ВИСНОВКИ

ЛІТЕРАТУРА

CONTENTS

PREFACE

CHAPTER 1. HISTORICAL AND GEOECOLOGICAL DESCRIPTION OF THE REGION

CHAPTER 2. CONSEQUENCES OF THE KAKHOVKA DAM DESTRUCTION: ACCORDING TO SPACE SURVEY DATA

2.1. Undermining of the Kakhovka Dam: chronology of events

2.2. Operational satellite monitoring of flooding in the electromagnetic spectrum optical range

2.3. Assessment of the flooding consequences on settlements and infrastructure caused by the Kakhovka Dam destruction

2.4. The impact of flooding on protected areas of the lower Dnipro

2.5. Monitoring the qualitative state changes of waters in the Dnipro-Bug Estuary and the Black Sea basin due to the catastrophic discharge event from the Kakhovka Reservoir

2.6. Land use changes within the regions affected by the consequences of the Kakhovka Dam destruction

CHAPTER 3. KAKHOVKA RESERVOIR DRAINAGE AS A RESULT OF THE DAM UNDERMINING: ACCORDING TO SPACE SURVEY DATA

3.1. Methodology for assessing the Kakhovka Reservoir drainage dynamics

3.2. Optical data of the Kakhovka Reservoir during shallowing

3.3. Optical imagery data classification

3.4. Research of NDVI dynamic within the Kakhovka Reservoir

3.5. Overall Kakhovka Reservoir drainage dynamics assessment

3.6. Temperature field dynamics research of the Kakhovka Reservoir bottom

CHAPTER 4. BIOPHYSICAL AND GEOECOLOGICAL DEVELOPMENT FORECAST AS A RESULT OF THE KAKHOVKA RESERVOIR DRAINAGE: ADVANTAGES AND DISADVANTAGES KAKHOVKA RESERVOIR RESTORATION

CONCLUSIONS

REFERENCES



ПЕРЕДМОВА

Уночі, 6 червня 2023 р., російськими окупаційними військами здійснено підлив Каховської гідроелектростанції (ГЕС). Зруйновано греблю, перестало існувати водосховище завдовжки 240 км, що охоплювало площу понад 2 000 км² на території трьох областей – Запорізької, Дніпропетровської та Херсонської.

Екстрене скидання води унаслідок руйнування греблі призвело до людських жертв, завдало надзвичайної шкоди економіці країни та екології прилеглих регіонів. У зоні лиха опинилося близько 16 000 людей, затоплено понад 80 населених пунктів.

Каховська ГЕС мала важливе значення для водопостачання південної України. Унаслідок її руйнування без джерел води опинилися зрошувальні системи на площі 5 800 км² сільгоспугідь, на яких вирощувалося близько двох мільйонів тонн зерна на рік, плодоовочеві культури тощо.

Електрика, що вироблялася станцією, відігравала порівняно невелику роль в енергетиці України, проте робота Каховської ГЕС регулювала частоту в енергосистемах, згладжуючи піки споживання у Херсонській, Миколаївській та Запорізькій областях.

Ураховуючи масштаби катастрофи та необхідність мінімізації її наслідків, до вивчення ситуації та її проблем відразу активно підключилися відповідні вітчизняні відомства і установи. Зокрема, в НАН України була сформована робоча група з аналізу наслідків руйнування греблі Каховської ГЕС, до складу якої увійшли науковці з різних спеціальностей – гідрологи, гідрометеорологи, екологи, екогідрологи, економісти, спеціалісти з енергетики, математичного моделювання ситуацій тощо.

PREFACE

On the night of June 6, 2023, the Kakhovka dam was blown up by the Russian occupying forces. The dam was destroyed, and the reservoir, which had a length of 240 km and covered an area of more than 2,000 km² of the territory of three regions – Zaporizhzhya, Dnipropetrovsk, and Kherson, ceased to exist.

The catastrophic release of water due to the dam destruction led to human casualties, causing extreme damage to the economy and the ecology of the surrounding regions. About 16,000 people were in the disaster zone, more than 80 settlements were flooded.

Kakhovka dam was important for the water supply of southern Ukraine. As a result of its destruction, the irrigation systems covered 5,800 km² of agricultural land, on which about two million tons of grain per year, fruit and vegetable crops, etc. were grown, were left without water sources.

The electricity produced by the station played a relatively small role in the energy sector of Ukraine, however, the operation of the Kakhovska dam regulated the frequency in the power systems, smoothing out consumption peaks in the Kherson, Mykolaiv, and Zaporizhzhia regions.

Taking into account the scale of the disaster and the need to minimize its consequences, relevant domestic departments and institutions immediately joined the study of the situation and its problems. In particular, the National Academy of Sciences of Ukraine formed a Working group on the analysis of the consequences of the destruction of the Kakhovska dam, which included scientists from various specialties – hydrologists, hydrometeorologists, ecologists, ecohydrologists, economists, specialists in energy, mathematical modeling of situations, etc.



Кількома інститутами НАН України було організовано польові експедиції у район колишнього Каховського водосховища та його заток з метою вивчення біофізичних та геоecологічних процесів, що відбуваються внаслідок осушення Каховського водосховища. У ході експедицій оцінювався стан тамтешньої флори і фауни, надавалися геоботанічні оцінки, відбиралися проби на геохімію ґрунтів і природних вод тощо. Але можливості проведення спостережень та вимірювань in-situ були досить обмеженими, бо довкола водосховища й досі ідуть бої, а Дніпром проходить лінія фронту.

У представленому читачу виданні містяться результати дистанційного вивчення Каховської катастрофи з аналізом її наслідків на основі даних супутникової зйомки.

Базовий матеріал структурований у 4 розділи. Розділ 1 містить історико-геоecологічний опис південного регіону України. Стисло розглядаються історія заселення і освоєння території Придніпров'я, обставини побудови гідроелектростанції на р. Дніпро у районі м. Каховка і створення водосховища. Описується геологічна будова території долини Дніпра.

У розділі 2 представлена хронологія подій з терористичного руйнування Каховської ГЕС російськими військами, продемонстровано наслідки затоплення населених пунктів та інфраструктури, надано оцінки впливу затоплення на природоохоронні території нижнього Дніпра, стан вод Дніпровсько-Бузького лиману та акваторії Чорного моря. Також показано стан сільськогосподарських угідь у межах областей, що постраждали від затоплення.

Розділ 3 присвячений питанням динаміки осушення Каховського водосховища внаслідок підриву дамби. Описана методика оцінювання за даними космічної зйомки динаміки важливих фізичних параметрів, що характеризують процес осушення водосховища, а саме – температури і вегетаційного індексу.

У розділі 4 обговорюються альтернативні варіанти можливого майбутнього Каховської ГЕС. Наводяться як позитивні, так і негативні наслідки відновлення гідроелектростанції і водосховища.

Despite the ongoing battles and the front line running through the Dnipro, several institutes of the National Academy of Sciences of Ukraine undertook field expeditions to the area of the former Kakhovsky Reservoir and its inlet. These expeditions were aimed at studying the biophysical and geoecological processes resulting from the drainage of the Kakhovsky Reservoir. The condition of the local flora and fauna was assessed, geobotanical assessments were provided, and samples were taken for the geochemistry of soils and natural waters, among other things.

The publication presented to the reader is a significant contribution to the understanding of the Kakhovka disaster. It contains the results of a unique remote study, conducted using satellite survey data, which provides a comprehensive analysis of the disaster's consequences.

The primary material is structured in 4 sections. Chapter 1 contains a historical and geoecological description of the southern region of Ukraine. The history of settlement and development of the territory of the Dnipro region is briefly considered. The circumstances of constructing a hydroelectric power station on the Dnipro River in the area of the city of Kakhovka and creating a reservoir are considered. The geological structure of the territory of the Dnipro valley is described.

Chapter 2 presents the chronology of events from the terrorist destruction of the Kakhovka dam by Russian troops. It demonstrates the consequences of the flooding of settlements and infrastructure and provides estimates of the impact of flooding on the nature conservation areas of the lower Dnipro, the state of the waters of the Dnipro-Buzka estuary, and the Black Sea. Also shown is the state of agricultural land within the flood-affected regions.

Chapter 3 is devoted to issues of the dynamics of drainage of the Kakhovsky reservoir after the dam's detonation. The method of evaluating the dynamics of main physical parameters characterizing the reservoir's drainage process, namely temperature and vegetation index, is described based on data from space surveys.

Chapter 4 discusses alternative options for the possible future of the Kakhovska dam. Both the positive and negative consequences of restoring the hydroelectric power plant and reservoir are given.



Історія заселення і освоєння території Нижнього Придніпров'я має не одне тисячоліття. Людські поселення тут виникали вздовж долини Дніпра та його притоків ще з часів неоліту. Донині у місцях, зручних для переправи з правого на лівий берег Дніпра, серед плавнів, що розкинулися від о. Хортиця (Запоріжжя) до Таванського острова (біля міста Берислав), є сліди існування таких поселень (рис. 1.1). Сприятливі природні умови і зручне місце розташування на перетині торгових шляхів стали на користь заселення регіону. Ця територія сприймається істориками як зона “Великого Кордону” (географічного і соціального) [1].

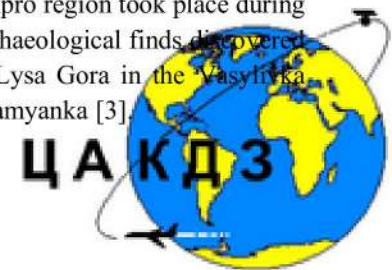
З прадавніх часів нам лишилися історичні назви цієї місцевості – Дике поле, Сухий Степ, Царина (незайманий степ), Великий Луг (заплава і низькі тераси Дніпра). Так, на лівому березі Дніпра, навпроти сучасного Нікополя міститься Кам'янське Городище, яке вчені визнають за адміністративний, торговий, ремісничий центр скіфської держави IV – III ст. до н. е., а також поселенням скіфів біля сіл Капулівка і Покровське [2]. Уздовж берегів Дніпра знаходиться одне з найбільших зосереджень скіфських поховальних пам'яток V–III ст. до н. е. Найвідомішими та визначними курганами Степової Скіфії є Чортотлик, Товста Могила, Соболева, Бабина, Довга, Александрополь, Солоха, Огуз тощо, що відкрили нам унікальні знахідки тієї доби. Загалом уздовж берегів Дніпра нині налічується близько тисячі курганів. На думку багатьох дослідників, саме тут локалізується скіфський Герос – місце поховання скіфських царів, що яскраво описане давньогрецьким істориком Геродотом.

З кінця IV ст. до н. е. Велика Скіфія занепадає і стає ареною, де почергово змінюються племена – сарматські, черняхівські, анти, алани, печеніги, половці. Активне освоєння людиною широких просторів Придніпров'я відбувається протягом неоліту – бронзової доби, про що свідчать багаточисельні археологічні знахідки, відкриті на берегах Білозерського лиману, в урочищі Лиса Гора у с. Василівка, на Мамай-горі – височині біля с. Велика Знам'янка [3].

The settlement and development of the territory of Lower Dnipro have been going on for more than one millennium. Human settlements appeared along the Dnipro valley and its tributaries since Neolithic times. To this day, traces of the existence of such settlements are found in places convenient for crossing from the right bank to the left bank of the Dnipro, among the shoals stretching from the island of Khortytsia (Zaporizhia) to the island of Tavan (near the village of Berislav) (Fig. 1.1). Favorable natural conditions and a convenient location at the intersection of trade routes favoured the settlement of the region. Historians perceive this territory as a zone of the Great Border (geographical and social) [1].

From ancient times, we have historical names left – Dyke Pole, Dry Steppe, Tsarina (pristine steppe), and Velikiy Lug of Grand Meadow (floodplain and low terraces of the Dnipro). So, on the left bank of the Dnipro, across from modern Nikopol, there is Kamianske Gorodishche, which scientists recognize as the administrative, trade, and craft centre of the Scythian state of the 4th – 3rd centuries B.C., as well as Scythian settlements near the villages of Kapulivka and Pokrovske [2]. Along the banks of the Dnipro is one of the largest concentrations of Scythian burial monuments of the 5th - 3rd centuries B.C. The most famous and significant burial mounds of Steppe Scythia are Chortomlyk, Tovsta Mohyla, Soboleva, Babina, Dovga, Alexandropol, Solokha, Oguz and others, which revealed to us unique finds of that era. In general, there are now about a thousand barrows along the banks of the Dnipro. According to many researchers, it is here that the Scythian Heros is located - the burial place of the Scythian kings, which was vividly described by the ancient Greek historian Herodotus.

Great Scythia declined and became an arena where the Sarmatian, Chernyakhiv, Anti, Alan, Pecheneg, and Polovtsy tribes changed from the end of the 4th century B.C. Active human development of the vast expanses of the Dnipro region took place during the Neolithic - Bronze Age, as evidenced by numerous archaeological finds discovered on the shores of the Bilozersky estuary, in the tract of Lysa Gora in the Vasylivka village, on Mamai Gora - a hill near the village. Velika Znamyanka [3].



З X ст. н. е. економічна та політична значущість Придніпров'я завдяки своєму географічному положенню зростає. У період становлення і розвитку Київської Русі ця територія стала важливим етапом слов'янської колонізації на південь до Чорного моря. Нижнім Придніпров'ям пролягають знамениті торгові шляхи “із варяг у греки”, Чумацький, Муравський, Чорний шляхи. З кінця XV ст. нижче Дніпровських порогів від р. Самари та о. Хортиці та на берегах р. Базавлук, Кам'янки, Томаківки, дніпровських островах у плавнях Великого Лугу зводяться козацькі укріплення – “засіки”, “Січі” (рис. 1.2).

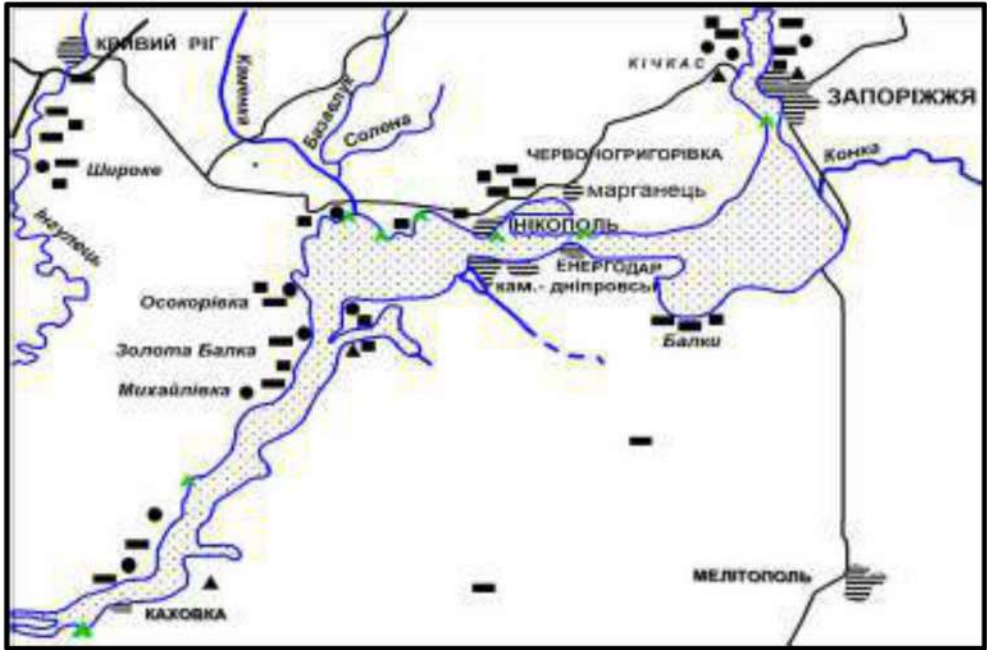


Рис. 1.1. Археологічні культури і пам'ятники Нижнього Придніпров'я

From the 10th century AD, the economic and political weight of Dnipro, due to its geographical position, has grown. During the formation and development of Kyivan Rus, this territory became a critical stage of Slavic colonization south of the Black Sea. The famous trade routes “from the Varangians to the Greeks”, the Chumatsky, Muravsky, and Black routes, pass through this territory. From the end of the 15th century, below the Dnipro Rapids from the Samara River and Khortytsia Island and on the banks of the Bazavluk, Kamianka, and Tomakivka rivers, along the Dnipro islands in the floodplains of the Veliky Lug, Cossack fortifications – “zasiks” and “Sichs” were erected (Fig. 1.2).

●	археологічні культури другої половини IV і початку III тис. до н.е	archaeological cultures of the second half of the IV and the beginning of the III millennium B.C.
▲	основні неолітичні пам'ятки середини другої половини III тис. до н.е.	main Neolithic monuments of the middle of the second half of the III rd millennium B.C.
■	основні пам'ятки пізнього неоліту (кінець III – початок II тис. до н.е.)	main sights of the late Neolithic (end of the III rd – beginning of the II nd millennium B.C.)
■	культури і групи пам'яток раннього періоду епохи бронзи	cultures and groups of monuments of the early period of the Bronze Age
Λ	розташування Запорозьких Січей (XVI – XVIII ст.)	location of Zaporozhye Siche (XVI – XVIII ct.)

Fig. 1.1. Archaeological cultures and monuments of the Lower Dnipro region





Рис. 1.2. Картосхема “Великий Луг Запорозький” / за В.А. Чабаненком, 2006

Fig. 1.2. “Great Zaporizhzhya Meadow” map-scheme / by V.A. Chabanchenko, 2006



Запорозька Січ – це суспільно-політична та військово-адміністративна організація українського козацтва. Вздовж долини Дніпра у різні періоди розміщувалися такі Запорозькі Січі – Хортицька, Томаківська, Базавлуцька, Микитинська, Чортомлицька, Кам'янська, Олешківська, Нова Січ, які протягом двох століть вносили істотні антропогенні зміни у ландшафтогенез цієї території (укріплення, вали, вирубка байрачних та заплавлених лісів, заміщення біоценозів). Існування Запорозьких Січей та Козацтва на землях Придніпров'я стали яскравою сторінкою для становлення і освоєння цієї території в XVI – XVIII ст. Межі козацьких вольностей, природу, побут, соціальні відносини найкраще описав український учений-історик, етнограф, академік Дмитро Яворницький у трьох томах “Історії запорозьких козаків” та “Запорожжє в остатках старини и преданиях народа”, що були надруковані у 1892 – 1899 рр. [4, 5]. У роботах Дмитра Яворницького, Апполона Скальковського, Івана Кареліна, Адріана Кашченка, Віктора Чабаненка описана природа XVIII ст. цього краю. Ними підмічена постійна природна перебудова морфології гідрографічної мережі та переформування островів у межах долини Дніпра – зміщення русла, рукавів, проток, розмив берегів [6 – 8].

З середини XVIII ст. значно зростають темпи мирного “освоєння” Степу (забудова, розорювання тощо) і закладається новий тип господарського лісовідновлення (парки, сади, лісопосадки), водорегулювання (ставки, загати, водовідведення). А вже у XIX ст. відбувається широкомасштабне освоєння території Нижнього Придніпров'я, а саме – освоєння цілинних степових просторів, спочатку поміщиками для тваринництва (вівчарство), а потім і для рільництва. Наприкінці XIX ст. відбувається промислове освоєння Нікопольського марганцеворудного басейну, Криворізького залізрудного басейну, що дало потужний поштовх індустріальному розвитку території Нижнього Придніпров'я. Ця територія перебуває у зоні впливу гірничодобувних підприємств, промислових і енергетичних об'єктів Запоріжжя, Нікополя, Енергодару, Покрову, Марганцю, а також пов'язана з можливістю періодичного впливу Запорізької промислової та міської агломерації і Криворізького територіального промислового комплексу.

Ідеї та проекти щодо захисних лісонасаджень, зрошення і використання дніпровської води у посушливих районах зародилися ще в XIX ст. Неприятливі кліматичні умови степових та лісостепових районів України, що набули поспіль системного характеру, різко знижували врожайність зернових та інших сільськогосподарських культур, завдаючи великих збитків сільському господарству.

Zaporizhzhya Sich is a socio-political and military-administrative organization of the Ukrainian Cossacks. The following Zaporizhzhya Siches were located along the Dnipro valley at various times: Khortytska, Tomakivska, Bazavlutska, Mykitynska, Chortomlytska, Kamianska, Oleshkivska, Nova Sich, which during two centuries made significant anthropogenic changes in the landscape genesis of this territory (fortifications, ramparts, felling of floodplain forests, replacement of biocenoses). The existence of the Zaporizhzhya Sich and Cossacks on these lands became a bright page for the formation and development of this territory in the 16 – 18 centuries. The boundaries of Cossack freedoms, nature, life, and social relations were best described by the Ukrainian scholar historian, ethnographer, and academician Dmytro Yavornytskyi in three volumes “History of the Zaporizhzhya Cossacks” and “Zaporizhzhia in the Remains of the Old World and Traditions of the People”, which were published in 1892-1899 years [4, 5]. The nature of the 18th century is described in the works of Dmytro Yavornytskyi, Appolon Skalkovskiyi, Ivan Karelin, Adrian Kashchenko, and Viktor Chabanenko. They noted the constant natural restructuring of the morphology of the hydrographic network and the reshaping of islands within the Dnipro valley – the displacement of the riverbed, branches, channels, and erosion of banks [6 - 8].

From the middle of the 18th century, the pace of peaceful “development” of the steppe (building, ploughing) increased significantly, and a new type of economic reforestation (parks, gardens, plantations) and water regulation (ponds, dams, drainage) was established. Already in the 19th century, large-scale development of the territory of the Lower Dnipro region took place, namely, the development of virgin steppe spaces, first by landowners for animal husbandry (sheep breeding) and then for agriculture. The end of the 19th century saw the industrial development of the Nikopol manganese ore basin and the Kryvorizka iron ore basin, which gave a powerful impetus to the industrial development of the Lower Dnipro region. This territory is in the zone of influence of mining enterprises and industrial and energy facilities of Zaporizhzhia, Nikopol, Energodar, Pokrov, and Margants. It is also connected with the possibility of periodic influence of the Zaporizhzhia industrial and urban agglomeration and the Kryvyi Rih territorial industrial complex.

Ideas and projects regarding protective afforestation, irrigation and use of Dnipro water in arid areas originated in the 19th century. Unfavourable climatic conditions in Ukraine's steppe and forest-steppe regions, which became systemic, sharply reduced the yield of grain and other crops, causing significant damage to agriculture.



Особливо гостро негативний вплив природних чинників проявився у повоєнний період, коли Україна витримала важку посуху 1946 р. і неврожай, що в поєднанні з політичними чинниками спричинило голод. Новобудови, що пов'язані з докорінною зміною гідролого-кліматичного стану степової частини півдня України, закладено у реалізацію “Великого сталінського плану перетворення природи” у 50-х роках минулого сторіччя, що реалізовувалися в наступний період [9].

Постановою Кабінету Міністрів СРСР від 20.09 1950 р. зобов'язано:

1. Здійснити побудову зрошувальної системи для зрошення 1,5 млн га і обводнення понад це 1,7 млн га земель у південних районах України (Херсонська, Миколаївська, Запорізька і Дніпропетровська області) та у північних районах Криму і створити нову гідроенергетичну базу на р. Дніпро для постачання електроенергії для потреб сільського господарства та промисловості.

2. У вказаних областях побудувати: гідроелектростанцію на р. Дніпро у районі м. Каховка встановленої потужності у 250 тис. кВт з виробленням електроенергії 1,2 млрд кВт / годин у середній щодо водності рік, греблю, судохідний шлях, велике водосховище ємністю 14 млрд м³ (є дані про 18,2 м³).

3. Передбачити у районах зрошуваного землеробства, крім традиційних зернових, розвиток посівів бавовнику.

З часом усе помітнішими стають негативні наслідки такої діяльності, передусім згубний вплив на довкілля гігантських об'єктів, яким особливо стало спорудження у 1952 – 1958 рр. Каховського водосховища. Однак уже з 1956 р., як зазначено у документах радянського уряду, “...зважаючи на несталість врожайів у неполивних умовах, бавовносіяння було припинено”. Хоча уже були побудовані олійно-екстрактні заводи у Херсоні і Мелітополі та Херсонський бавовняний комбінат.

Водосховище стало джерелом живлення трьох великих магістральних каналів – Північнокримського, Краснознам'янського та Криворізького із розгалуженими системами зрошення (Північно-Рогачинська та ін.). Долина Дніпра перетворилася у регульовану гідротехнічну систему, найбільшу у Європі за кількістю водосховищ і площею водної поверхні та найбільшим на той час “штучним морем” – Каховським.

Основними морфометричними характеристиками Каховського водосховища були: площа водозбору – 475000 км², площа водоймища – 2160 км², середня глибина – 8,4 м, максимальна глибина – 24 м, довжина – 230 км, середня ширина – 9,3 км, максимальна ширина – 24 км, об'єм водосховища – 18,2 км³ води. Для середнього щодо водності року коефіцієнт умовного водообміну, що характеризує проточність водосховища, становили 2,69 м, для багатоводного – 4,77, а висота греблі – 30 м [10].

The negative impact of natural factors was particularly acute in the post-war period, when Ukraine endured a severe drought in 1946 and a crop failure, which, combined with political factors, caused famine. New constructions related to the fundamental change in the hydrological and climatic condition of the steppe part of southern Ukraine were laid within the framework of implementing the “Great Stalinist Plan for the Transformation of Nature” in the 1950s. They were implemented in the following period [9].

The resolution of the Cabinet of Ministers of the USSR dated September 20, 1950, obliged:

1. Build an irrigation system to irrigate 1.5 million hectares and irrigate more than 1.7 million hectares of land in the southern regions of Ukraine (Kherson, Mykolaiv, Zaporizhzhya, and Dnipropetrovsk regions) and in the northern regions of Crimea and create a new hydropower base on to the Dnipro River to supply agriculture and industry with electricity.

2. In the specified areas, build a hydroelectric power station on the Dnipro River in the area of Kakhovka with an installed capacity of 250,000 kW with an electricity generation of 1.2 billion kWh in an average water year, a dam, a navigable lock, a large reservoir with a capacity of 14 billion m³ (there are data on 18.2 m³).

3. Provide for the development of cotton crops in the areas of irrigated agriculture, in addition to traditional cereals.

Over time, such activities' negative consequences become more noticeable. First of all, the harmful impact on the environment of giant objects was especially prominent during the construction of the Kakhovka Reservoir in 1952 – 1958. However, as early as 1956, as stated in government documents, “... due to the instability of crops in non-irrigated conditions, cotton sowing was stopped.”, although oil-extract factories in Kherson and Melitopol and the Kherson Cotton Plant had already been built.

The reservoir became a power source for three large main canals – North Crimean, Krasnoznameniansky and Kryvorizky – and has extensive irrigation systems (Northern Rogachynsk, etc.). The Dnipro Valley became a regulated hydro-technical system, the largest in Europe in terms of reservoirs and water surface area, and the most significant “artificial sea” at that time – the Kakhovka Sea.

The main morphometric characteristics of the Kakhovka reservoir were: catchment area – 475,000 km², reservoir area – 2160 km², average depth – 8.4 m, maximum depth – 24 m, length – 230 km, average width – 9.3 km, maximum width – 24 km, the volume of the reservoir is 18.2 km³ of water. For the average water level of the year, the coefficient of conditional water exchange, which characterizes the flow rate of the reservoir, was equal to 2.69; for a multi-water reservoir - 4.77, the height of the dam - 30 m [10].



Унаслідок спорудження Каховського водосховища було затоплено Великий Луг, який сягав місцями до 24 км завширшки та до 100 км завдовжки. Близько 30 – 40 % цих земель раніше використовувалися у народному господарстві (баштанні культури, городина, сіножаті, пасовища). Частковому або повному виселенню і затопленню підлягало близько 90 сіл і хуторів.

Будівництво дніпровських гідроелектростанцій передбачало виробництво дешевої електроенергії, перевезення річковим транспортом вантажів без перевантаження, акумулювання водних ресурсів та використання їх для зрошення та потреб промисловості і населення, забезпечення водою вододефіцитних районів Криму і Донеччини. Однак на практиці негативні економічні наслідки будівництва дніпровського гідрокаскаду, за даними спеціалістів [9], значно перевищили позитивні.

З часом виявилось багато недоліків і прорахунків, пов'язаних з формуванням водосховища. Застійні явища і слабка проточність у сукупності з величезними, і часто неконтрольованими скидами технічних промислових і комунальних вод у водозбірний басейн Середнього та Нижнього Дніпра призвели до сильного замулення, забруднення донних осадів та цвітіння води, погіршення епідеміологічного стану населених пунктів Придніпров'я.

Окрім затоплення великих площ родючих земель під водами Каховського водосховища, значні території опинилися у зоні підтоплення. Відбулася деградація малих річок та водотоків у яружно-балковій мережі, стік з яких став зарегульовуватися греблями. Формування водосховища порушило динамічну рівновагу й призвело до переформування берегів, підтоплення гирлових частин припливів річок і балок та акумуляції на дні водосховища схилового делювію та небезпечних антропогенно утворених відкладів.

Інтенсивний розвиток промисловості, сільського господарства, урбанізація і розвиток у басейні Дніпра транспортної мережі стали причиною хімічного забруднення вод та накопичення небезпечного осаду на його дні. Так, Каховське водосховище акумулювало найбільший об'єм донного осаду в усьому каскаді водосховищ і він є найбільш забрудненим [11]. Підвищення урізу води у водосховищі на 3 – 16 м призвело також до різкого і значного підняття відповідних місцевих базисів ерозії. Утворилась нова берегова лінія, більша частина якої зазнала активного руйнування. Після створення рукотворного моря в усі наступні роки доводилося здійснювати масштабні роботи, спрямовані на захист і збереження прибережних земель, проводили берегоукріплення, будувати дамби, насосні станції для перекачки води у новозбудовані канали та води р. Базавлук у водосховище. Підпір водоносних горизонтів спричиняв підтоплення прибережних селищ на Лівобережжі та підтоплення гирлових ділянок річок і балок по усьому периметру водосховища. Також ускладнилась експлуатація марганцевих кар'єрів, унаслідок їх обводнення на Правобережжі водосховища.

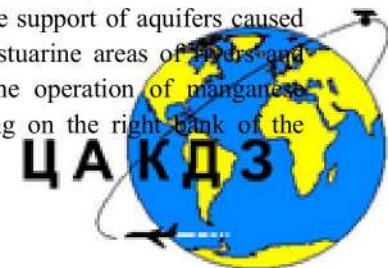
The Velikiy Lug, up to 24 km wide and 100 km long in places, was also flooded. About 30 – 40 % of these lands were previously used in the national economy (garden crops, vegetable gardens, hayfields, pastures). Up to 90 villages and hamlets were subject to partial or complete eviction and flooding.

The construction of the Dnipro hydroelectric power stations provided for the production of cheap electricity, the transportation of goods by river transport without overloading, the accumulation of water resources and their use for irrigation and the needs of industry and the population, providing water to the water-deficient regions of Crimea and Donetsk region. However, in practice, the negative economic consequences of constructing the Dnipro hydrological cascade, according to specialists [9], significantly exceeded the positive ones.

Over time, many shortcomings and miscalculations related to reservoir formation were revealed. Stagnant phenomena and weak flow in combination with massive and often uncontrolled discharges of technical industrial and communal waters into the catchment basin of the Middle and Lower Dnipro have led to severe siltation, pollution of bottom sediments and water bloom, deterioration of the epidemiological condition of settlements in the Dnipro region.

Significant areas were also inundated, as large areas of fertile land were flooded under the waters of the Kakhovka Reservoir. Small rivers and watercourses were degraded in the raft-beam network, the flow of which began to be regulated by dams. The formation of the reservoir disturbed the dynamic equilibrium. It led to the reshaping of the banks, flooding the estuarine parts of the inflows of rivers and streams, and accumulating slope diluvium and dangerous anthropogenically formed sediments at the bottom of the reservoir.

The intensive development of industry, agriculture, urbanization and the transport network in the Dnipro basin have caused chemical pollution of its waters and the accumulation of dangerous sediment at the bottom. Thus, the Kakhovka Reservoir accumulated the most significant volume of bottom sediment in the entire cascade of reservoirs and is the most polluted [11]. The increase in the water level in the reservoir by 3 – 16 m also led to a sharp and significant rise in the corresponding local bases of erosion. A new coastline was actively destroying. After the creation of the artificial sea, large-scale works aimed at protecting and preserving coastal lands had to be carried out in subsequent years. Coastal fortifications were carried out, dams were built, and pumping stations were built to pump water into the newly constructed canals and water from the Bazavluk River into the reservoir. The support of aquifers caused the flooding of coastal villages on the Left Bank and estuarine areas of rivers and streams along the entire perimeter of the reservoir. The operation of manganese quarries also became more difficult due to their flooding on the right bank of the reservoir.



Екосистеми водних об'єктів у ході експлуатації гідроелектростанції зазнали негативних змін у гідробіологічному режимі, якості води та рибопродуктивності, погіршився епідеміологічний стан населених пунктів Придніпров'я. Зросли витрати на укріплення берегової лінії, розчистки фарватеру водосховища. На погіршення екологічної ситуації значно вплинула гідромеліорація, бо штучний полив чорноземів є для них шкідливим, оскільки ці ґрунти сформувалися в умовах посушливості. Прогнозовані розрахунки визначення швидкості і тривалості підйому ґрунтових вод виявилися хибними під час проєктування меліоративних робіт та не відповідали дійсності [12].

Гребля та водосховище існували упродовж тривалого періоду і виконували свою основну функцію – отримання електроенергії та накопичення води для водопостачання південного регіону України. Але внаслідок військового теракту росіян уночі 6 червня 2023 р. відбулися підриви і руйнування дамби і споруд ГЕС, водосховища, виникло катастрофічне підтоплення території нижче греблі та інтенсивний схід води з чаши водосховища.

Отже, в історичному плані можна виділити певні періоди освоєння цієї території [13], тобто історичні віхи зміни природокористування і зміни природно-соціального стану досліджуваного регіону, а саме – ландшафтну організацію території та виникнення певних антропогенних комплексів:

- 1) незайманий природний ландшафт – 6 – 8 тис. до н. е.;
- 2) початок землеробства; городища, кургани – 4 – 5 тис. до н. е.;
- 3) підсічне землеробство, тваринництво – 9 – 14 ст. н. е.;
- 4) стаціонарні поселення, зимівники, укріплення Січі – XV – XVIII ст.;
- 5) інтенсивне сільськогосподарське освоєння, початок видобутку марганцевих руд – XVIII – XIX ст.;
- 6) освоєння родовища, колективізація та суцільне аграрне використання території – перша половина XX ст.;
- 7) індустріалізація, створення Каховського водосховища, інтенсивний кар'єрний видобуток та збагачення марганцевих руд, металургійна переробка, побудова ЗАЕС та ТЕС – друга половина XX ст.;
- 8) розпаювання, приватний капітал, розширення видобутку марганцю, занепад судноплавства, збільшення енергопотужності, розбудова сонячних електростанцій, рекультивація, боротьба за чисту воду та екологічний стан регіону – період незалежності України.

У 2014 рр. РФ розпочала війну проти України, наслідками якої є, зокрема, підриви Каховської греблі, підтоплення Нижнього Дніпра та гирлової частини, забруднення вод Чорного моря, схід води з чаши ложа водосховища, окупація Лівобережжя, бойові дії, бомбардування та обстріли, руйнування будівель та інфраструктури, зміна рівня поверхневих та підземних вод тощо.

Water bodies' ecosystems during hydroelectric power plants' operation have undergone negative changes in the hydrobiological regime, water quality and fish productivity, and the epidemiological condition of settlements in the Dnipro region has worsened. Costs for strengthening the coastline and clearing the fairway of the reservoir have increased. Hydromelioration significantly affected the deterioration of the ecological situation because artificial irrigation of chernozems is harmful to them since these soils were formed in arid conditions. The forecasted calculations for determining the speed and duration of groundwater rise were wrong even in the design of reclamation works and did not correspond to reality [12].

The Dam and Reservoir existed for 76 years and performed their primary function – obtaining electricity and storing water for the water supply of the southern region of Ukraine. But as a result of a military terrorist attack by the Russians on the night of June 6, 2023, the dam and hydroelectric power plant structures of the reservoir were blown up and destroyed. The area below the dam was flooded, and the water rose intensively from the reservoir basin.

So, in historical terms, it is possible to distinguish specific periods of the development of this territory [13], that is, historical milestones of changes in nature use and the natural and social state of the studied region, namely, the territory landscape organization and the emergence of specific anthropogenic complexes:

- 1) pristine natural landscape – 6 – 8 thousand BC;
- 2) the beginning of agriculture; hillforts, barrows – 4 – 5 thousand BC;
- 3) field farming, animal husbandry – 9 – 14 centuries AC;
- 4) stationary settlements, winter quarters, fortifications – 15 – 18 centuries AC;
- 5) intensive agricultural development, the beginning of manganese ore mining – 18 – 19 centuries;
- 6) field development, collectivization and continuous agricultural use of the territory – the first half of the 20th century;
- 7) industrialization, creation of the Kakhovka Reservoir, intensive open-pit mining and beneficiation of manganese ores, metallurgical processing, construction of ZANP and TPP – the second half of the 20th century;
- 8) de-soldering, private capital, expansion of manganese mining, decline of shipping, increase of energy capacity, development of solar power plants, reclamation, struggle for clean water and ecological condition of the region – the period of independence of Ukraine.

In 2014, the Russian Federation launched an aggressive war against Ukraine, the consequences of which are currently the undermining of the dam, the flooding of the Lower Dnipro and its estuary, the pollution of the Black Sea waters, the rise of water from the reservoir bowl, the occupation of the Left Bank, hostilities, bombings and shelling, the destruction of buildings and infrastructure, changes in surface and underground water levels, etc.



Однак незмінними або мало змінними лишаються макроегеографічні особливості цієї території – геологічна будова, широтна зональність, природні умови. У тектонічному відношенні територія, що була під водами Каховського водосховища, перебуває на межі двох великих геоструктурних елементів – південного схилу Українського кристалічного масиву (щита) та Південноукраїнської монокліналі, що розмежовується субширотною системою розломів (Конкський) та літологічних контактів. Має місце приповерхнєве залягання фундаменту на субширотному відтинку водосховища (тільки до 0,1 км) та різке заглиблення фундаменту на південь у субмеридіональній, більш вузькій ділянці водосховища аж до 1,2 км (у районі Каховської ГЕС) та 2 км у межах гирлової частини Дніпра. За тектонічною картою України (рис. 1.3) [14], територія належить до Середньодніпровського мегаблоку та повністю розташована у межах Запорізького блоку, який має південно-західне простягання. Розломи, що частково підкреслюють цей блок – Дерезуватівський та Малокатеринівський, зіставляються із закладанням долини Дніпра та мають такий же напрям. У межах блоку виділяється складка північно-східного напрямку на осі Нікополь – Велика Знам'янка, де кристалічні породи виходять на поверхню (балка Мала Кам'янка (Новопавлівський кар'єр), р. Базавлук та її притока Кам'янка (Токівський кар'єр)).

На неотектонічному етапі геологічного розвитку північна частина водосховища і прилегла територія характеризувалися диференційованими міоценовими опусканнями і відносно слабкими після понтійськими підняттями. А південна частина, що тяжіє до північного борту Причорноморської западини, зазнавала коливальних рухів, починаючи з крейди і до наших днів, із загальною тенденцією до занурення на сучасному етапі і формуванням потужного (до 1,2 км на півдні) плитного піщано-вапнякового комплексу порід. На формування долинного комплексу та русла Дніпра впливали локальні неотектонічні структури (блоки підняття і опускання) та сучасний тектогенез (Базавлукська та Томаківська депресія та Нікопольський припіднятий блок, (рис. 1.4)).

У геологічній будові цієї території взяли участь інтрузивні метаморфічні породи докембрію та осадові відклади палеогенової, неогенової та четвертинної систем, що складають платформний чохол. Неогенові відклади тортонського, сарматського, понтичного ярусів плащеподібно перекривають увесь прилеглий до долини Дніпра суходіл і являють собою строкату товщу складно перемежованих верств порід з сіро-зеленими глинами, мергелем, черепашковим та оолітовим вапняком, різнозернистим піском. Потужність такої товщі сягає 30 м на півночі і зростає до 800 м на півдні у Причорноморській западині. Русло Дніпра з комплексом терас (всього їх 5) частково або повністю розмивають буцацькі, київські та харківські породи палеогену, що представлені мергелем, зеленувато-сірими глинами, глауконітовими пісками та пісковиками.

However, the macrogeographical features of this territory remain unchanged or slightly variable: geological structure, latitudinal zonation, and natural conditions. From a tectonic point of view, the territory that was under the waters of the Kakhov reservoir is located on the border of two significant geosstructural elements: the southern slope of the Ukrainian crystalline massif (shield) and the South Ukrainian monocline, which is delimited by a sublatitude system of faults (Konksky) and lithological contacts. Subsurface lying of the foundation is observed in the sub-latitudinal section of the reservoir (only up to 0.1 km), and sharp deepening of the foundation to the south in the submeridional, narrower section of the reservoir up to 1.2 km (in the area of the Kakhovka Dam) and 2 km within the estuary of the Dnipro. According to the tectonic map of Ukraine (Fig. 1.3) [14], this territory belongs to the Middle Dnipro megablock. It is wholly located within the boundaries of the Zaporizhzhya block, which has a southwestern extension. The Derzuvativsky and Malokaterinivsky faults, which partially emphasize this block, are aligned with the foundation of the Dnipro Valley and have the same direction. Within the block, a northeastern fold along the Nikopol - Velika Znamyanka axis is distinguished, where crystalline rocks come to the surface (Mala Kamyanka gully (Novopavlivskyi quarry), Bazavluk river and Kamyanka tributary (Tokivskyi quarry)).

At the neotectonic stage of geological development, the northern part of the reservoir and the surrounding area were characterized by differentiated Miocene subsidence and relatively weak post-Pontic uplift. The southern part, which stretches to the north edge of the Black Sea Basin, underwent oscillatory movements, starting from the Cretaceous and up to the present day, with a general tendency to sink at the modern stage and the formation of a powerful (up to 1.2 km in the south) slab sand-limestone complex of rocks. Local neotectonic structures (blocks of uplifts and subsidence) and modern tectogenesis (Bazavlutsk and Tomakiv depressions and Nikopol uplifted block) influence the formation of the valley complex and the Dnipro channel (Fig. 1.4).

Intrusive metamorphic rocks of the Precambrian and sedimentary deposits of the Paleogene, Neogene, and Quaternary systems, which make up the platform cover, take part in the geological structure of this territory. The Neogene deposits of the Tortonian, Sarmatian, and Pontic strata cover the entire land adjacent to the Dnipro valley in a cloak-like manner and represent a variegated layer of complexly interspersed layers of rocks with grey-green clays, marl, shelly and oolitic limestone, and multi-grained sand. The thickness of such a layer reaches 30 m in the north and increases to 800 m in the south in the Black Sea depression. The channel of the Dnipro with a complex of terraces (five of them) partially or entirely erodes the Buchach, Kyiv, and Kharkiv Paleogene rocks represented by marl, greenish-grey clays, glauconitic sands and sandstones.



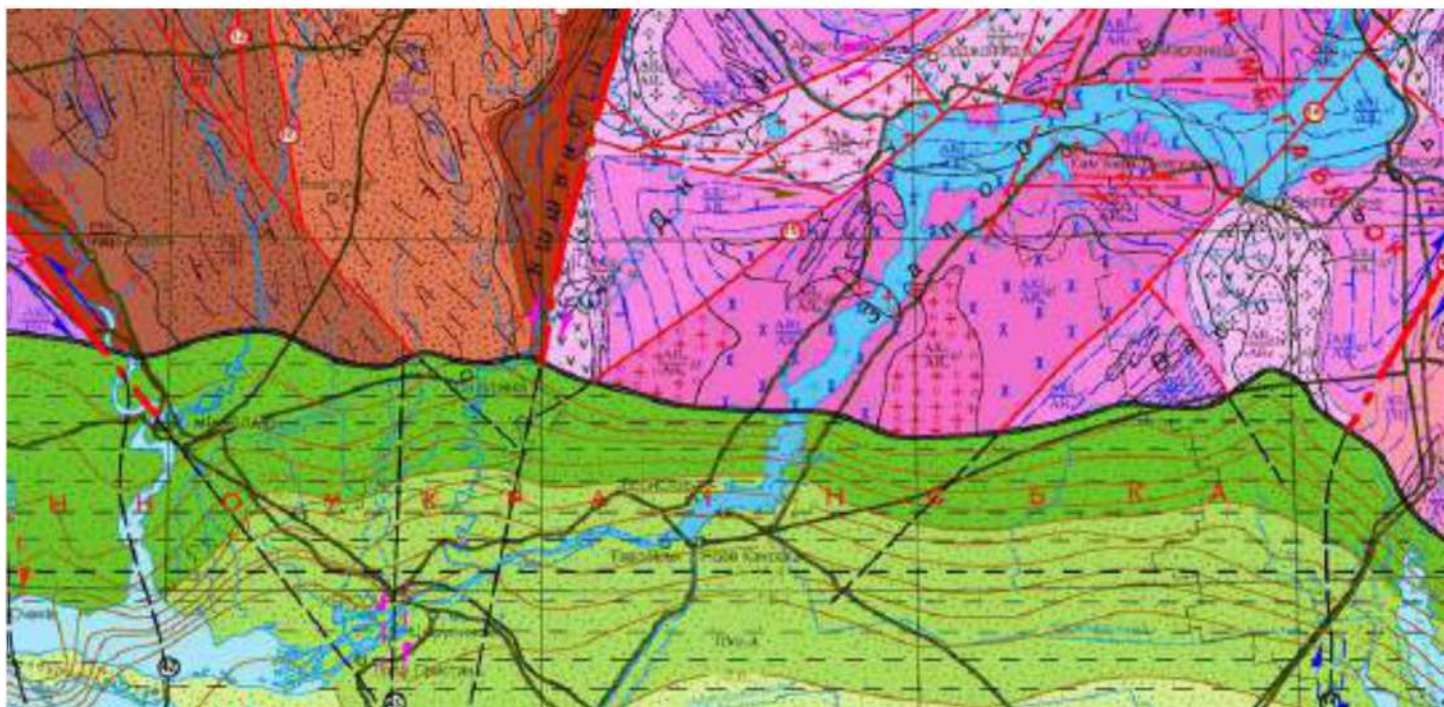


Рис. 1.3. Фрагмент тектонічної карти України (С. Круглов, Д. Гурський та ін., 2007)

Fig. 1.3. Fragment of the tectonic map of Ukraine (S. Kruglov, D. Gursky, et. al, 2007)

Умовні позначення до фрагменту тектонічної карти України (рис. 1.3)

Legend of the Fragment of the tectonic map of Ukraine (Fig. 1.3)

	Український щит Кіровоградський (Інгульський) мегаблок <i>Західноінгулецьке крайове підняття</i>	Ukrainian shield Kirovograsky (Ingulsky) megablock <i>Western-Inguletsky edge uplift</i>
	Український щит Кіровоградський (Інгульський) мегаблок <i>Новоукраїнський блок, синклінальна зона</i>	Ukrainian shield Kirovograsky (Ingulsky) megablock <i>Novoukrainian block, sincline zone</i>
	Український щит Кіровоградський (Інгульський) мегаблок	Ukrainian shield Kirovograsky (Ingulsky) megablock
	Український щит Середньопридніпровський мегаблок, Дніпровський та Васильківський блоки Зони підвищеної проникності зеленокам'яних структур	Ukrainian shield Mid-Dnipro megablock <i>Dniprotsky and Vasilkivsky blocks</i> Zones of increased greenstone structures penetration
	Області гнейсо-гранітоїдних блок-купольних структур	Areas of gneiss-granitoid block-dome structures
	Український щит Середньо-придніпровський мегаблок <i>Запорізький блок</i>	Ukrainian shield Mid-Dnipro megablock <i>Zaporizhsky block</i>

	Східноєвропейська платформа Південноукраїнська монокліналь, комплекс формацій палеоген-неогенового віку	Eastern-European platform Southern Ukrainian monocline a complex of Paleogene-Neogene formations
	Ізогіпси підшви неогенових відкладів	Isogypses of the sole of Neogene sediments
	Розривні порушення I порядку (розмежують мегаблоки) а) достовірні, б) ймовірні	First-order discontinuities (demarcate megablocks) a) reliable, b) probable
	Розривні порушення II порядку (розмежують блоки та структурно-формаційні зони)	Second-order discontinuities (demarcate megablocks) (demarcate blocks and structural-formation zones)
	Скиди, підкиди	Normal faults, reverse faults





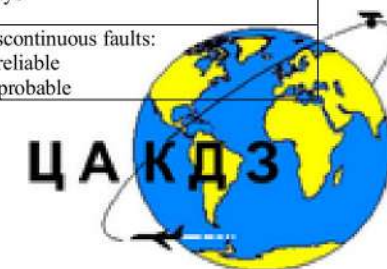
Рис. 1.4. Фрагмент карти геологічної будови України / Національний атлас України, 2008 р.

Fig. 1.4. Fragment of the geological structure map of Ukraine / National Atlas of Ukraine, 2008 p.

Умовні позначення до фрагменту карти геологічної будови України (рис. 1.4)
Legend of the fragment of the geological structure map of Ukraine (Fig. 1.4)

	N ₂ N ₂ cb N ₂ km	Неогенова система. Пліоцен Товща червоно-бурих глин Кімерійський регіонарус – піски, глини, алеврити	Neogene system. Pliocene Strata of Red and greyish brown clays Kimerian Regional Stage (RS) - sands, clays, siltstones
	N ₁ N ₁ p N ₁ m N ₁ s N ₂₋₁ +kd	Неогенова система. Міоцен Понтичний регіонарус – вапняки, мергелі, глини, піски Меотичний регіонарус – вапняки, піски, пісковики, глини Сарматський регіонарус: верхній – піски, пісковики, мергелі; середній – вапняки, глини, піски; нижній – піски, глини, вапняки. Тарханський, Чокракський, Конкський регіонаруси – глини, піски, пісковики, мергелі	Neogene system. Miocene Pontic RS – limestone, marls, clays, sands Meotichny RS – limestone, sands, sandstone, clays Sarmatsky RS: Upper – sands, sandstones, marls; Middle – clays, sands, limestones; Lower – sands, clays, limestone Tarkhansky, Chokraksky, Konksky RS – clays, sands, sandstones, marls
	P P ₃ br P ₃ mk	Палеогенова система. Олігоцен Берекський регіонарус – піски глауконіт-кварцеві, глини сіро-зелені, піски, алеврити, іноді – буре вугілля Майкопська серія – глини темно-сірі,	Paleogene system. Oligocene Bereksky RS – glauconitic- quartz sands, grey-green clays, siltstones, same times- brown coal Maykopaska series – dark-gray clays,

		прошарки алевриту, піску, пісковиків	bands of sands, sandstones and siltstones
	P ₂ P ₂ kv+ob	Палеогенова система. Еоцен Київський, обухівський регіонарус – глини піски глауконітові, алеврити, пісковики в тому числі опоковидні	Paleogene system. Eocene Kyivsky, Obuhivsky RS – clays, glauconite sands, marls, sandstones, including opoka.
	AR- PR AR	Архейсько-протерозойські утворення кристалічного фундаменту Дніпровсько-токівська серія – граніти, плагіограніти, мігматити, полімегматити	Archean–Proterozoic formation of crystalline base Dnieper-Tokovska series – granites, plagiogranites, migmatites, polymagmatites
		Піски	Sands
		Глини	Clays
	a b	Розривні порушення: a) достовірні b) ймовірні	Discontinuous faults: a) reliable b) probable



На півдні Дніпро врізається у неогенові товщі. Вони майже всюди є присутні у схилах водосховища і розмиваються руслом Дніпра. До затоплення поверхня сарматських вапняків піднімалась над урізом води на 10 – 15 м у центральній ділянці водосховища. Вище неогену у розрізі залягає горизонт червоно-бурих глин, який часто виходить на поверхню в ерозійній мережі та накопичується на дні водосховища та прилеглих балок як делювіально-алювіальний матеріал. На вододілах ці глини перекриті делювіальними суглинками плейстоцену, а на терасових поверхнях піщаними алювіальними відкладами з прошарками суглинку і супіску, потужністю до 25 – 30 м. Алювіальні піски заплави та першої тераси Дніпра були поховані під водами водосховища або з поверхні перевідкладені еоловими процесами у піщані масиви – кучугури. Нижче греблі Каховської ГЕС, у межах південнестепової рівнини простягається ділянка терасово-дельтових рівнин, яку поділяють на Нижньодніпровський плавневий район та Олешківський піщаний. Тут спостерігається строкатий у генетичному і літологічному відношенні комплекс алювіальних порід – річкові, озерні, лиманні, що представлені ракушняковим детритом, галькою, піском, глинами, органогенними відкладами.

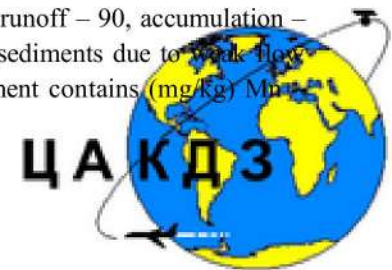
До затоплення заплава Дніпра у верхній частині мала загальний субширотний напрям і ширину до 16 – 24 км з багаточисельними протоками, рукавами, озерами та заболоченими ділянками. На верхній, ближче до лівого берега, нижче Хортиці, між селами Кушугум – Василівка розташовані Кінські плавні. Вони вирізняються великим піщаним масивом “Великі кучугур”, який не вкрили навіть води Каховського водосховища. Тут існувало Давнє Городище. Друга ділянка розташована нижче Нікополя та Капулівки – Базавлукські плавні – місце впадіння і розливу річки Базавлук на багаточисельні рукави та озера. Субмеридіональний напрям долини Базавлука та його плавнів зіставляється з розломом та неотектонічно активним опусканням та є найбільш заболоченою і вологою частиною дна долини.

Сучасна заплава Дніпра, яка почала новий період формування після осушення ложа водосховища, представлена значним літологічним різноманіттям через особливості осадконакопичення (їх потужності ще не досліджені) – прируслові кварцові піски різної зернистості, супіски, органогенні детритові накопичення, відмерлі двостулкові мушлі (переважно *Dreissena polymorpha*) та потужні тонкодисперсні мулисті глини, що вважаються сильно забрудненими. Так, розрахункові середньорічні надходження у донні відклади Каховського водосховища становили (у тис. тон) – 22422, стік – 90, акумуляція – 22332. Тобто 99,5 % речовин залишалося у донних відкладах через слабку проточність та міліни. У Каховському водосховищі у донному осаді присутні (мг/кг) Mn – 88,0; Cu – 2,8; Zn – 27,4; Cr – 8,8 [11].

In the South, the Dnipro cuts into the Neogene strata. They are present almost everywhere on the slopes of the reservoir and are washed away by the Dnipro riverbed. Before the flooding, the surface of the Sarmatian limestones rose above the water, cut by 10 – 15 m in the central part of the reservoir. Above the Neogene in the section lies a horizon of red-brown clays, which often come to the surface in an erosion network and accumulate at the bottom of the reservoir and adjacent streams in the form of diluvial-alluvial material. In the watersheds, these clays are covered by diluvial loams of the Pleistocene and on the terrace surfaces by sandy alluvial deposits with layers of loam and sandy sand up to 25 – 30 m thick. The floodplain's alluvial sands and the Dnipro's first terrace were buried under the reservoir's waters or redeposited from the surface by eolian processes into sand massifs – kuchuguri. A section of terrace-delta plains extends below the Kakhovka Dam within the southern steppe plain, divided into the Nizhny Dnipro alluvial area and the Oleshkiv sandy area. There is a genetic and lithologically diverse complex of alluvial rocks – river, lake, and estuarine, represented by shell detritus, pebbles, sand, clay, and organogenic sediments.

Before the flooding, the upper part of the Dnipro floodplain had a general sub-latitudinal direction and a width of up to 16 – 24 km with numerous channels, branches, lakes and wetlands – a flood formed at the place of the flooded Veliky Lug, where two large areas stand out. On the upper one, closer to the left bank, below Khortytsia, between the villages of Kushugum – Vasylivka, there is Kinski Plavni. They are distinguished by the enormous sandy massif Veliki Kuchuguri, which was not even covered by the waters of the Kakhovsky Reservoir. There was an Ancient Settlement here. The second section is located on the right bank – below Nikopol and Kapulivka – Bazavlutsky floodplains – where the Bazavluk River flows into numerous branches and lakes. The submeridional direction of the Bazavluka Valley and floodplains corresponds to a fault and neotectonically active subsidence and is the most swampy and wet part of the valley floor.

The modern floodplain of the Dnipro, which began a new period of formation after the drainage of the reservoir bed, is represented by a significant lithological diversity due to the peculiarities of sediment accumulation (their capacity has not yet been investigated) – alluvial quartz sands of various grain sizes, sandy loams, organogenic detrital accumulations, dead bivalve shells (mainly *Dreissena polymorpha*) and powerful finely dispersed silty clays. The latter are considered highly polluted. Thus, the estimated average annual inflows into the bottom sediments of the Kakhovsky Reservoir amounted to 22,422 thousand tons, runoff – 90, accumulation – 22,332, i.e. 99.5% of substances remained in the bottom sediments due to weak flow and shoals. In the Kakhovsky Reservoir, the bottom sediment contains (mg/kg) Mn – 88.0; Cu – 2.8; Zn – 27.4; Cr – 8.8 [11].



Основний водоносний горизонт цієї місцевості пов'язаний з тріщинуватою зоною порід докембрія та малопотужними водоносними горизонтами у палеогенових, неогенових та четвертинних відкладах. Загальною рисою району є несприятливі для поповнення підземних вод кліматичні умови території – мала кількість опадів. Запаси води у тріщинуватій зоні архей-протерозою і неогені дуже незначні (2,2 тис. м³ / доб), вони не забезпечують район питною і господарчою водою у необхідній кількості. До того ж, ці води дедалі більше підлягають дренажному впливу кар'єрів. На базі поодиноких свердловин функціонують невеликі водопроводи для централізованого постачання водою сіл з верхніх горизонтів неогену. Слабка захищеність водоносних горизонтів сприяє забрудненню. У зв'язку зі зниженням рівня води у Каховському водосховищі, яке донедавна слугувало джерелом живлення для водоносного горизонту у неогенових відкладах у межах Причорноморського артезіанського басейну, прогнозується зниження рівня підземних вод.

Правобережні схилі поверхні вододілів ускладнені яружно-балковою мережею та долинами припливів Дніпра – Базавлук з притоками Кам'янка та Солена, Чортомлик, Томаківка, Ревун та чималою кількістю підтоплених гирлових частин балок, що утворили затоки та навіть окремі водоймища. Лівобережними притоками є річки Конка, Карачокрак, Велика Білозерка, Рогачик та безліч лиманів та заток, як то Білозерський, Червоно Знаменський, Велика Лепетиха, Каїрська тощо. Характерною особливістю Лівобережжя є більш плаский характер поверхні та існування суфозійно-просадових форм – подів. Найбільшим є Кам'янський под біля сіл Велика Знам'янка і Балки, який розміщений на надзаплавній терасі.

Максимальний уріз долини Дніпра становить 30 – 35 м, ухил на субширотному відтинку течії незначний. Якщо до затоплення долини Дніпра у прилеглих балках переважала бокова ерозія та спостерігались висячі активні яри на корінних схилах Дніпра, то після затоплення водосховища і заліснення ярів і схилу балки активізуються абразійні процеси та зсуви за рахунок підмивання берегів. Це можна простежити, порівнюючи архівні аерофотознімки 1944 р. та космічне зображення берегів Каховського водосховища (рис. 1.5, а, б). Після спуску води Дніпро відновило русло у тих же обрисах, збереглися локація і морфографія островів, мілин і заболочених ділянок, що можна простежити на серії супутникових зображень Sentinel-2 та Landsat. Наприклад, біля села і мису Добра Надія, що частково було затоплено, вся присхилова частина днища (місцями делювіальні наноси чи висока заплава та надзаплавна тераса) вже до вересня 2023 р. стала осушеною і вкрилася сухопутними формами рослин та прибережно-водною рослинністю на заболочених ділянках. Цьому сприяла підвищена кількість опадів у липні – серпні 2023 р. (рис. 1.5, в).

The principal aquifer in this area is associated with a fractured zone of Precambrian rocks and weak aquifers in Paleogene, Neogene, and Quaternary sediments. A general feature of the district is the unfavourable climatic conditions of the territory for replenishing groundwater – a low amount of precipitation. Water reserves in the fractured zone of the Archaean-Proterozoic and Neogene are minimal (2.2 thousand m³/day). They do not provide the region with drinking and household water in the required quantity. In addition, these waters are increasingly subject to the draining influence of quarries. Based on individual wells, small aqueducts centralize water supply to villages from the upper horizons of the Neogene. Weak protection of aquifers contributes to pollution. In connection with the decrease in the water level in the Kakhov reservoir, which until recently served as a source of nutrition for the aquifer in the Neogene sediments within the Black Sea Artesian Basin, a decrease in the level of groundwater is predicted.

The right-bank sloping surfaces of the watersheds are complicated by a network of ditches and streams and valleys of the Dnipro streams: Bazavluk with tributaries Kamianka and Solena, Chortomyk, Tomakivka, Revun and a considerable number of submerged estuarine parts of streams that formed bays and even separate reservoirs. The left-bank tributaries are the rivers Konka, Karachokrak, Velika Bilozerka, Rohachyk and numerous estuaries and bays, such as Bilozersky, Chervono Znamensky, Velika Lepetikha, Kairska, etc. A characteristic feature of the Left Bank is the flatter nature of the surface and the existence of suffusion-subsidence forms – pods. The largest one is the Kamiansky pod near the villages of Velyka Znamianka and Balky, which is located on the floodplain terrace.

The maximum section of the Dnipro valley is 30 – 35 m, and the slope in the sub-latitudinal section of the stream is insignificant. If before the flooding of the Dnipro valley, the adjacent streams were dominated by lateral erosion and hanging active ravines in the original slopes of the Dnipro, then after the flooding of the reservoir and the afforestation of the ravines and the slope of the stream, abrasion processes and landslides are intensified due to the washing of the banks. It can be traced by comparing archival aerial photographs of 1944 and a space image of the shores of the Kakhovsky Reservoir (Fig. 1.5, a, b). After the water receded, the Dnipro restored its course in the exact contours; the location and morphology of islands, shoals, and wetlands were preserved, which can be traced on a series of Sentinel-2 and Landsat satellite images. For example, near the village and cape of Dobra Nadiya, which was partially flooded, the entire sloping part of the bottom (in places diluvial sediments or a high flood and a superfood terrace) had already become drained by September 2023 and was covered with terrestrial forms of plants and coastal-water vegetation in wetlands. The increased precipitation facilitated this in July – August 2023 (Fig. 1.5, c).





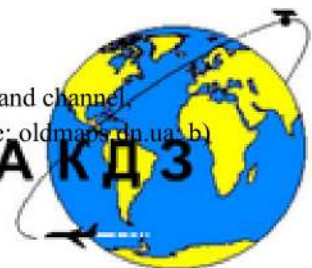
Рис. 1.5. Правобережний схил у районі с. Добра Надія: А) аерофотозображення, 1944 р. Сайт: oldmaps.dn.ua (Інтерактивні історичні карти Дніпра); В) Каховське водосховище, 2013 р.; С) зображення з супутника Sentinel-2 від 28.09.2023 р.

Fig. 1.5. The right-bank slope in the area of the village Good Hope: A) aerial photo, 1944. Site: oldmaps.dn.ua (Interactive historical maps of the Dnipro); C) Kakhov reservoir, 2013; C) image from the Sentinel-2 satellite from September 28, 2023.



Рис. 1.6. Відновлення меж Новопавлівського лиману та русла, р. Річише: а) фрагмент карти-трюхверстки 1975 р. Сайт: oldmaps.dn.ua; б) зображення з супутника Sentinel-2 від 28.09.2023 р.

Fig. 1.6. Restoration of the borders of the Novopavlivskiy estuary and channel. Richishe river: a) a fragment of a three-page map of 1975. Website: oldmaps.dn.ua; b) image from the Sentinel-2 satellite from September 28, 2023.



На заплаві і перших надзаплавних терасах Дніпра до затоплення мало місце значне ґрунтове різноманіття – родючі чорноземно-лучні ґрунти на супіщаних підвищеннях та терасах, дернові ґрунти на піщаних островах і болотні та мулисті ґрунти у пониженнях заплави. Тут існувала система островів, лук, дібров, озер, рукавів і стариць, де зосередження флори і фауни півдня України та джерела чистої води та рибних запасів. Ще з козацьких часів та татарських поселень залишилося багато відомих топонімів цих екосистем – Конка, Підпільна, Лапинка, Скарбна, Ревун, Річище, Карачокрак, Кушугум тощо [8].

Зіставлення історичної карти-трюхверстки 1875 р. із аерофотозображенням 1943 р. (із сайту “Інтерактивні історичні карти Дніпра” (oldmaps.dn.ua) та осушеного дна за даними супутника Sentinel-2 від 28 вересня 2023 р. (див. рис. 1.6, 1.7) демонструє як відновилось русло р. Конка у районі с. Водяного, Новопавлівський лиман та р. Річище у районі Червоногригорівки. Порівнюючи нинішню морфологію дна колишнього водосховища з рисовкою гідрологічних елементів, підвищених та понижених ділянок на історичних зображеннях слід зазначити, що Білозерський лиман існував і раніше, контури русел Чортомлика і Скарбної, співпадають за окресленнями; уже вийшли з-під води і формуються Сулицькі та Чортомлицькі плавні, поки що як болота. За дном водосховища вже відновлено русло Дніпра, але у деяких місцях воно випрямилось (рис. 1.8). Новоутворена система дуже динамічна і залежить від низки чинників – опадів, скидів води з верхніх водосховищ.

Територія, що перебувала під водосховищем, перебуває у посушливій, дуже теплій агрокліматичній зоні. Клімат помірно-континентальний. Літо, переважно, жарке, сухе, зима - м'яка і малосніжна. З природних компонентів – кліматичні умови, кількість опадів є ключовим моментом у формуванні екосистеми степу. Загалом клімат за історичний період зазнав коливальних змін, дослідники-географи відзначають зміщення межі північного степу на північ [15]. Вододільні поверхні та схили балок переважно розорані. Природна рослинність – різнотравні степи та байрачні ліси – збереглися на схилах балок. Основними породами байрачних лісів та лісосмуг є дуб, біла акація, клен.

On the floodplain and the first floodplain terraces of the Dnipro before the flooding, a significant soil diversity was observed - fertile black earth-meadow soils on sandy elevations and terraces, turf soils on sandy islands, and marshy and muddy soils in the lower floodplain. Here, there was a system of islands, meadows, thickets, lakes, inlets, and inlets, which were a place of concentration of flora and fauna of southern Ukraine, a source of clean water and fish stocks. Since Cossack times and Tatar settlements, many well-known toponyms of these ecosystems have been preserved - Konka, Pidpilna, Lapinka, Skarbna, Revun, Richishche, Karachokrak, Kushugum, etc. [8].

Comparison of the historical map – three-fold version of 1875 with an aerial photo of 1943 (from the site “Interactive historical maps of the Dnipro” (oldmaps.dn.ua) and the drained Don according to data from the Sentinel-2 satellite from September 28, 2023 (see Fig. 1.6, 1.7) shows how the Konka River in the area of the village of Vodyano, the Novopavlivsky estuary and the Richishche River in the area of Chervonogrigorivka have been restored. It compares the current morphography of the bottom of the former reservoir with the drawing of hydrological elements in elevated and lowered areas on historical images. It is noted that the Bilozersky estuary existed before the contours of the Chortomlyk and Skarbnaya riverbeds coincide in outline; they have already come out of the water, and the Sulytskyi and Chortomlytskyi floodplains are forming, so far like swamps. At the bottom of the reservoir, the channel of the Dnipro has already been restored. However, in some places, it has straightened (Fig. 1.8). The newly formed system is dynamic and depends on several factors, such as precipitation water releases from upper reservoirs.

The territory occupied by the reservoir is located in an arid, hot agro-climatic zone. The climate is moderately continental. Summer is primarily hot and dry; winter is mild and has little snow. Of the natural components – climatic conditions – the amount of precipitation is critical in forming the steppe ecosystem. In general, the climate has fluctuated over the historical period, and researchers and geographers have noted the shift of the border of the northern steppe to the north [15]. The watershed surfaces and slopes of the streams are mostly ploughed. Natural vegetation in the form of multi-grass steppes and birch forests has been preserved on the slopes of the streams. The main species of Bairach forests and forest strips are oak, white acacia, and maple.





Рис. 1.7. Дно водосховища між селами Капулівка і Велика Знам'янка: А) аерофотозображення, вересень 1943 р. Сайт: oldmaps.dn.ua; В) зображення з супутника Sentinel-2 від 28.09.2023 р.

Fig. 1.7. The bottom of the reservoir between the villages of Kapulivka and Velika Znamyanka: A) aerial photo, September 1943. Website: oldmaps.dn.ua; B) image from the Sentinel-2 satellite from 09/28/2023.

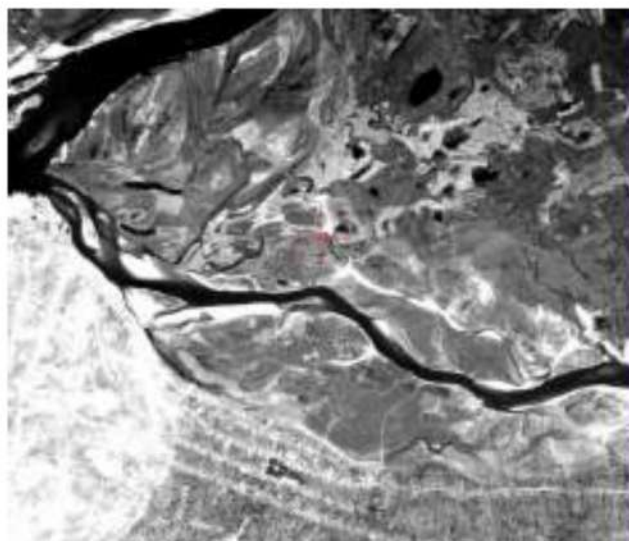
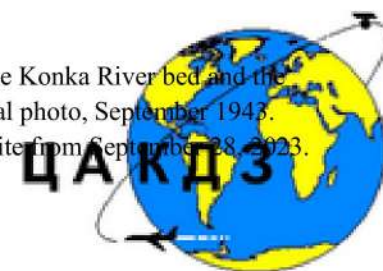


Рис. 1.8. Село Водяне на Лівобережжі. Відновлення русла р. Конка, а також контурів старих озер та проток за дном: А) аерофотозображення, вересень 1943 р. Сайт: oldmaps.dn.ua; В) зображення з супутника Sentinel-2 від 28.09.2023 р.

Fig. 1.8. Vodyane village on the Left Bank. Restoration of the Konka River bed and the contours of old lakes and channels along the bottom: A) aerial photo, September 1943. Website: oldmaps.dn.ua; B) image from the Sentinel-2 satellite from September 28, 2023.



РОЗДІЛ 2. НАСЛІДКИ РУЙНУВАННЯ КАХОВСЬКОЇ ГЕС: ЗА ДАНИМИ КОСМІЧНОЇ ЗЙОМКИ

2.1. Підрив дамби Каховської ГЕС: хронологія подій

6 червня 2023 р. між 02:00 та 03:00 ночі сейсмічні сенсори України та Румунії зафіксували ознаки вибухів, а близько 06:00 ранку оперативне командування “Південь” Збройних сил України повідомили про катастрофу на Каховській ГЕС. За повідомленням начальника Херсонської обласної військової адміністрації О. Прокудіна, станом на 07:30 ранку цього дня були повністю або частково затоплено населені пункти – Тягинка, Льове, Одрадокам’янка Бериславського району, Іванівка, Микільське, Токарівка, Понятівка, Білозерка. О 08:00 ранку через затоплення району Корабел у Херсоні відбулося його знеструмлення.

За повідомленням Українського національного інформаційного агентства УКРІНФОРМ, у критичній зоні ризику тільки на правобережжі Дніпра опинилося близько 16 тис. людей. Наслідки катастрофи на лівобережжі Дніпра стали набагато серйознішими через два основні чинники – по-перше, лівий берег Дніпра нижчий за правий, тому тут площа затоплення була значно більшою; по-друге, представники російської окупаційної влади не створили необхідних умов щодо евакуації населення із зони затоплення.

За даними Державної служби надзвичайних ситуацій, 7 червня на гідрологічному посту у Херсоні було зафіксовано підняття рівня води на 5,3 м; водночас у Нікополі, на узбережжі Каховського водосховища, що почало стрімко мілішати, відбувалося зниження рівня води на 2,2 м.

Окрім Дніпра, рівень води значно піднявся також на р. Інгулець та у гирлі притоки Інгульця, р. Висунь; таким чином, затопленими виявилися велика кількість прибережних населених пунктів та інфраструктурних об’єктів, зокрема, сонячні електростанції.

CHAPTER 2. CONSEQUENCES OF THE KAKHOVKA DAM DESTRUCTION: ACCORDING TO SPACE SURVEY DATA

2.1. Undermining of the Kakhovka Dam: chronology of events

On June 6, 2023, between 02:00 a.m. and 03:00 a.m., seismic sensors of Ukraine and Romania recorded signs of explosions, and around 06:00 a.m., the South operational command of the Armed Forces of Ukraine reported the disaster at the Kakhovka Dam. According to O. Prokudin, the head of the Kherson Regional Military Administration, as of 07:30 a.m. that day, the following settlements were entirely or partially flooded: Tiahynka, Lvove and Odradokamianka in the Beryslav district, and Ivanivka, Mykilske, Tokarivka, Poniativka, Bilozerka. At 08:00 a.m., due to the flooding of the Korabel district of Kherson, it was cut off.

According to the Ukrainian national news agency UKRINFORM, up to 16,000 people are in the critical risk zone on the right bank of the Dnipro River alone. The consequences of the disaster on the left bank of the Dnipro River were much more severe due to two main factors: firstly, the left bank of the Dnipro River in this region is lower than the right, so the flooded area was much more significant; secondly, representatives of the occupying forces did not pay the necessary attention to evacuation measures.

According to the State Emergency Service, on June 7, a water level rise of 5.3 m was recorded at a hydrological station in Kherson, while a water level drop of 2.2 m was observed in Nikopol, on the coast of the Kakhovka Reservoir, which began to flow rapidly.

In addition to the Dnipro River, the water level also rose significantly on the Ingulets River and at the mouth of the Ingulets tributary, the Vysun River; thus, a large number of coastal settlements and infrastructure facilities, in particular, solar power plants, were significantly flooded.



На 8 червня 2023 р. середній рівень підняття води у Дніпрі у межах затоплених територій становив 5,6 м. Частково або повністю були затоплені Одрадокам'янка, Тягинка, Львове Бериславського району, Понятівка, Білозерка, Іванівка, Микільське, Токарівка, прибережна частина Херсону. Також через підтоплення промислових об'єктів Херсону відбулося забруднення прилеглих територій нафтопродуктами. Загалом на лівобережжя припадає 32 % площі затоплення, на правобережжя – 68 % (рис. 2.1).

Лівобережжя Дніпра постраждало набагато більше, окремі великі міста та селища майже повністю опинилися під водою. Зокрема, Гола Пристань, Олешки, Корсунка, Кринки, Козачі Лагері, Кардашинка, Мала та Велика Кардашинки, Кохани. Частковому підтопленню піддалася також Нова Каховка.

Підвищений рівень води тримався до 9 червня, після чого він почав поступово знижуватися. На Херсонському створі 11 червня о 7:00 ранку рівень води становив 3,92 м, а о 20:00 – 3,6 м, на 1,77 м нижче від максимуму. Водночас на Нікопольському створі рівень води знизився на 7,67 м і продовжував знижуватися, знаменуючи зникнення найбільшого водосховища в Україні з об'ємом 18,2 км³.

За інформацією, наданою компанією УКРГІДРОЕНЕРГО, унаслідок руйнування Каховської ГЕС Україна втратила 35–40 % запасів питної води, яку могла б споживати упродовж року. Проблеми з водопостачанням виникли у Кривому Розі, Марганці, Нікополі, втрачено можливість водопостачання Кримського півострова Північно-Кримським каналом.

Окрім великої кількості населених пунктів, частково затопленими виявились низка об'єктів природно-заповідного фонду України, якими дуже багата ділянка у гирлі Дніпра. Загалом, уся акваторія Дніпра нижче греблі Каховської ГЕС представляє Національний природний парк “Нижньодніпровський” із загальною площею 801 км², який майже повністю виявився затопленим. Також постраждали низка ландшафтних заказників.

As of June 8, 2023, the average level of water rise in the Dnipro river within the flooded territories was 5.6 m. Odradokamianka, Tiahynka and Lvove in the Beryslav district, Poniativka, Bilozerka, Ivanivka, Mykilske, Tokarivka, and the coastal part of Kherson were partially or entirely flooded. Also, due to the flooding of industrial facilities in Kherson, the surrounding territories were contaminated with oil products. In general, 32 % of the flooded area is on the left bank and 68 % on the right (fig. 2.1).

The left bank of the Dnipro River suffered much more. Some large cities and towns were almost entirely underwater, in particular, Hola Prystan, Oleshky, Korsunka, Krynyky, Kozachi Laheri, Kardashynka, Mala and Velyka Kardashynka, Kokhany. Nova Kakhovka was also partially flooded.

The elevated water level lasted until June 9, which began to decrease gradually. On June 11, at 7:00 a.m., the water level was 3.92 m on the Kherson reservoir, and at 8:00 p.m., it was 3.6 m, 1.77 m less than the maximum. At the same time, the water level in the Nikopol reservoir dropped by 7.67 m and continued to drop, marking the disappearance of the largest reservoir in Ukraine with a volume of 18.2 km³.

According to the information provided by UKRGHYDROENERGO, due to the destruction of the Kakhovka Dam, Ukraine lost 35–40% of its drinking water reserves, which could be consumed during the year. Problems with water supply arose in Kryvyi Rih, Marganets, and Nikopol, and the possibility of water supply to the Crimean peninsula via the North Crimean Canal was lost.

In addition to many settlements, several objects of the nature reserve fund of Ukraine, which are very rich in the area at the mouth of the Dnipro River, turned out to be partially flooded. In general, the entire water area of the Dnipro River below the Kakhovka Dam represents the Lower Dnipro National Nature Park with a total area of 801 km², which was almost completely flooded. Some landscape reserves were also affected.



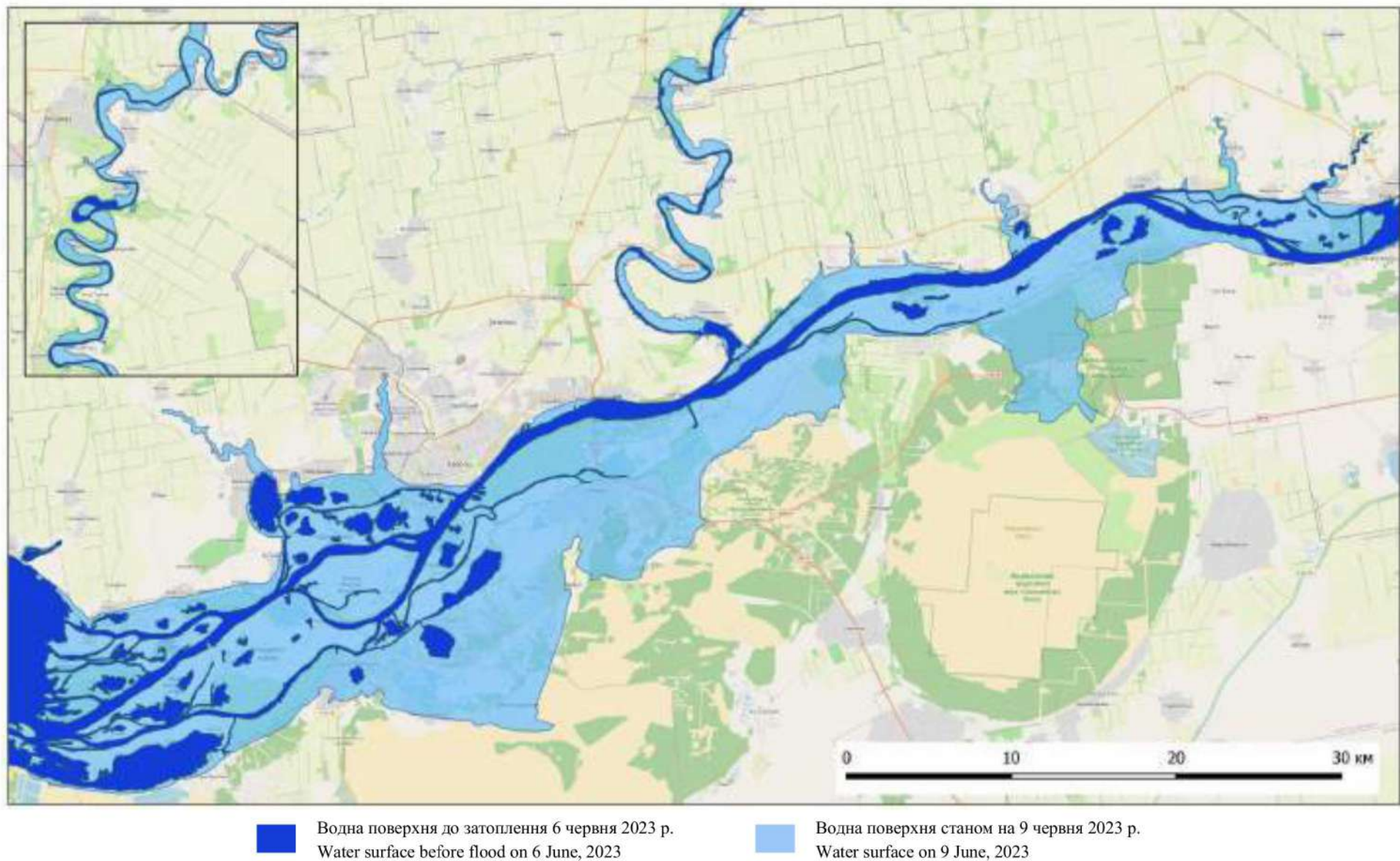


Рис. 2.1. Картосхема водної поверхні Дніпра та Інгульця до затоплення та через три дні після руйнування Каховської ГЕС 6 червня 2023 р. (на 9 червня 2023 р.). Дані про водну поверхню отримано за знімками супутників Landsat-8 та -9.

Fig. 2.1. Map-scheme of the water surface of the Dnipro and Ingulets before flooding and on June 9, 2023, three days after the destruction of the Kakhovka Dam on June 6, 2023 (data on the water surface were obtained from Landsat-8 and 9 satellite images).



2.2. Оперативний супутниковий моніторинг затоплення у оптичному діапазоні електромагнітного спектру

Для аналізу використано багатоспектральні дані, отримані супутниками Landsat-8, Landsat-9 від 01.06.2023 р. (тобто, до підриву ГЕС) та від 09.06.2023 р. (через три доби після підриву). Для оперативного оцінювання масштабів затоплення території обрано комплект карт розподілу нормалізованого диференційного індексу вологості NDWI (Normalized Difference Water Index), який розраховується за формулою:

$$NDWI = (NIR - Green) / (NIR + Green),$$

де *NIR* – значення спектрального відбиття у ближній інфрачервоній області спектру, а *Green* – значення спектрального відбиття у зеленій області спектру.

Також використано розподіли поверхневої температури LST (Land Surface Temperature), отримані супутниками Landsat-8 та Landsat-9, і дані гіпсометричних рівнів, які добре себе зарекомендували в аналогічній ситуації під час затоплення Приірпіння (Київська область) у 2022 р. [18].

У результаті аналізу супутникових даних і цифрової моделі місцевості, побудованої за даними SRTM v.3 plus (рис. 2.2) визначено площу затоплення території через три доби після руйнування дамби. Результати аналізу зміни площі водної поверхні Дніпра та Інгульця засвідчили, що площа водної поверхні у межах досліджуваної ділянки до затоплення становила близько 784 км², а на 9 червня 2023 р. (через 3 дні після руйнування ГЕС) зазначена площа досягла величини 1480 км², тобто, збільшилась на 696 км².

2.2. Operational satellite monitoring of flooding in the optical range of the electromagnetic spectrum

Multispectral data obtained by Landsat 8 and 9 satellites from 06/01/2023 (before the detonation) and 06/09/2023 (three days after) were used for the analysis. A set of maps of the Normalized Difference Water Index (NDWI) distribution was chosen for the rapid assessment of the extent of flooding, which is calculated according to the formula:

$$NDWI = (NIR - Green) / (NIR + Green),$$

where *NIR* is the value of the spectral reflectance in the near-infrared range of the spectrum, and *Green* is the value of the spectral reflectance in the green range of the spectrum.

Land Surface Temperature (LST) distributions obtained by Landsat-8 and Landsat-9 satellites and the hypsometric levels data, which proved themselves well in a similar situation during the flooding of Pryirpinnia (Kyiv region) in 2022, were also used [18].

As a result of the analysis of satellite data and a digital model of the terrain built according to SRTM v.3 plus data (Fig. 2.2), it was determined that the flooded area three days after the destruction of the dam. The results of the area change analysis of the Dnipro and Ingulets River water surface showed that the area of the water surface within the studied area before flooding was about 784 km², and on June 9, 2023 (3 days after the destruction), the indicated area reached 1480 km², that is, it increased on 696 km².



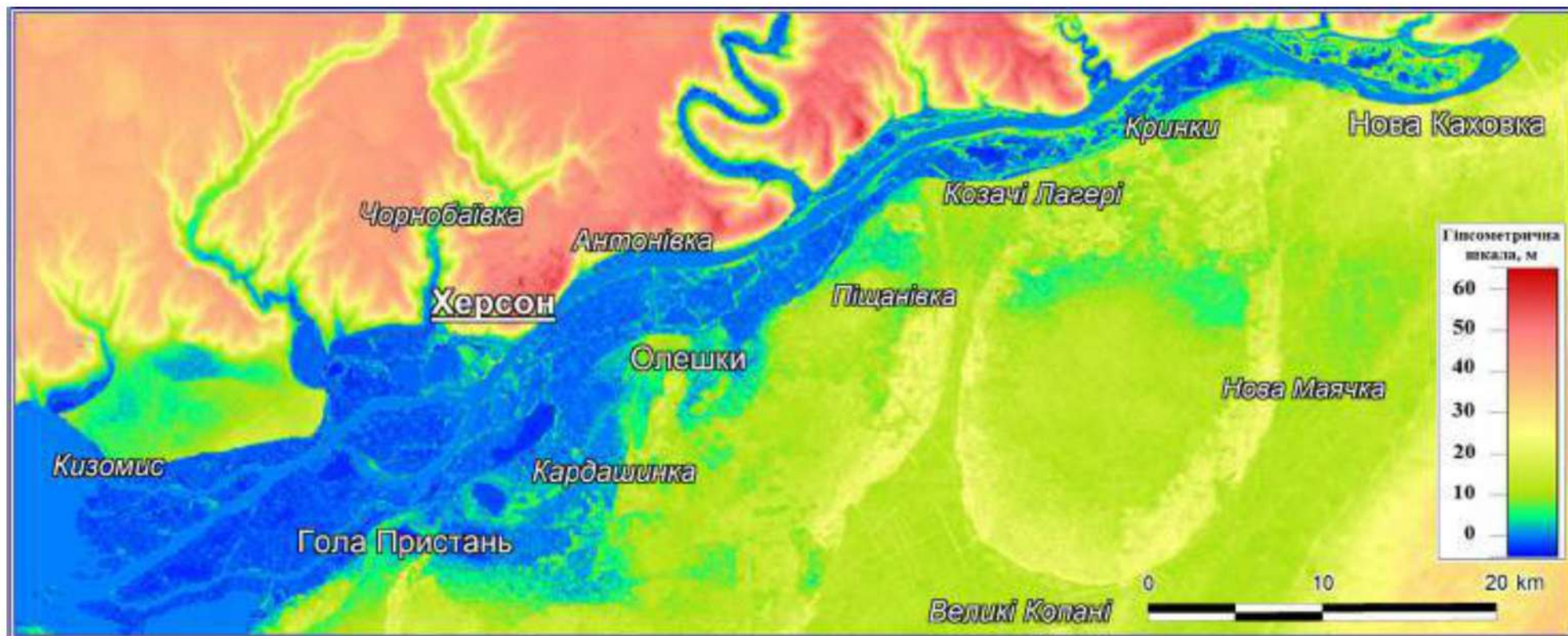


Рис. 2.2. Схема гіпсометрії рельєфу відтинка долини р. Дніпро від зруйнованої греблі до гирла річки

Fig. 2.2. Gypsum scheme of the of the Dnipro River valley from a destroyed dam



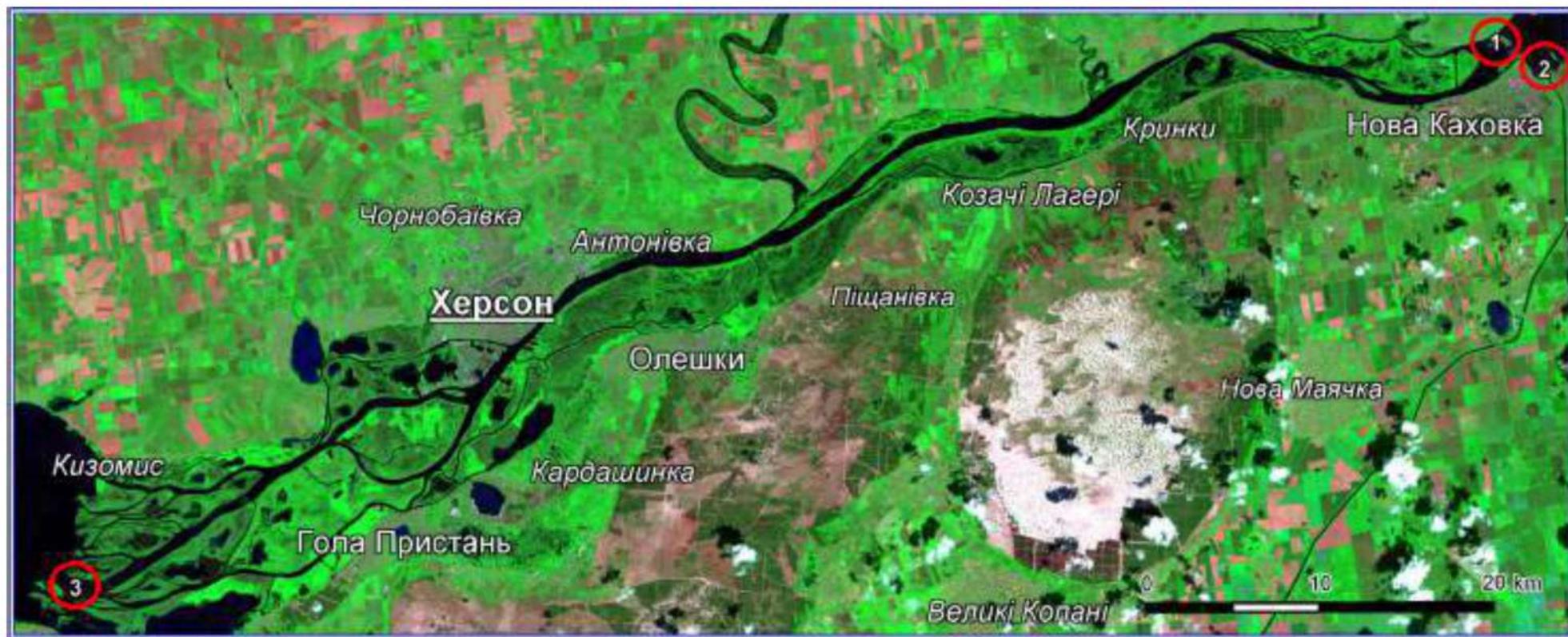


Рис. 2.3. Долина Нижнього Дніпра до руйнування греблі Каховської ГЕС за даними супутника Landsat-8 від 1 червня 2023 р. Кольоровий композит каналів червоний – ближній інфрачервоний – синій

Fig. 2.3. Lower Dnipro valley before the destruction of the Kakhovka dam according to Landsat-8 satellite data from June 1, 2023. Color composite of Red – NIR – Blue bands



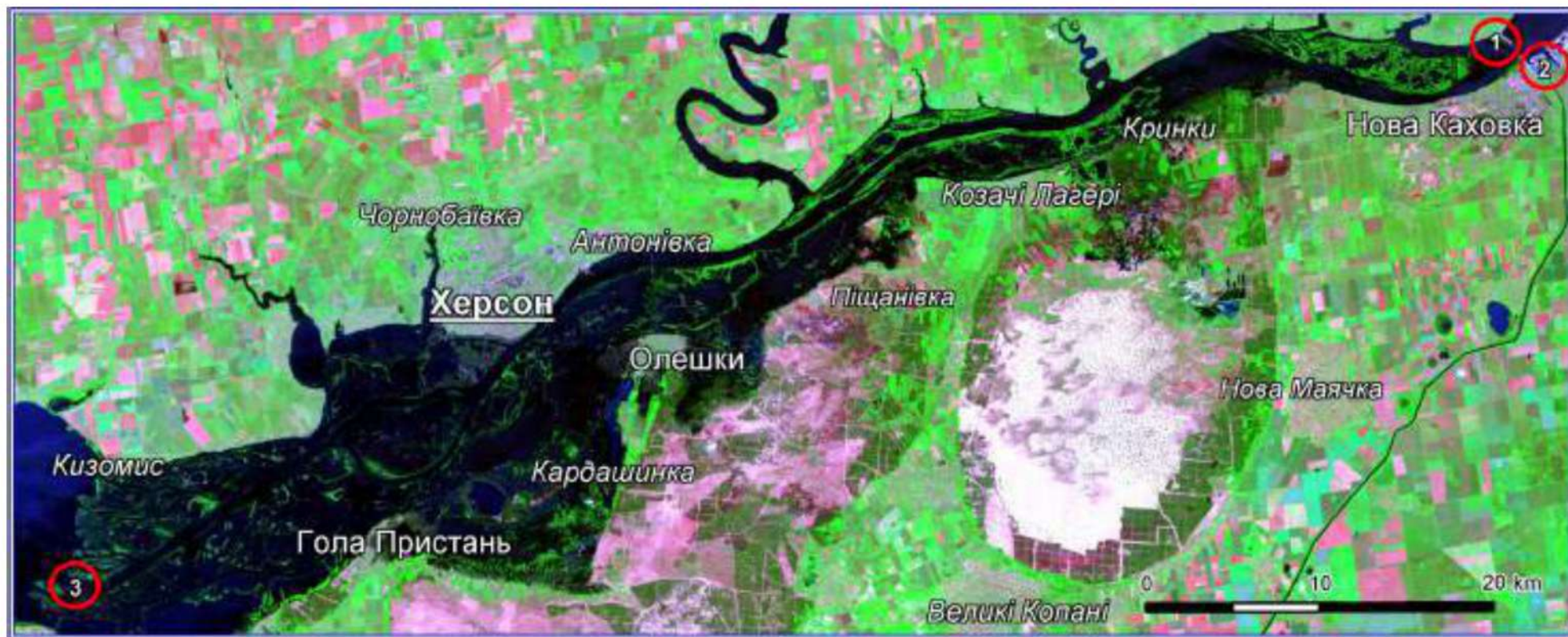


Рис. 2.4. Затоплена долина нижнього Дніпра після руйнування греблі Каховської ГЕС за даними супутника Landsat-9 від 9 червня 2023 р. Кольоровий композит каналів: середній інфрачервоний – ближній інфрачервоний – зелений
Цифрами у колах позначено: 1 – Гребля Каховської ГЕС, 2 – Водозабір Північнокримського каналу, 3 – Гирло р. Дніпро

Fig. 2.4. Flooded Lower Dnipro valley after the destruction of the Kakhovka dam according to Landsat-9 satellite data of June 9, 2023. Color composite of SWIR2 – NIR – Green bands
Numbers in circles indicate: 1 – Kakhovka dam, 2 – Water intake of the North Crimean Canal, 3 – Dnipro River mouth



На знімку до підрива греблі (рис. 2.3) чітко простежується русло р. Дніпро, р. Інгулець, озер у заплаві, дельта Дніпра (чорний колір) та власне заплава (насичений зелений колір). У руслі р. Інгулець видно обміління і заростання русла.

На знімку після підриву греблі (рис. 2.4) практично вся заплава р. Дніпро затоплена. Річки Правобережжя у пригирлових частинах підпружені штучним паводком і затоплені на багато кілометрів угору за течією. Частково затоплені міста Гола Пристань, Олешки, район Корабел Херсона, Нова Каховка, прибережні села і дачні поселення. Складна обстановка відстежується у долині р. Інгулець, де спостерігається критичне підняття рівня води. У зоні підтоплення опинилися населені пункти Калинівське, Заповіт, Краснолюбецьк, Бобровий Кут на відстані понад 45 км угору за течію від гирла.

Аналіз значень NDWI та температури земної поверхні LST (рис. 2.5 – 2.9) уможливив уточнити площу затоплення у межах ділянки досліджень. Розподіл значень NDWI після руйнації греблі і штучного паводку дуже диференційований і не дає однозначної відповіді про площу затоплення.

Для оперативного визначення меж затоплення було використано карти поверхневої температури LST, що розраховувалися за даними теплового каналу B10 супутників Landsat-8, Landsat-9 (рис. 2.8 – 2.9). На карті розподілу температур LST до руйнування греблі у долині р. Дніпра однозначно виділяються русло (температура 20 – 25 °C), зволожена заплава (температура 25 – 30 °C) і суходіл (температура 35 – 40 °C і більше). На карті LST після катастрофи заплава повністю затоплена, залишилися окремі ділянки підтоплених земель з обох бортів долини. За рахунок контрасту температур (початок червня) між прогрітою поверхнею суходолу і відносно холодною водною масою, що поступила з водосховища, зокрема і з глибинної її частини, чітко простежується межа відокремлення затоплених територій від незатоплених. Також на теплових картах фіксується підпруження і затоплення пригирлових частин лиманів і малих річок та нижньої частини р. Інгулець на правобережжі р. Дніпро.

Для уточнення меж затоплення досліджено гіпсометрію долини р. Дніпро, де, враховуючи максимальний підйом паводку до 6 м, вище за докатастрофічний рівень, зона підтоплення обмежена бортами долини з відносною висотою до 7 – 8 м від рівня русла і низької заплави.

The image before the dam was blown up (Fig. 2.3) clearly shows the Dnipro riverbed, the Ingulets River, lakes in the floodplain, the Dnipro delta (black), and the floodplain itself (deep green). In the Ingulets riverbed, shallowing and overgrowth of the riverbed can be observed.

In the image after the dam was blown up (Fig. 2.4), almost the entire floodplain of the Dnipro River is flooded. The rivers of the Right Bank in the estuarine parts are stressed by an artificial flood and flooded many kilometres upstream. The towns of Hola Prystan, Oleshky, the Korabel district of Kherson, Nova Kakhovka, coastal villages and summer cottages are partially flooded. The situation is complicated in the Ingulets River valley, where a critical rise in water levels is observed. The settlements of Kalynivske, Zapovit, Krasnolyubetsk, and Bobrov Kut, more than 45 km upstream from the mouth, are in the flood zone.

The analysis of NDWI values and LST (Fig. 2.5 – 2.9) clarified the flooding within the research area. The distribution of NDWI values after the dam's destruction and the artificial flood is very differentiated and does not give an unequivocal answer about the flooded area.

LST temperature maps were used to quickly determine the inundation limits, which were calculated based on data from the thermal channel B10 of Landsat-8, -9 satellites (Fig. 2.8 – 2.9). On the map of LST temperature distribution before the destruction of the dam in the Dnipro River valley, the channel (temperature 20 – 25 °C), wet floodplain (temperature 25 – 30 °C), and dry land (temperature 35 – 40 °C and higher) are clearly distinguished. On the LST map, the floodplain was flooded entirely after the disaster, and there were separate areas of flooded land on both sides of the valley. Due to the temperature contrast (beginning of June) between the heated surface of the land and the relatively cold water mass that came from the reservoir, including from its deep part, the boundary separating flooded from non-flooded areas can be traced. The thermal maps also record the rise and flooding of the mouth parts of estuaries and small rivers and the lower part of the Ingulets River on the right bank of the Dnipro River.

The hypsometry of the Dnipro River valley was studied to clarify the flooding limit, where the flooding zone is limited to the sides of the valley with a higher height of up to 7 – 8 m from the level of the channel and low floodplain, taking into account the maximum rise of the flood up to 6 m above the catastrophic level.



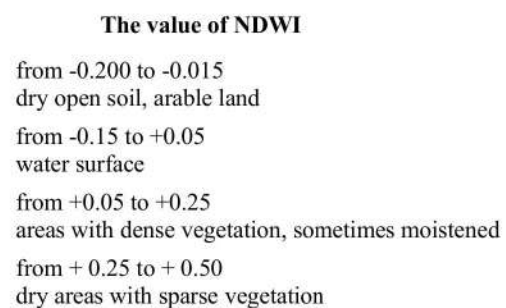
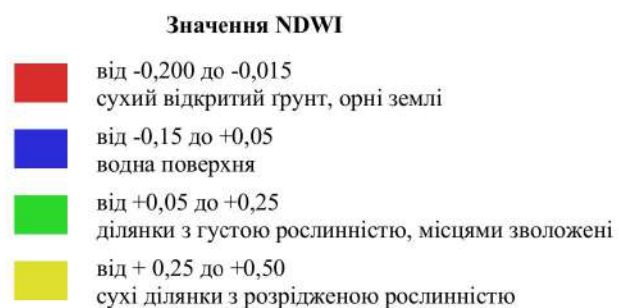
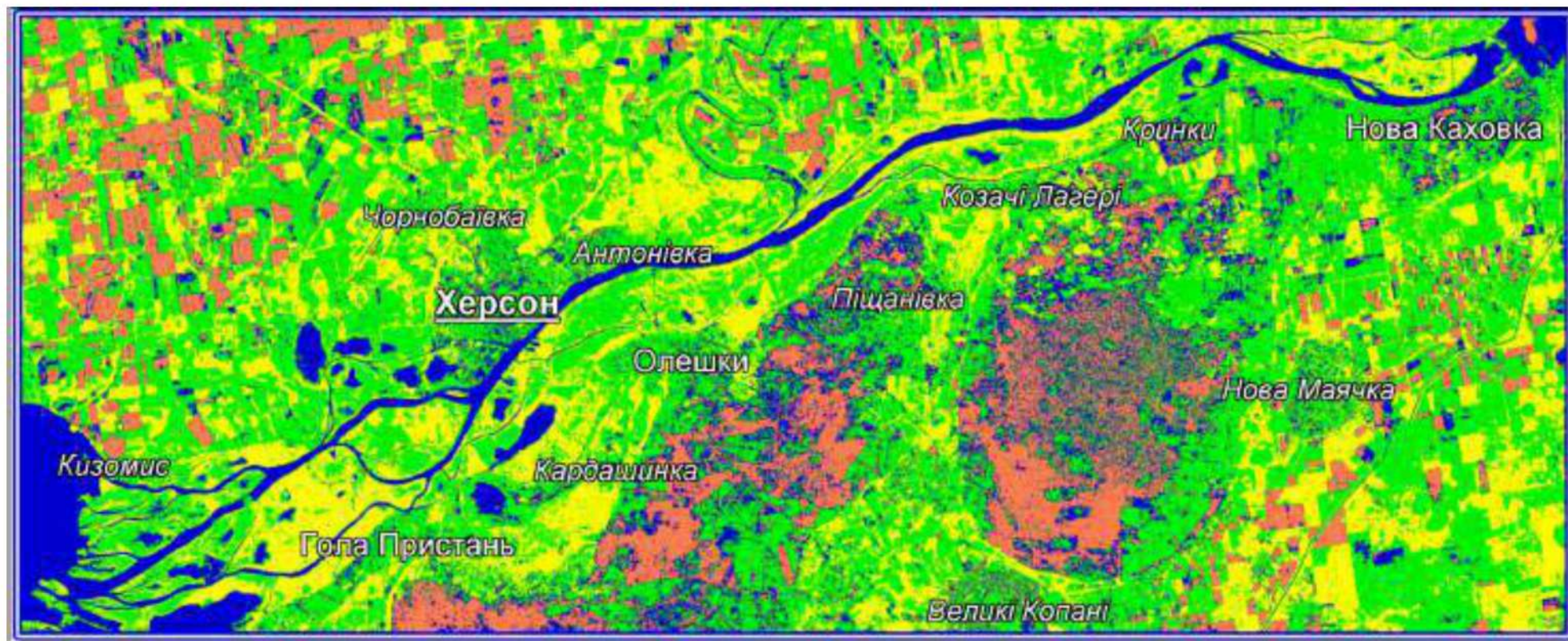
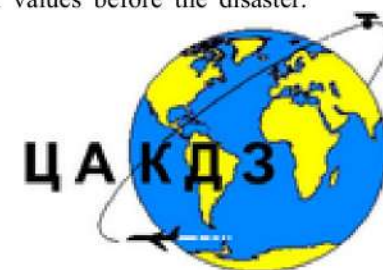
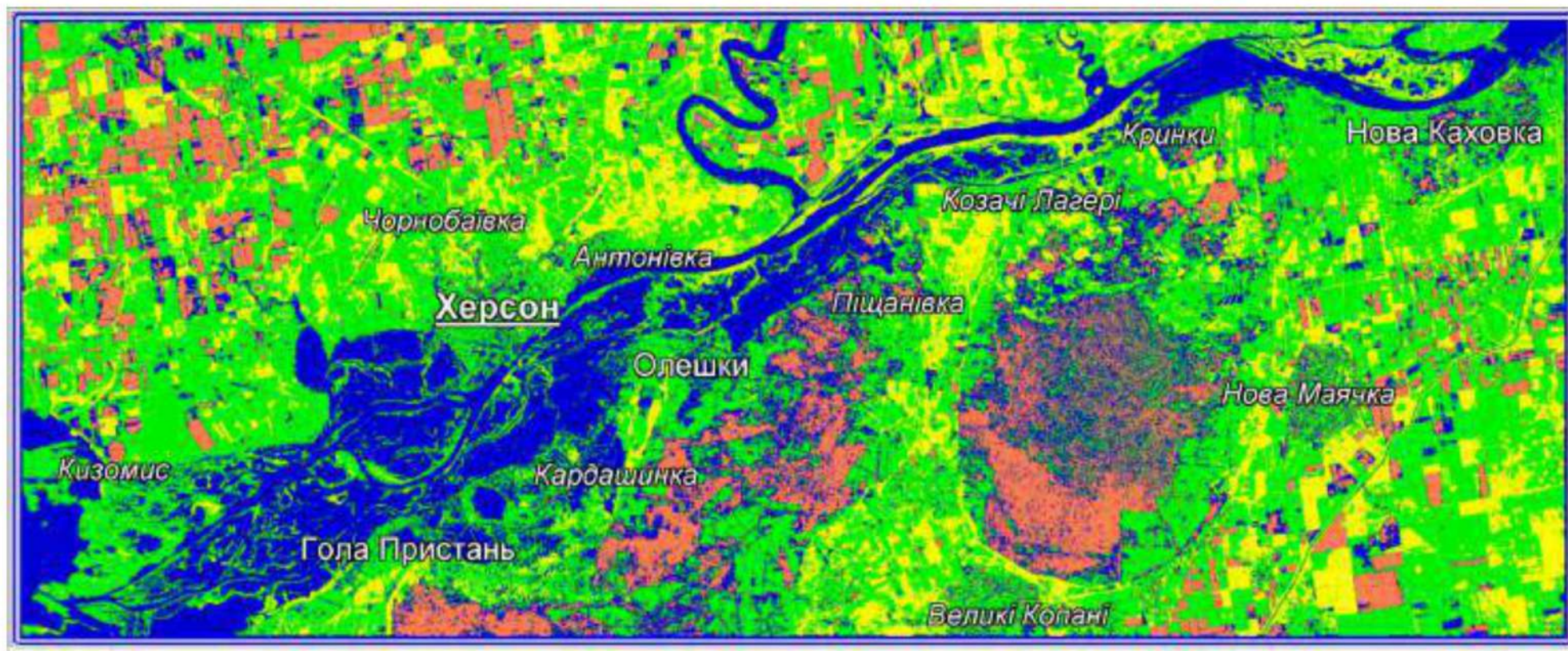


Рис. 2.5. Розподіл значень нормалізованого водного індексу NDWI до катастрофи (за обробкою знімку супутника Landsat-8 від 01.06.2023 р.)

Fig. 2.5. Distribution of normalized water index NDWI values before the disaster. Processing of Landsat-8 image from June 1, 2023.





Значення NDWI		The value of NDWI	
■	від -0,200 до -0,015 сухий відкритий ґрунт, орні землі	■	from -0.200 to -0.015 dry open soil, arable land
■	від -0,15 до +0,05 водна поверхня	■	from -0.15 to +0.05 water surface
■	від +0,05 до +0,25 ділянки з густою рослинністю, місцями зволожені	■	from +0.05 to +0.25 areas with dense vegetation, sometimes moistened
■	від +0,25 до +0,50 сухі ділянки з розрідженою рослинністю	■	from +0.25 to +0.50 dry areas with sparse vegetation

Рис. 2.6. Розподіл значень нормалізованого водного індексу NDWI після катастрофи (за обробкою знімка супутника Landsat LC09 від 09.06.2023 р.)

Fig. 2.6. Distribution of normalized water index NDWI values after the disaster. Processing of the Landsat LC09 short circuit dated 06.09.2023



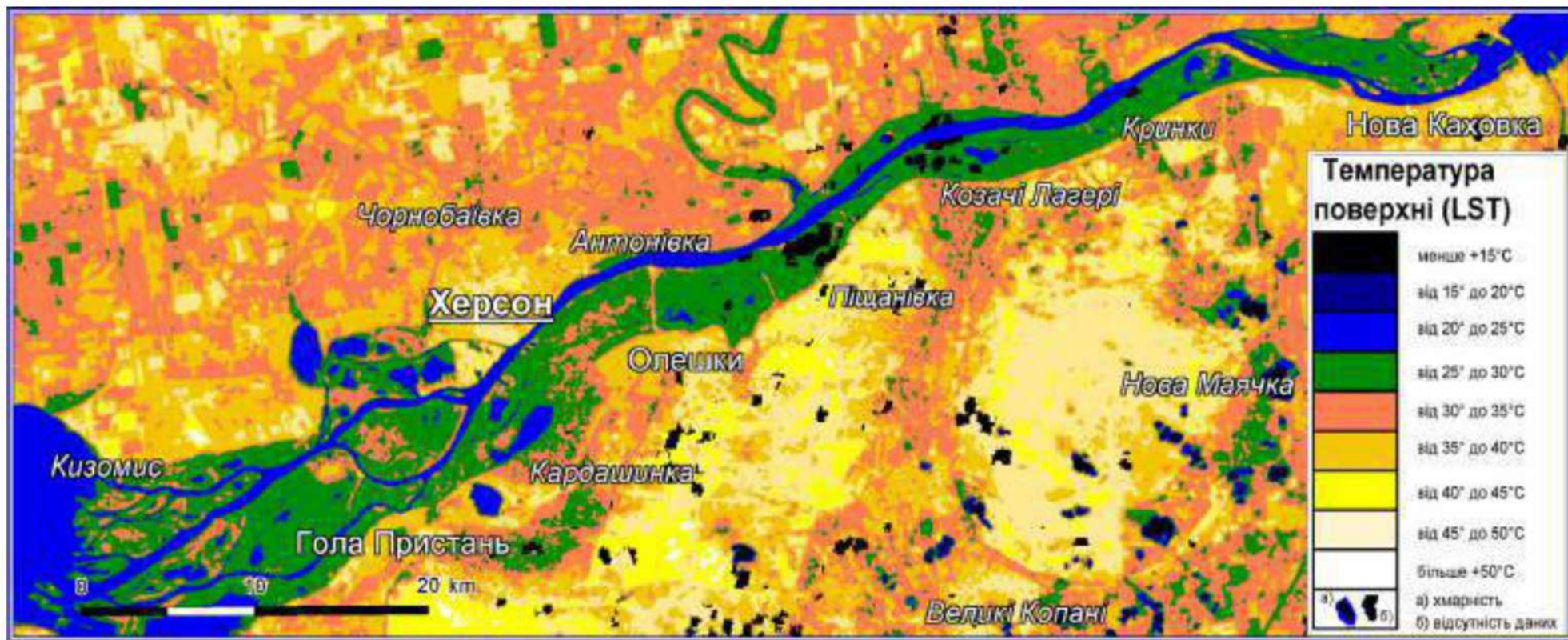


Рис. 2.7. Розподіл температур земної поверхні у долині р. Дніпро до підриву дамби Каховського водосховища станом на 01.06.2023 р.

Fig. 2.7. Distribution of earth surface temperatures in the Dnipro River Valley before the Kakhovka Reservoir dam was blown up as of June 01, 2023.



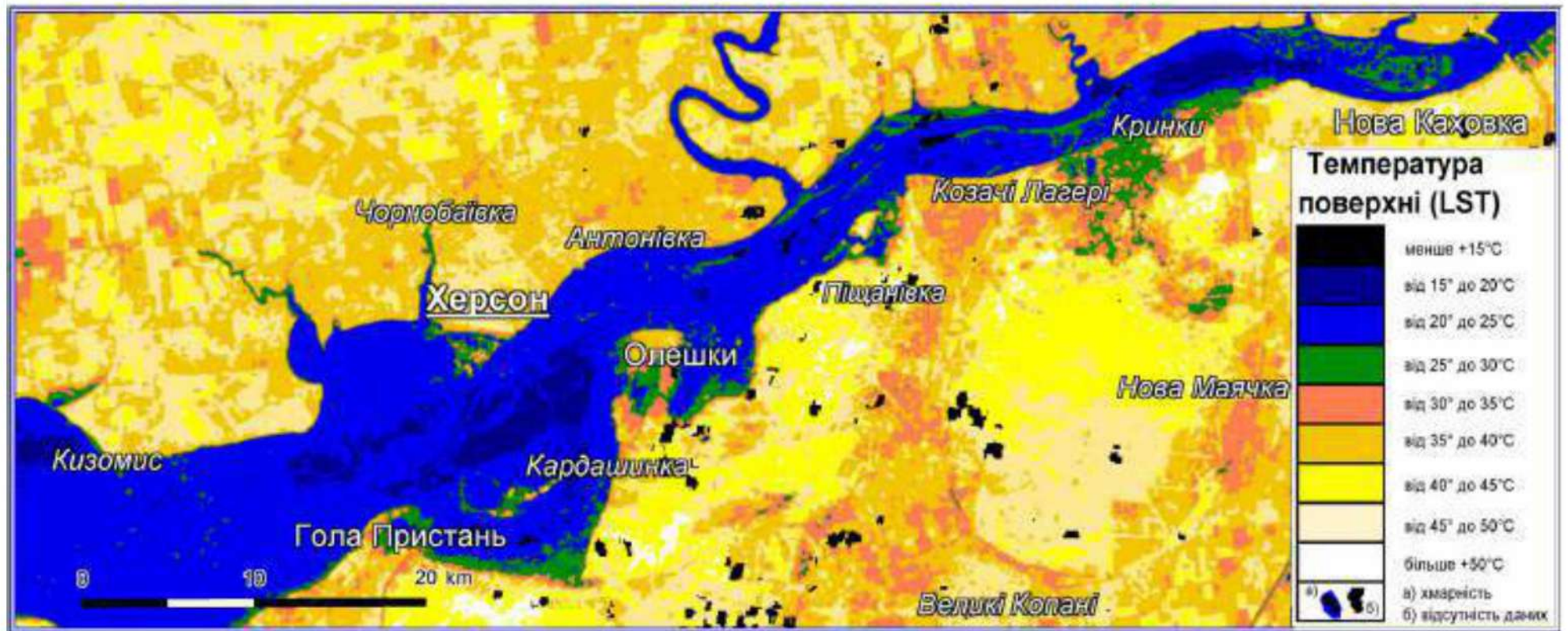


Рис. 2.8. Розподіл температур земної поверхні у долині р. Дніпро на третій день після підриву дамби Каховського водосховища, стан на 09.06.2023 р.

Fig. 2.8. Distribution of ground surface temperatures in the Dnipro River Valley on the third day after the Kakhovka Reservoir dam was blown up as of June 09, 2023.

2.3. Оцінка наслідків затоплення населених пунктів та інфраструктури внаслідок руйнування Каховської ГЕС

Унаслідок руйнування греблі Каховської ГЕС 6 червня 2023 р. на площі приблизно у 700 км² від затоплення постраждало близько 80 населених пунктів уздовж берегів Дніпра та Інгульця. З усієї затопленої території найбільше постраждала територія між м. Херсон та Збур'ївською і Келегейською аренами Олешківських пісків, які представляють собою простору низину.

У Херсоні повністю затоплений промисловий район Корабел – південна частина Корабельного району, відділена від решти міста протокою Кошовою. У районі, крім житлової забудови, зосереджені промислові об'єкти, зокрема Херсонський кораблебудівний завод, що мало супутні екологічні наслідки. Також на західних околицях Херсона відбулося підтоплення територій через підняття рівня води у р. Веревчина. Західніше міста затоплена долина р. Білозерка.

Особливо критична ситуація склалася у м. Олешки та селищах Кардашинка та Кохани, які були повністю затоплені, що створило високу загрозу для життя населення та в сукупності із затопленням найближчих автомагістралей та перебуванням цієї території під російською окупацією ускладнювало евакуацію. Восени 2022 р. російськими військами під час відступу від Херсона на лівобережжя Дніпра було зруйновано Антонівський міст, який з'єднував Олешки з Правобережжям та потенційно міг стати евакуаційним шляхом.

Також майже повного затоплення зазнали Гола Пристань, Мала та Велика Кардашинка, які перебували на межі розливу вод Каховського водосховища.

Населені пункти уздовж русла Дніпра від Нової Каховки до Козачих Лагерів також зазнали значного затоплення. Так, у Новій Каховці було затоплено прибережну паркову зону та найближчі до річки вулиці. У Дніпріях, Іванівці та Козачих Лагерях також відбулось затоплення прибережної зони. Населені пункти Корсунка та Кринки зазнали майже повного затоплення. Критична ситуація склалася у Кринках, оскільки територія між Кринками та Козачими Лагерями представляє собою заплаву терасу, яка також була повністю затоплена разом із західною частиною Корсунського загальнозоологічного заказника. На правобережжі Дніпра затопленню піддалися прибережні частини населених пунктів, зокрема уздовж русла Інгульця на відстані у близько 110 км від гирла. Затоплення зазнали населені пункти Калинівське, Снігурівка, Афанасіївка, Нововасилівка, Новотимофіївка, Михайлівка, Федорівка, Зарічне та ін., населений пункт Афанасіївка було повністю ізолювано водою (рис. 2.9–2.11).

2.3. Assessment of the consequences of the flooding of settlements and infrastructure as a result of the destruction of the Kakhovka Dam

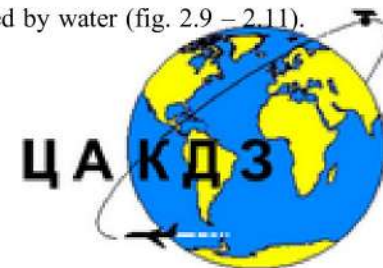
Due to the destruction of the Kakhovka dam about 80 settlements along the banks of the Dnipro and Ingulets rivers were affected by the flooding within the area of approximately 700 km². Of the entire flooded territory, the area between the city of Kherson and the Zburiyiv and Kelekey arenas of the Oleshkiv sands, which represent a vast lowland, was the most affected.

In the city of Kherson, the Korabel industrial district – the southern part of the Korabel district, separated from the rest of the city by the Koshova Strait - was completely flooded. In addition to residential buildings, industrial facilities are concentrated in the area, particularly the Kherson Shipyard, which had accompanying environmental consequences. Also, on the western outskirts of Kherson, territories were flooded due to rising water levels in the Verevchyna River. The valley of the Bilozerkha River west of Kherson was also flooded.

The situation was particularly critical in the cities of Oleshky and the villages of Kardashynka and Kokhany, which were completely flooded. That created a high threat to the lives of their population and, combined with the flooding of the nearest highways and the fact that this territory was under russian occupation, made evacuation difficult. In the fall of 2022, russian troops retreated from Kherson to the left bank of the Dnipro River and destroyed the Antonivskyi Bridge, which connected Oleshky to the Right Bank and could become an evacuation route.

Also, Hoha Prystan Mala and Velyka Kardashynka, on the verge of spilling the waters of the Kakhovka Reservoir, were almost completely flooded.

Settlements along the Dnipro River from Novaya Kakhovka to Kozachy Lagery also experienced significant flooding. In Nova Kakhovka, the coastal park zone and the streets closest to the river were flooded. Flooding of the coastal zone also occurred in Dnipriany, Ivanivka, and Kozachy Lagery. The settlements of Korsunka and Krynyky were almost completely flooded. A critical situation arose in Krynyky, as the territory between Krynyky and Kozachy Lagery is a floodplain terrace, which was also completely flooded along with the western part of the Korsun general zoological reserve. On the right bank of the Dnipro River, coastal parts of settlements were flooded, including along the Ingulets River, which is a covered area approximately 110 km from its mouth. The settlements of Kalynivske, Snigurivka, Afanasiivka, Novovasyivka, Novotymofiiivka, Mykhailivka, Fedorivka, Zarichne and others were flooded, the settlement of Afanasiivka was entirely isolated by water (fig. 2.9 – 2.11).



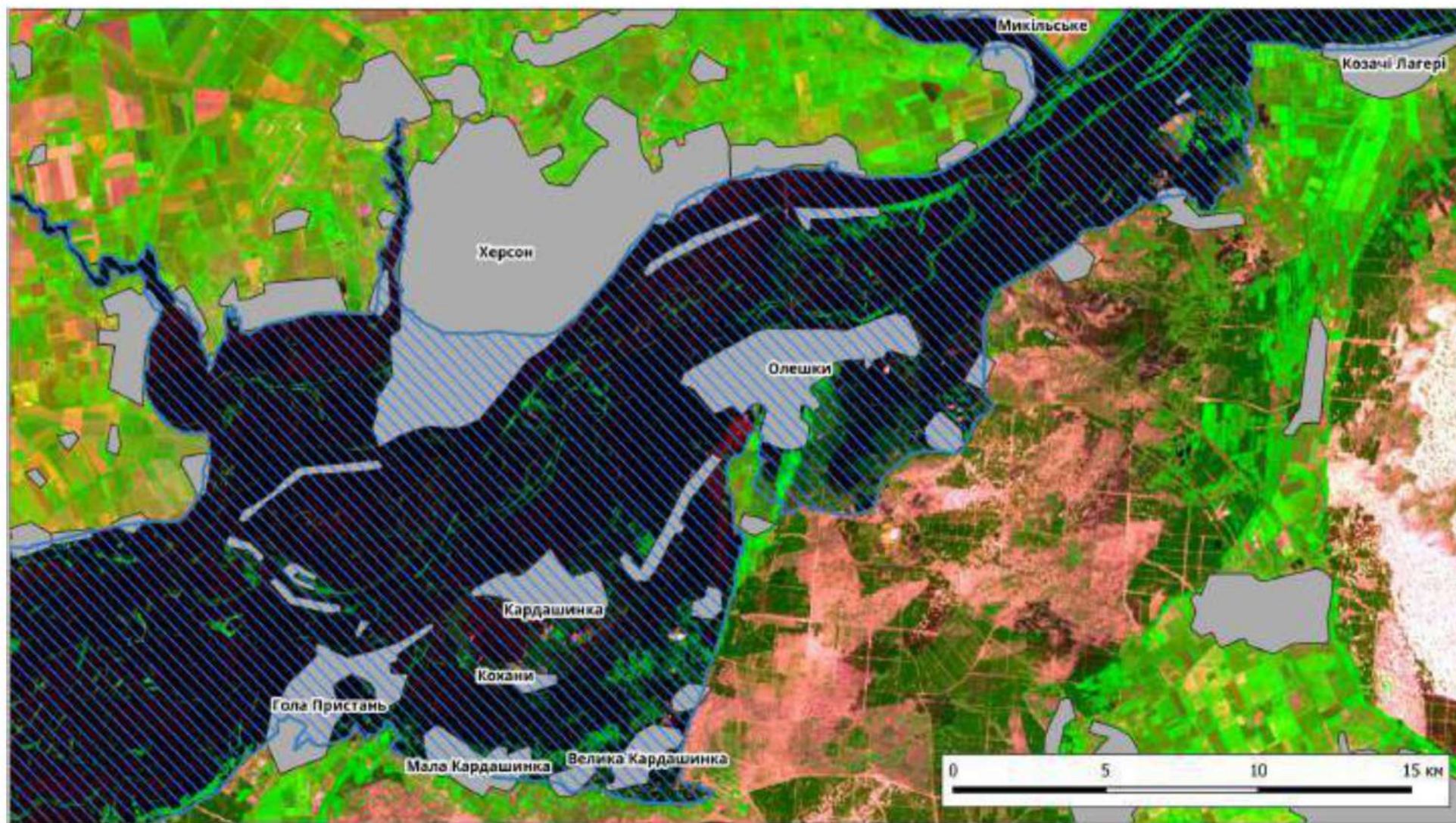


 Затоплені та підтоплені території станом на 9 червня 2023 р.
 Flooded areas on 9 June, 2023

 Населені пункти
 Settlements

Рис. 2.9. Окреслення населених пунктів, що найбільше постраждали від затоплення. Зображення, отримане супутником Landsat-9 за 09.06.2023 р. Кольоровий композит каналів у штучних кольорах “червоний – ближній інфрачервоний – синій”

Fig. 2.9. Outline of settlements most affected by flooding. Image obtained by the Landsat-9 satellite on June 9, 2023. Colour composite of channels in artificial colours red – near infrared – blue



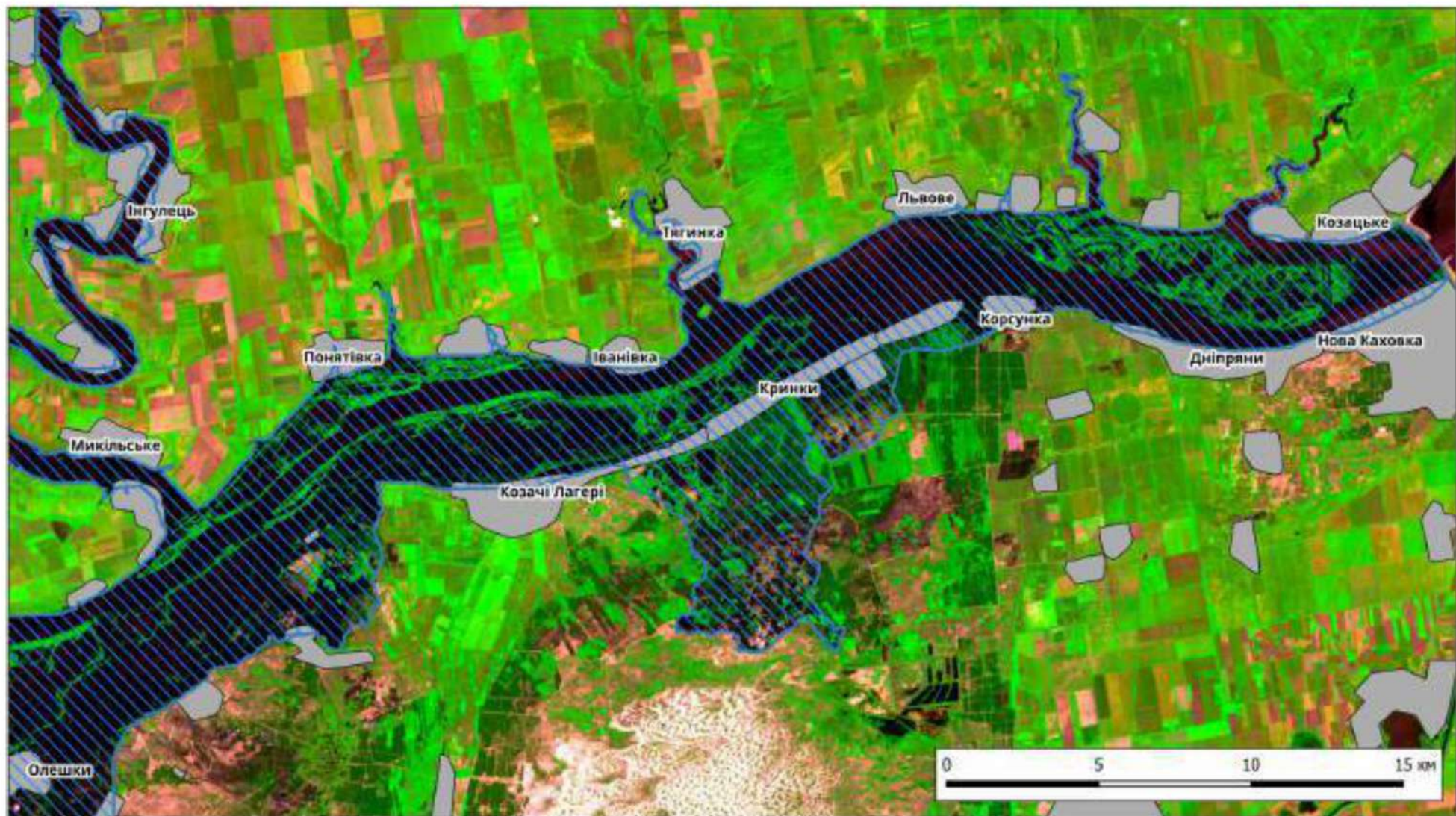
 Затоплені та підтоплені території на 9 червня 2023 р.
Flooded areas on 9 June, 2023

 Населені пункти
Settlements

Рис. 2.10. Окреслення населених пунктів, що найбільше постраждали від затоплення поблизу м. Херсон. Зображення, отримане супутником Landsat-9 за 09.06.2023 р. Кольоровий композит каналів у штучних кольорах “червоний – ближній інфрачервоний – синій”

Fig. 2.10. Outline of settlements most affected by flooding near Kherson city, image obtained by the Landsat-9 satellite on June 9, 2023. Color composite of channels in artificial colors red – near infrared – blue





Затоплені та підтоплені території на 9 червня 2023 р.
Flooded areas on 9 June, 2023

Населені пункти
Settlements

Рис. 2.11. Окреслення населених пунктів, що найбільше постраждали від затоплення нижче зруйнованої греблі Каховської ГЕС. Зображення, отримане супутником Landsat-9 за 09.06.2023 р. Кольоровий композит каналів у штучних кольорах “червоний – ближній інфрачервоний – синій”

Fig. 2.11. Outline of settlements most affected by flooding near Kahovka dam, image obtained by the Landsat-9 satellite on June 9, 2023. Color composite of channels in artificial colors red – near infrared – blue

Окрім великої кількості населених пунктів та об'єктів природно-заповідного фонду у межах затоплених територій Херсонщини зосереджено промислові та енергетичні об'єкти, які також постраждали від затоплення. Серед них агропромислові об'єкти, сонячні електростанції та електропідстанції, порти Херсона, заводи, нафтові термінали та ін. Основна кількість підтоплених об'єктів перебували на окупованих територіях, тому більшість з них на момент руйнування Каховської ГЕС не функціонували. Однак, шкода економіці України та навколишньому середовищу завдана за рахунок пошкодження устаткування, частина якого виявилася змитою водами. Зокрема, під час змиву паливно-мастильних матеріалів та інших рідин (рис. 2.12).

Переважає кількість затоплених об'єктів зосереджено у Херсоні, Олешках та Голій Пристані. Так, у Херсоні затоплено фактично всі промислові об'єкти Корабельного району:

- Херсонський суднобудівельний завод;
- Херсонський річковий порт;
- Суднобудівне підприємство “Палада”;
- Херсонський морський торговельний порт;
- Херсонська нафтобаза;
- Нафтогавань;
- Кілька малих підприємств на території колишньої Таврійської будівельної компанії.

Через значні затоплення великих промислових підприємств у Херсоні виникли серйозні екологічні загрози внаслідок забруднення територій нафтопродуктами. У Голій Пристані затоплено елеватор, електропідстанція та завод камішитових плит.

Значних руйнувань зазнала інфраструктура м. Олешки внаслідок практично суцільного затоплення міста. З-поміж них – Херсонський целюлозопаперовий комбінат, Машинобудівний завод “Аметист”, Бетонний завод, електропідстанція (150 кВ) та 3 сонячних електростанції.

Серед інших об'єктів, що постраждали від затоплення, треба назвати промзону Нової Каховки, елеватори у Козацькому та біля Тягинки, а також сонячну електростанцію біля Нововасилівки на березі Інгульця.

Виникла критична ситуація та труднощі з евакуацією населення Олешок, зокрема і через затоплення важливих доріг – автошляхів М 14 та Р 57 уздовж усієї ділянки Олешки – Гола Пристань.

In addition to many settlements and objects of the nature reserve fund, industrial and energy facilities are concentrated within the Kherson region's flooded territories, which were also affected by flooding. Among them are agro-industrial facilities, solar power plants and substations, Kherson ports, factories, oil terminals, etc. The main number of flooded objects were located in the occupied territories. Therefore, most of them were not functioning at the time of the destruction of the Kakhovka Dam; however, the damage to the economy of Ukraine and the environment was caused by damage to the equipment, part of which was washed away by water and due to the washing away of fuel and lubricants materials and other liquids (Fig. 2.12).

Most flooded objects are concentrated in Kherson, Oleshky and Hola Prystan.

In Kherson, virtually all industrial facilities of the Ship district were flooded:

- Kherson Shipbuilding Plant;
- Kherson river port;
- Shipbuilding enterprise “Palada”;
- Kherson sea trade port;
- Kherson Oil Base;
- Oil harbour;
- Several small enterprises on the territory of the former Tavriya construction company.

Due to the significant flooding of large industrial enterprises in Kherson, serious environmental threats arose from contaminated territories with oil products.

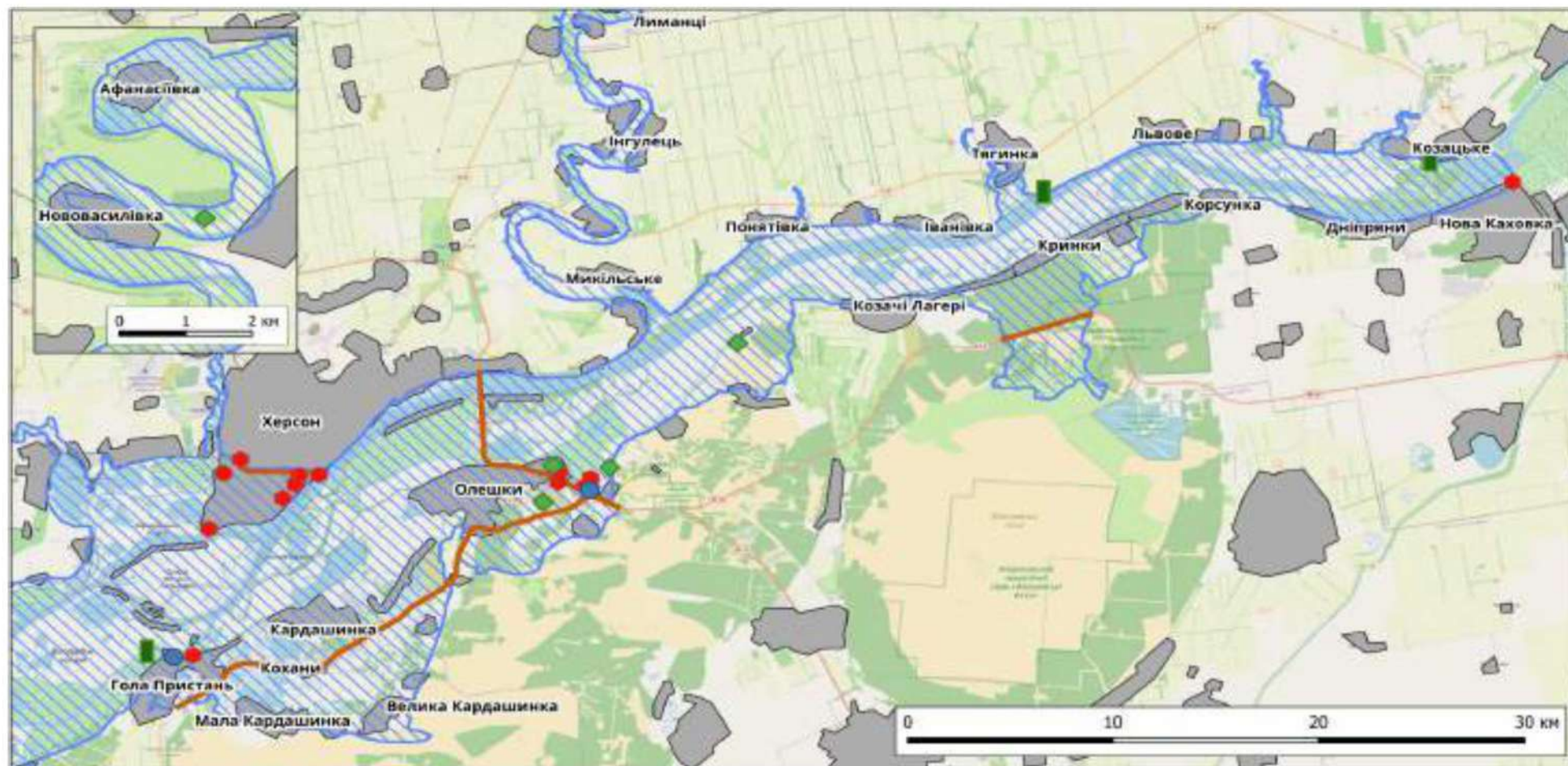
In Hola Prystan, an elevator, an electric substation and a reed board factory were flooded.

The infrastructure of the city of Oleshki was seriously damaged due to its almost complete flooding. Among them are the Kherson pulp and paper mill, Amethyst machine-building plant, concrete plant, electric substation (150 kV) and three solar power plants.

Among other objects affected by the flooding, it is worth noting the industrial zone of Novaya Kakhovka, the elevators in Kozatske and near Tiahynka, as well as the solar power plant near the village of Novovasylivka on the shore of Ingulets.

The critical situation and difficulties with evacuating the population of Oleshky also occurred due to the flooding of important roads: highway M 14 and R 57 along the entire section of Oleshky – Hola Prystan.





-  Затоплені та підтоплені території на 9 червня 2023 р.
Flooded areas on 9 June, 2023
-  Промислові об'єкти
Industrial facilities
-  Магістралі
Roads

-  Електричні підстанції
Electric substations
-  Сонячні електростанції
Solar power plants
-  Елеватори
Agricultural elevators

Рис. 2.12. Картохема затоплених промислових та інфраструктурних об'єктів внаслідок руйнування Каховської ГЕС

Fig. 2.12. Map-scheme of the flooded infrastructure after the Kakhovka Dam destruction



2.4. Вплив затоплення на природоохоронні території нижнього Дніпра

Тільки у нижній течії, від Каховської ГЕС до Дніпровсько-Бузького лиману, р. Дніпро зберегла свій порівняно природний стан. Заплавно-літоральні комплекси дельти Дніпра є осередком значного біорізноманіття і належать до Рамсарських угідь [19]. З 2015 р. їх охороняють у складі Національного природного парку (НПП) “Нижнядніпровський” (рис. 2.13).

Унаслідок руйнації Каховської ГЕС майже вся територія НПП була затоплена. Стрімке підвищення рівня води призвело до масової загибелі диких тварин та унікальних рослин, а екосистеми парку зазнали катастрофічного впливу [20].

Для визначення динаміки затоплення водно-болотних угідь було залучено часовий ряд (рис. 2.14) доступних супутникових знімків Sentinel-1 [21], одержаних до моменту катастрофи, 2 червня, та після неї – 9, 14 і 21 червня 2023 р.



Рис. 2.13. Карта функціонального зонування Національного природного парку “Нижнядніпровський”. Джерело: <http://nppn.org.ua/news/interaktivna-mapa-nacionalnogo-parku>

2.4. The impact of flooding on protected areas of the lower Dnipro

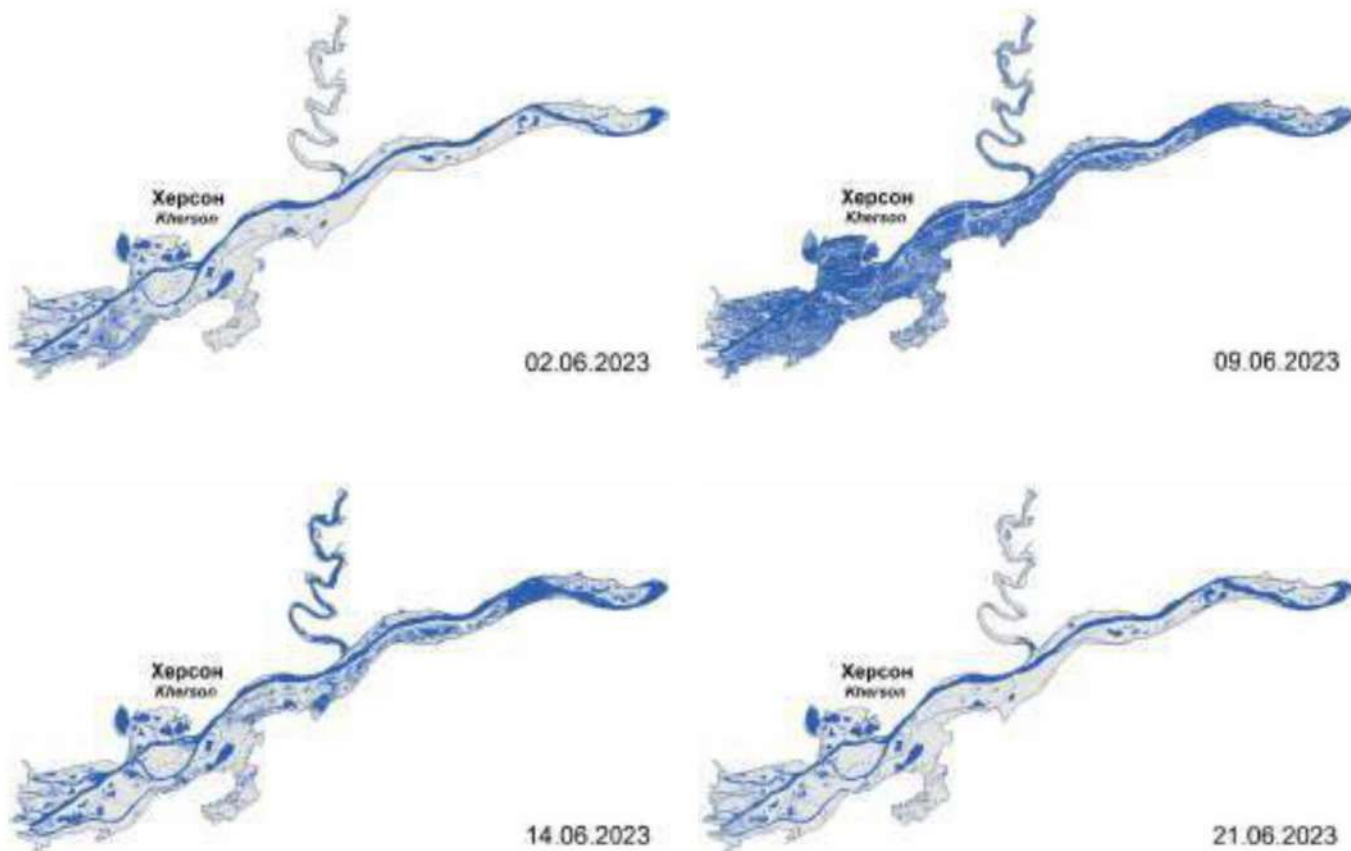
The Dnipro River preserved a relatively natural state only in the lower course, from the Kakhovka Dam to the Dnipro-Bug Estuary. The floodplain and littoral complexes of the Dnipro delta are a biodiversity hotspot and belong to the Ramsar sites [19]. Since 2015, they have been protected as part of the Lower Dnipro National Nature Park (Fig. 2.13).

The destruction of the Kakhovka Dam flooded almost the entire territory of the nature park. The rapid rise in the water level led to the mass death of wild animals and unique plants, and the park's ecosystems were catastrophically affected [20].

A time series of available Sentinel-1 satellite images [21] (Fig. 2.14) obtained before the disaster, on June 2, and after it – on June 9, 14, and 21, 2023 – was used to determine the dynamics of wetlands flooding.

Fig. 2.13. Functional zoning map of the Lower Dnipro National Nature Park. Source: <http://nppn.org.ua/news/interaktivna-mapa-nacionalnogo-parku>





Джерело: Фейсбук-сторінка парку/ Source: Park's FB page



Водна поверхня
Water surface

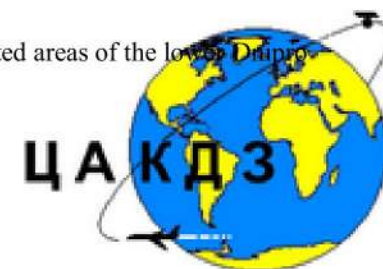
Межі* природоохоронних територій
Boundaries of protected areas

* Межі, визначені за Всесвітньою базою даних природоохоронних територій, включають НПП "Нижньодніпровський"

* The boundaries are defined according to the World Database of Nature Protected Areas (WDPA) and include the Lower Dnipro National Nature Park

Рис. 2.14. Динаміка затоплення водно-болотних угідь у межах природоохоронних територій нижнього Дніпра, за даними супутника Sentinel-1

Fig. 2.14. Dynamics of wetland flooding within the protected areas of the lower Dnipro by Sentinel-1 SAR data



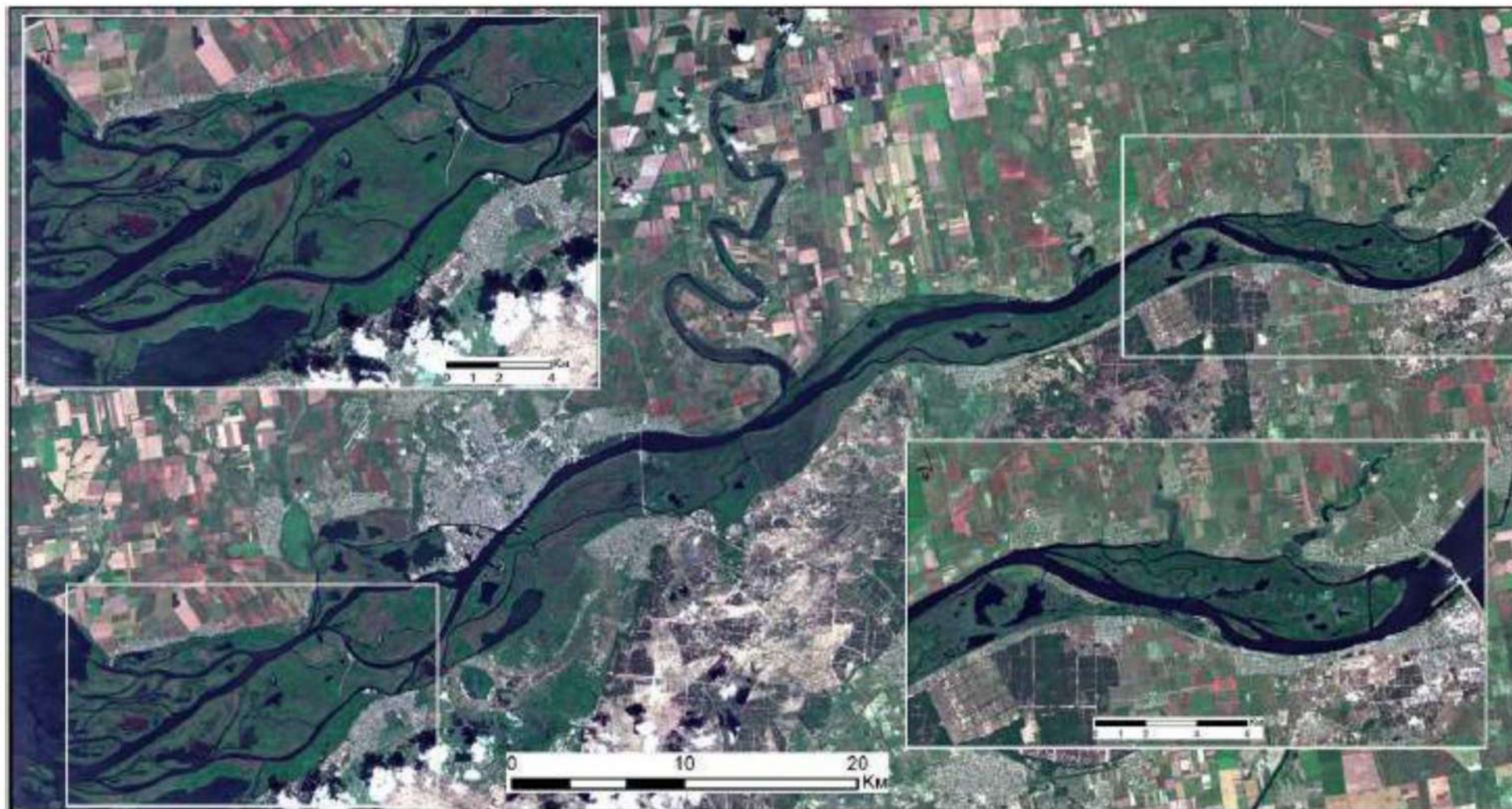


Рис. 2.15. Зображення природоохоронних територій нижнього Дніпра, отримане супутником Sentinel-2 3 та 5 червня 2023 р.

Fig. 2.15. Image of protected areas of the Lower Dnipro River, acquired by the Sentinel-2 satellite on June 3 and 5, 2023.

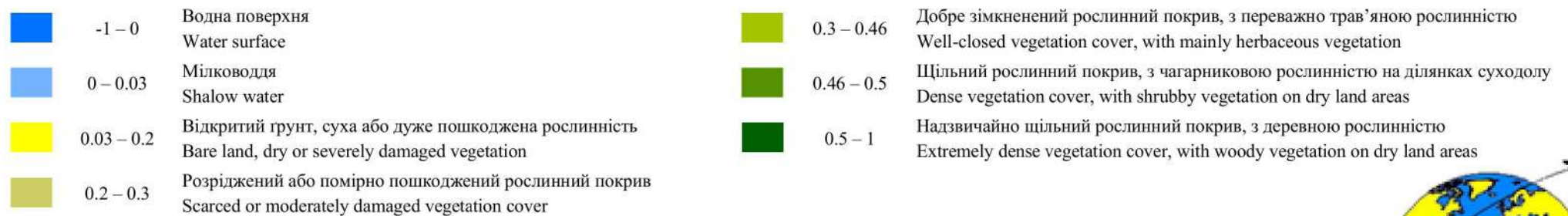
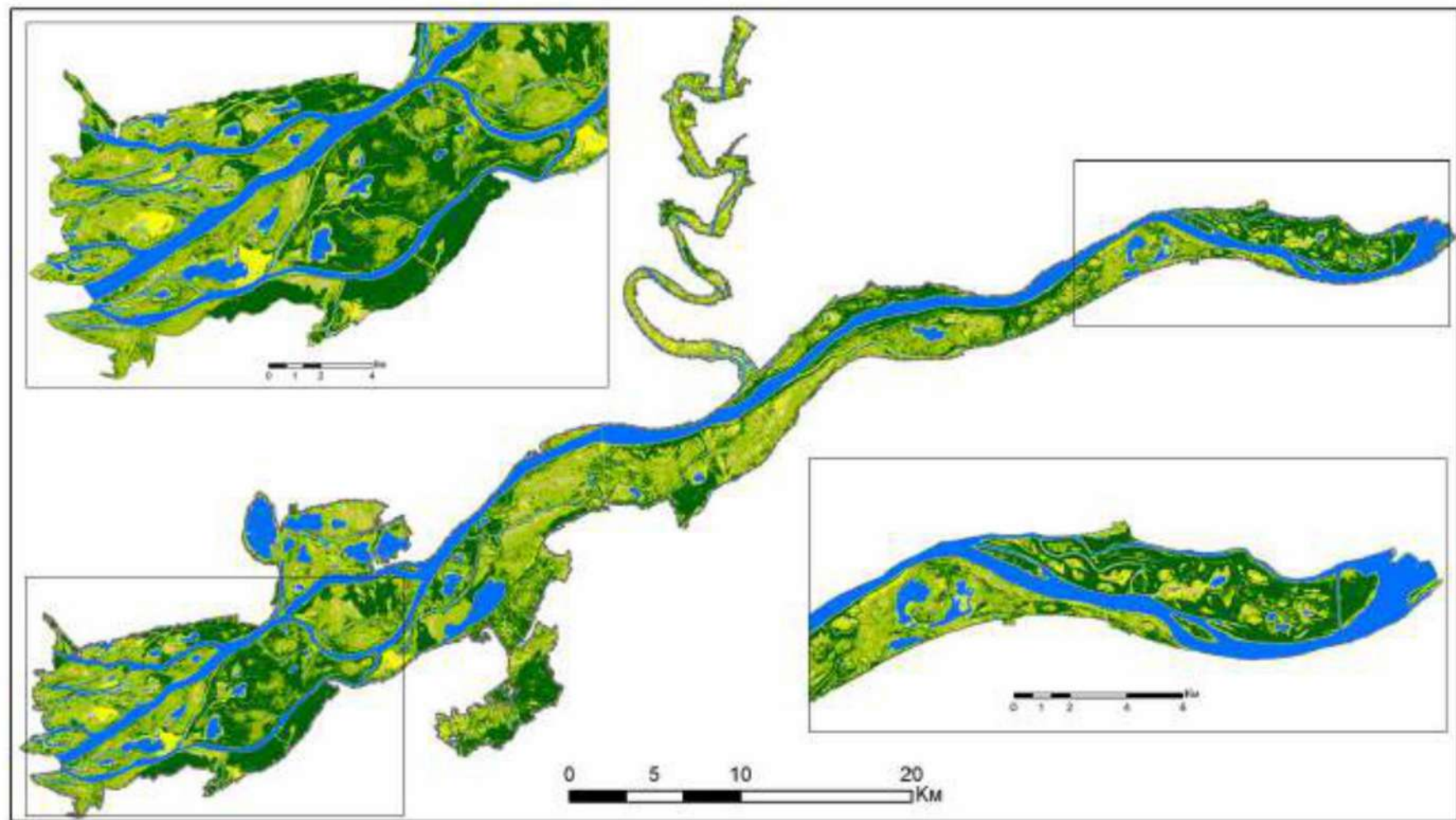
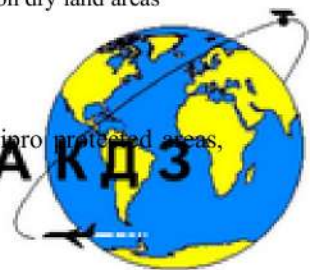


Рис. 2.16. Просторовий розподіл індексу NDVI природоохоронних територій нижнього Дніпра, розрахований за знімками Sentinel-2 3 та 5 червня 2023 р.

Fig. 2.16. The NDVI index spatial distribution of the Lower Dniro protected areas, calculated from the Sentinel-2 images of June 3 and 5, 2023.



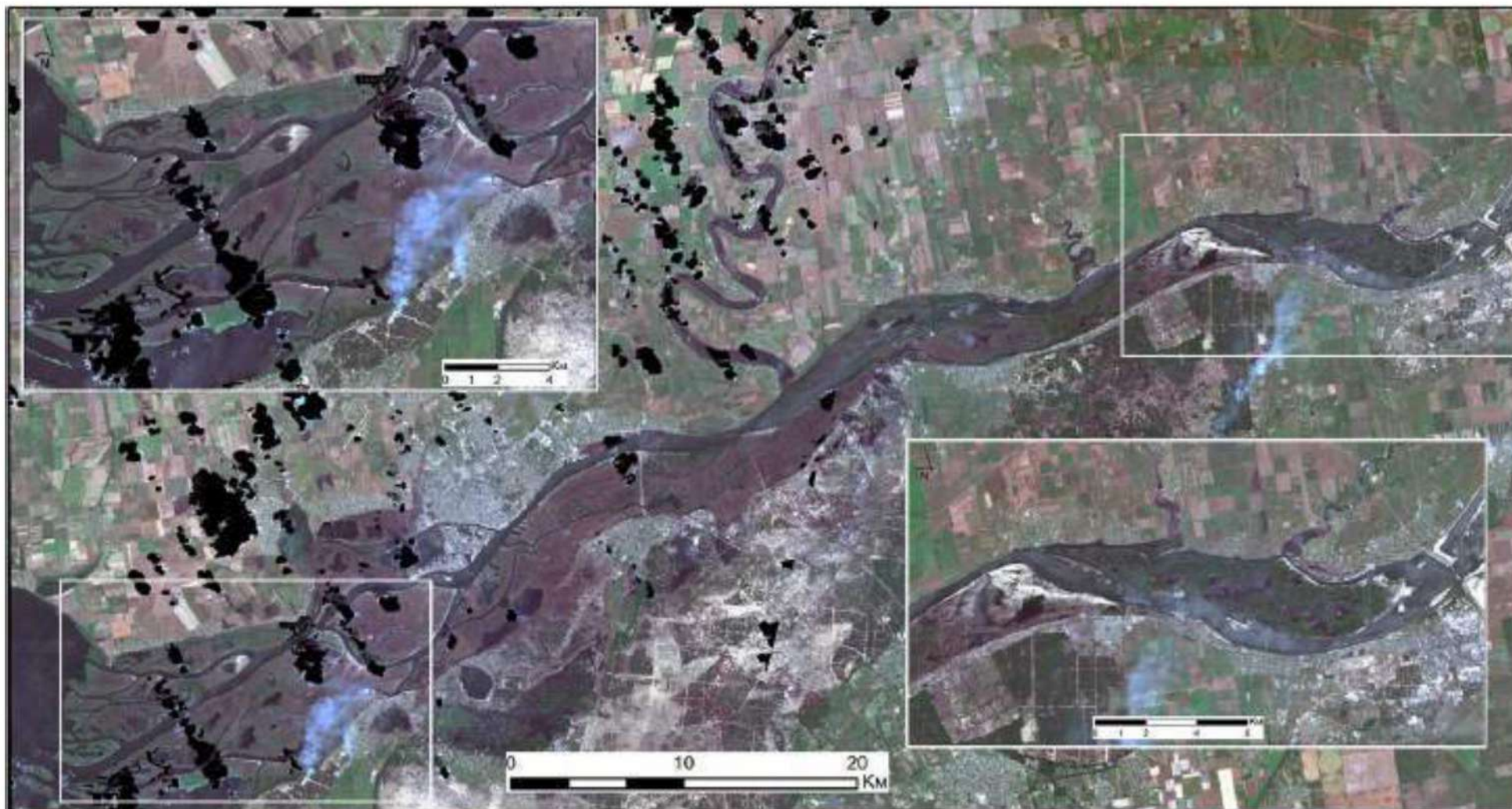
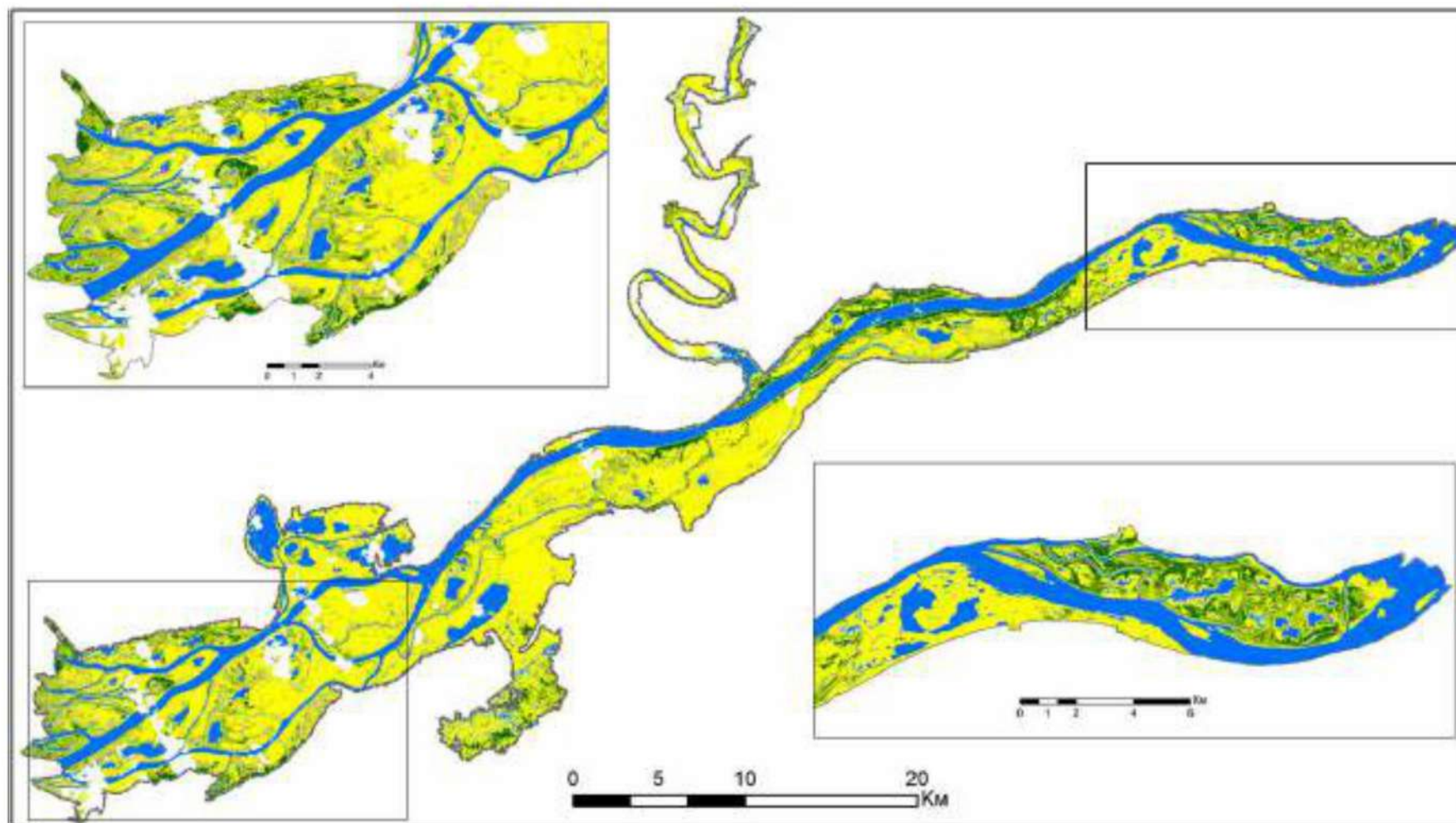


Рис. 2.17. Зображення природоохоронних територій нижнього Дніпра, отримані супутником Sentinel-2 20 та 23 червня 2023 р. (чорні області відображають маску хмарності)

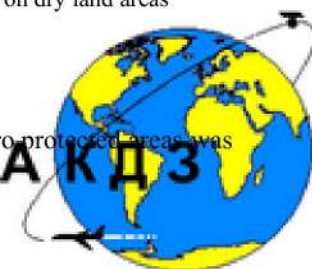
Fig. 2.17. Image of protected areas of the lower Dnipro, acquired by the Sentinel-2 satellite on June 20 and 23, 2023 (black areas refers to cloud mask)



	-1 – 0	Водна поверхня Water surface		0.3 – 0.46	Добре зімкнений рослинний покрив, з переважно трав'яною рослинністю Well-closed vegetation cover, with mainly herbaceous vegetation
	0 – 0.03	Мілководдя Shallow water		0.46 – 0.5	Щільний рослинний покрив, з чагарниковою рослинністю на ділянках суходолу Dense vegetation cover, with shrubby vegetation on dry land areas
	0.03 – 0.2	Відкритий ґрунт, суха або дуже пошкоджена рослинність Bare land, dry or severely damaged vegetation		0.5 – 1	Надзвичайно щільний рослинний покрив, з деревною рослинністю Extremely dense vegetation cover, with woody vegetation on dry land areas
	0.2 – 0.3	Розріджений або помірно пошкоджений рослинний покрив Scarced or moderately damaged vegetation cover			

Рис. 2.18. Просторовий розподіл індексу NDVI природоохоронних територій нижнього Дніпра, розрахований за знімками Sentinel-2 20 та 23 червня 2023 р.

Fig. 2.18. The NDVI index spatial distribution of the lower Dnipro protected areas was calculated from the Sentinel-2 images of June 20 and 23, 2023.



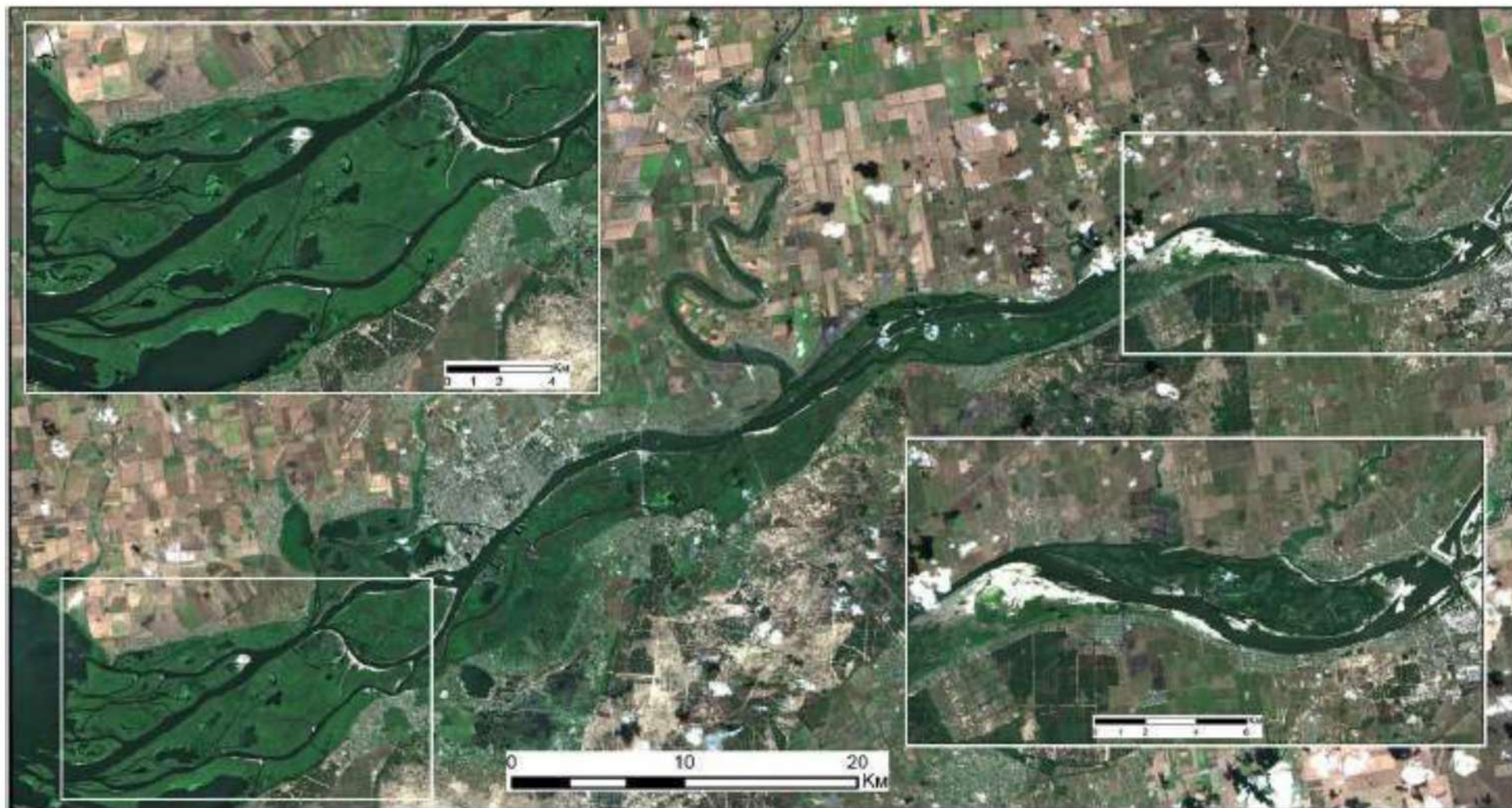


Рис. 2.19. Зображення природоохоронних територій нижнього Дніпра, отримане супутником Sentinel-2 17 серпня 2023 р.

Fig. 2.19. Image of protected areas of the lower Dnipro, acquired by the Sentinel-2 satellite on August 17, 2023.

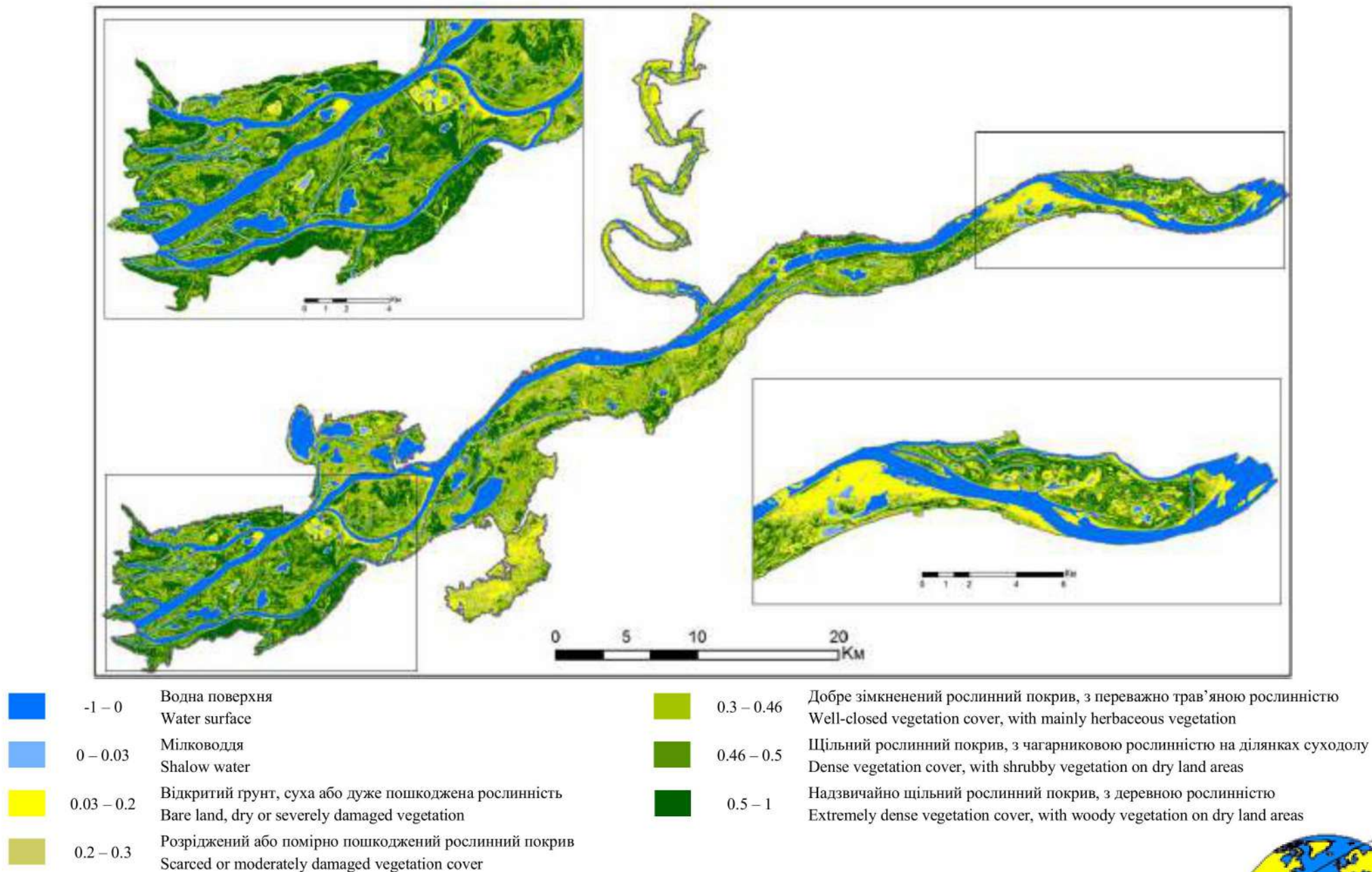


Рис. 2.20. Просторовий розподіл індексу NDVI природоохоронних територій нижнього Дніпра, розрахований за знімками Sentinel-2 17 серпня 2023 р.

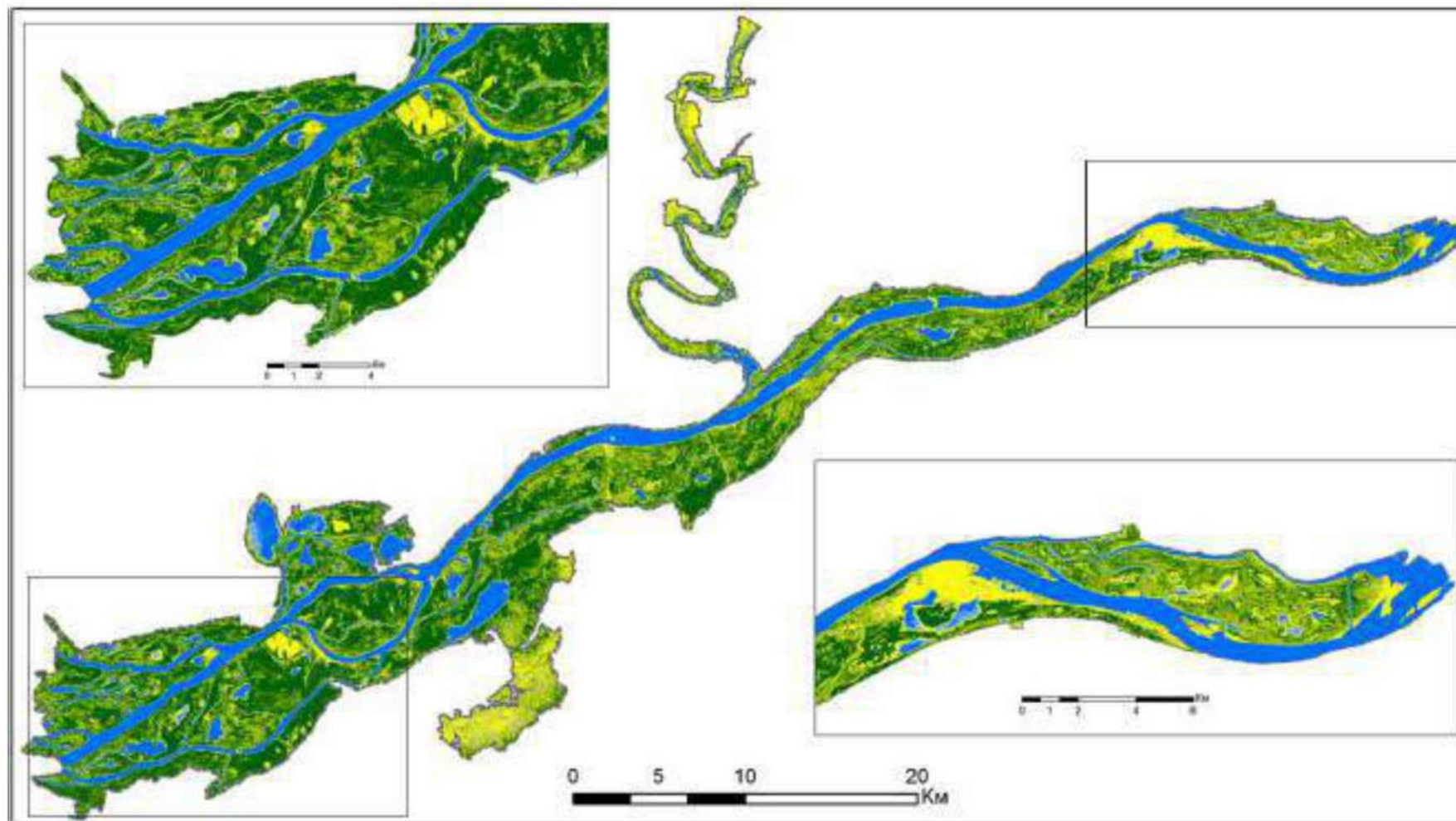
Fig. 2.20. The NDVI index spatial distribution of the lower Dniro protected areas, calculated from the Sentinel-2 images of August 17, 2023.





Рис. 2.21. Зображення природоохоронних територій нижнього Дніпра, отримане супутником Sentinel-2 16 вересня 2023 р.

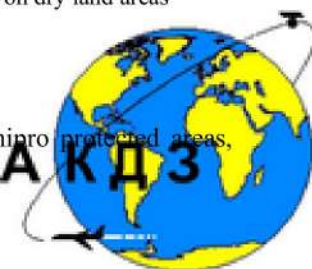
Fig. 2.21. Image of protected areas of the lower Dnipro, acquired by the Sentinel-2 satellite on September 16, 2023.



	-1 – 0	Водна поверхня Water surface		0.3 – 0.46	Добре зімкнений рослинний покрив, з переважно трав'яною рослинністю Well-closed vegetation cover, with mainly herbaceous vegetation
	0 – 0.03	Мілководдя Shallow water		0.46 – 0.5	Щільний рослинний покрив, з чагарниковою рослинністю на ділянках суходолу Dense vegetation cover, with shrubby vegetation on dry land areas
	0.03 – 0.2	Відкритий ґрунт, суха або дуже пошкоджена рослинність Bare land, dry or severely damaged vegetation		0.5 – 1	Надзвичайно щільний рослинний покрив, з деревною рослинністю Extremely dense vegetation cover, with woody vegetation on dry land areas
	0.2 – 0.3	Розріджений або помірно пошкоджений рослинний покрив Scarced or moderately damaged vegetation cover			

Рис. 2.22. Просторовий розподіл індексу NDVI природоохоронних територій нижнього Дніпра, розрахований за знімками Sentinel-2 16 вересня 2023 р.

Fig. 2.22 The NDVI index spatial distribution of the lower Dnipro protected areas, calculated from the Sentinel-2 images of September 16, 2023.



2.5. Моніторинг змін якісного стану вод Дніпровсько-Бузького лиману та акваторії Чорного моря внаслідок катастрофічного спуску Каховського водосховища

Зазвичай оцінка якості води проводиться за допомогою алгоритмів, що базуються на використанні супутникових даних, а також на основі наземних вимірювань параметрів якості води. Низка наукових досліджень [24] довели, що алгоритми співвідношення спектральних смуг за даними дистанційного зондування є ефективними для оцінки параметрів якості води у водоймах, таких, як концентрація хлорофілу-а (Chl-a), концентрація фікоціанінів (PC), каламутність води (Turb), глибина Секкі (SD) або вміст завислих твердих речовин (SPM).

Відповідне аналогічне дослідження виконано для території Дніпровсько-Бузького лиману, а саме північно-західної частини акваторії Чорного моря від м. Очаків до м. Чорноморськ, включаючи прибережні води Кінбурнської та Тендерівської кос, Ягорлицьку та Тендерівську затоки. На основі багатоспектральних даних з супутника Sentinel-3 OLCI за період з 5 червня до 26 вересня 2023 р. було розраховано наступні показники якості води:

Прозорість води за диском Секкі (Secchi depth - SD). Показник наявності зважених часток у воді, одиниця вимірювання – метр. Чим менше зважених часток у воді, тим прозоріша вода і диск Секкі лишається видимим на більшій відстані. У дослідженні застосовано алгоритм розрахунку SD [25] для обчислень за Sentinel-2 та адаптований [24] для використання Sentinel-3 (рис. 2.23):

$$SD = 0.036x((Red)/(VNIR_{740} \times VNIR_{842}))+0.79.$$

Каламутність води (Turbidity, Normalized Difference Turbidity Index - NDTI). Показник умісту зважених часток у воді, одиниці вимірювання – NTU - нефелометричні одиниці каламутності (одиниця каламутності у воді, виміряна за допомогою нефелометра та заснована на кількості розсіяного світла). Чим вище концентрація зважених речовин у воді, тим вона здається бруднішою і тим вище її каламутність. Каламутність включає в себе бруд, осад, надмірний ріст водоростей, фітопланктону, глини і мулу. У дослідженні застосовано алгоритм розрахунку показника каламутності [26] (рис. 2.24):

$$NDTI = (Green-Red)/(Green+Red).$$

Показники прозорості та каламутності оцінювалися за даними Sentinel-3 у періоди до катастрофи, одразу після, а також через 1, 2 та 3 місяці. Інтенсивне цвітіння, характерно передусім для водойм зі слабкими течіями, зокрема, для каскаду Дніпровських водосховищ, що представлені безпосередньо у цьому виданні, Дніпровсько-Бузькому лимані.

2.5. Monitoring the qualitative state changes of waters in the Dnipro-Bug Estuary and the Black Sea basin due to the catastrophic discharge event from the Kakhovka Reservoir

Water quality is usually assessed using empirical algorithms based on satellite data and ground-based measurements of water quality parameters. Several scientific studies [24] have proven that algorithms for the ratio of spectral bands based on Earth remote sensing data are practical for evaluating water quality parameters in reservoirs, such as the concentration of chlorophyll-a (Chl-a), the concentration of phycocyanins (PC), water turbidity (Turb), Secchi depth (SD) or suspended solids content (SPM).

A corresponding/analogous study was carried out on the territory of the Dnipro-Buzka estuary, namely the northwestern part of the Black Sea water area from the city of Ochakiv to the city of Chornomorsk, including the coastal waters of the Kinburn and Tenderivska kos, Yagorlytska and Tenderivska bays. Based on multispectral optical data from the Sentinel-3 OLCI satellite for the period from June 5 to September 26, 2023, the following water quality indicators were calculated:

Water transparency according to the Secchi depth (SD). The units of measurement are meters for the indicator of the presence of suspended particles in water. The fewer suspended particles in the water, the more precise the water and the Secchi disc remain visible at a greater distance. The SD calculation algorithm [25] for Sentinel-2 calculations and adapted [24] for Sentinel-3 use is used in the study (Fig. 2.23):

$$SD = 0.036x((Red)/(VNIR_{740} \times VNIR_{842}))+0.79.$$

Water turbidity (Normalized Difference Turbidity Index - NDTI). Indicator of the content of suspended particles in water, units of measurement - NTU - nephelometric units of turbidity (a unit of turbidity in water, measured with a nephelometer and based on the amount of scattered light). The higher the suspended matter concentration in the water, the dirtier it looks and the higher the turbidity. Turbidity includes dirt, sediment, excessive algae growth, phytoplankton, clay and silt. The research uses the algorithm for calculating the turbidity index [26] (Fig. 2.24):

$$NDTI = (Green-Red)/(Green+Red).$$

Transparency and turbidity indicators were evaluated from Sentinel-3 data in the periods before the disaster, immediately after, as well as after 1, 2 and 3 months. Intense flowering is characteristic, first of all, for water bodies with weak currents, in particular, such as the cascade of the Dnipro reservoirs and directly in the Dnipro-Buzka estuary presented in this publication.



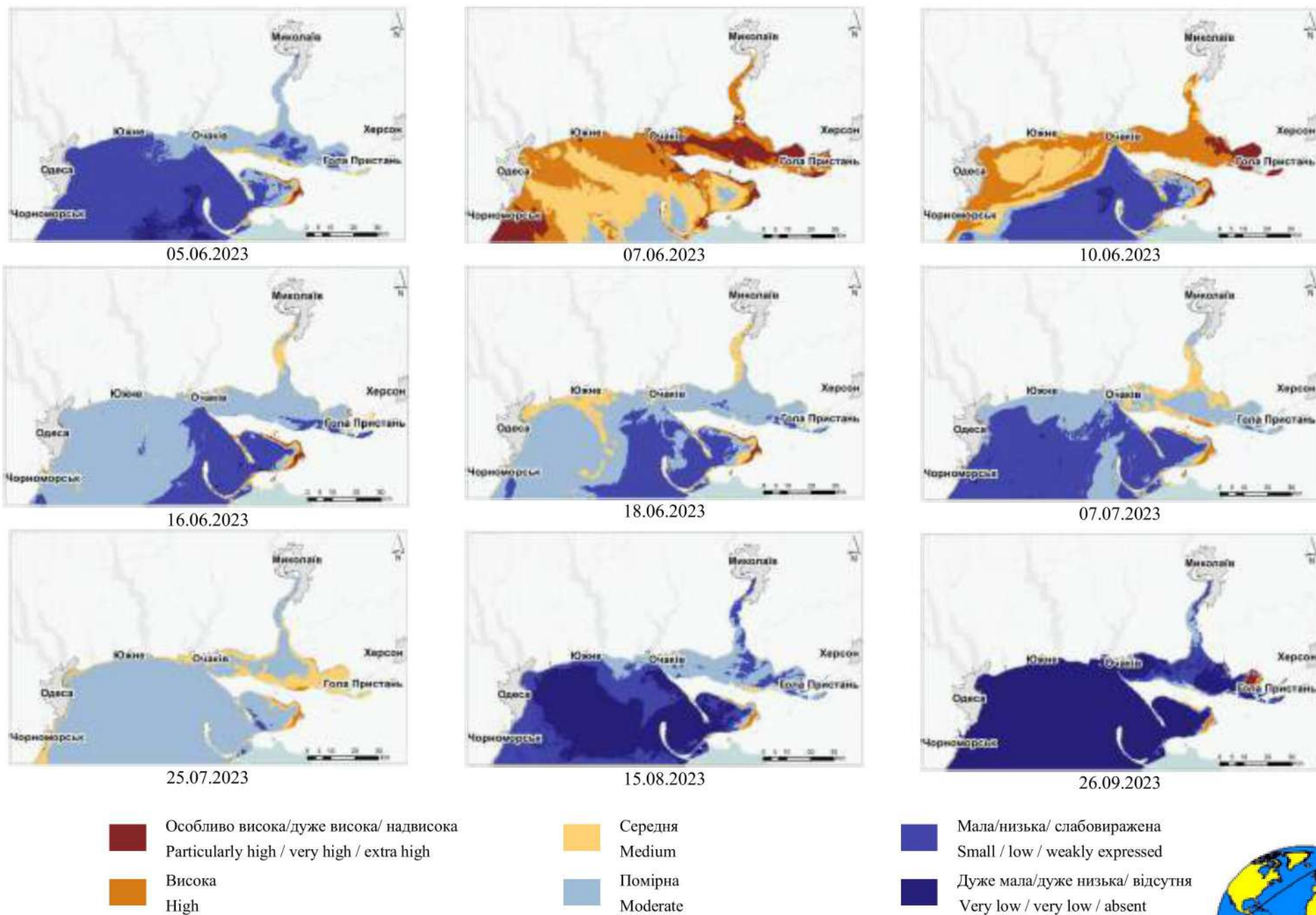


Рис. 2.23. Динаміка прозорості води за диском Секкі (Secchi Depth - SD) у Дніпровсько-Бузькому лимані, отримана за 2023 р. за знімками Sentinel-3

Fig. 2.23. Dynamics of water transparency according to Secchi depth (SD) in the Dniro-Buzka estuary obtained in 2023 from the Sentinel-3 images



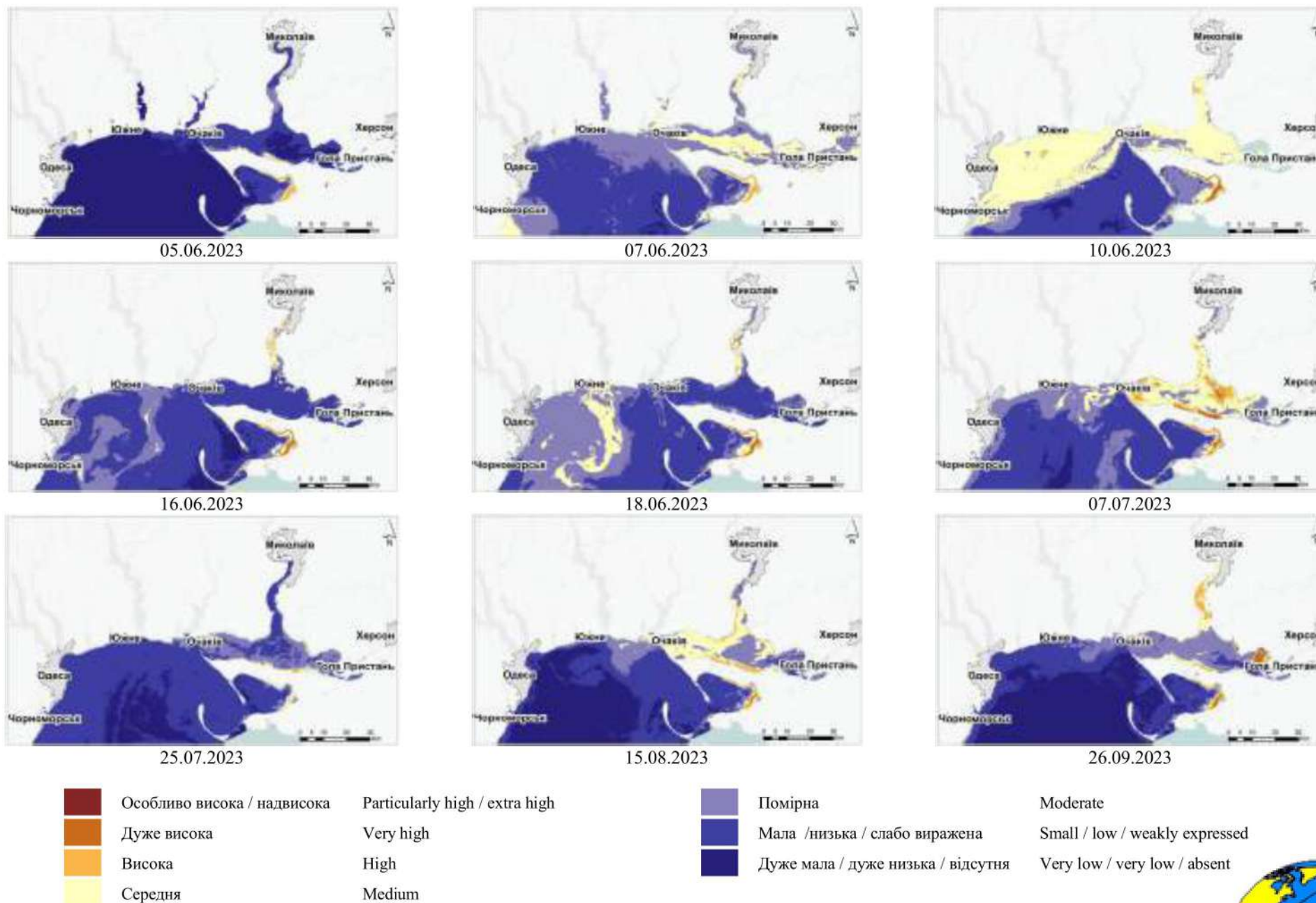
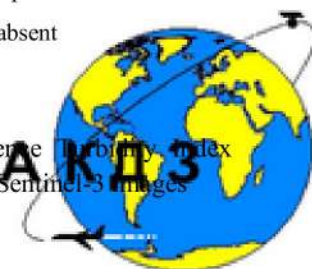


Рис. 2.24. Динаміка каламутності води – Normalized Difference Turbidity Index (NDTI) у Дніпровсько-Бузькому лимані, отримана протягом 2023 р. за знімками Sentinel-3

Fig. 2.24. Dynamics of water turbidity – Normalized Difference Turbidity Index (NDTI) in the Dniro-Buzka estuary, obtained for 2023 from the Sentinel-3 images



“Цвітінням” води вважають масовий розвиток мікроскопічних водоростей (зазвичай синьо-зелених), що супроводжуються значним погіршенням якості води. Це викликано цілим комплексом чинників, таких, як зміна клімату (зокрема, аномально висока температура повітря влітку останніми роками), надходження у воду великої кількості різних мінеральних і органічних речовин та пов'язане з інтенсифікацією господарської діяльності людини. Зокрема, надходженням у водойми забруднених біогенними речовинами комунальних чи сільськогосподарських стоків, мінеральних добрив, синтетичних миючих засобів, тощо. Фітопланктон має безпосередній вплив на якість питної води – суспензію, кольоровість, токсичність, а за значного розвитку біомаси викликає замори риб, порушення роботи очисних споруд, забруднення узбережжя та пляжів. Показники кількісного розвитку фітопланктону широко використовують під час визначення трофічного статусу водойм і для прийняття рішень з екологічної реабілітації водойм.

Проявляється “цвітіння” у зміні забарвлення води внаслідок масового розмноження мікроскопічних водоростей. При цьому методи обробки космічних знімків для виявлення ділянок “цвітіння” води зазвичай базуються на аналізі варіацій коефіцієнту дифузного відбивання світла поверхневими і підповерхневими шарами води за збільшення у них концентрації фітопланктону. Найбільше підходить для таких спостережень червона область спектру видимого діапазону 600...700 нм та ближній інфрачервоний діапазон.

Також додатковою дешифрувальною ознакою у ході візуальної ідентифікації “цвітіння” води може слугувати текстура зображення, так для ділянок інтенсивного “цвітіння” найчастіше характерна специфічна ниткоподібна текстура. У періоди з тривалою теплою, сонячною і безвітряною погодою ціанобактерії об'єднуються в агрегати, що спливають до поверхні, утворюючи поверхневі або підповерхневі скупчення. На супутникових зображеннях ціанобактерії проявляються як яскраві ниткоподібні смуги або окремі скупчення.

На основі багатоспектральних даних з супутника Sentinel-2 MSI – періоди масового розвитку фітопланктону або “цвітіння” води у липні – серпні 2022 – 2023 рр. розраховано наступні показники якості води:

Хлорофіл (Chlorophyll-a (Chl-a)). Концентрація хлорофілу у воді – показник наявності та відносної кількості фітопланктону, одиниці вимірювання – мг / м³. Використано показник адаптований для обчислення умісту хлорофілу за даними Sentinel-2 [27] (рис. 2.25):

$$Chl-a = 14.039 + 86.11 \times (VNIR_{705} - Red) / (VNIR_{705} + Red) + 194.325 \times (VNIR_{705} - Red) / (VNIR_{705} + Red)^2$$

A water “blooming” is considered to be the massive development of microscopic algae (usually blue-green), which is accompanied by a significant deterioration of water quality. This is caused by a whole complex of factors, such as climate change (in particular, abnormally high air temperature in summer in recent years), the entry of a large amount of various mineral and organic substances into the water, and is associated with the intensification of human economic activity. In particular, the entry into water bodies of municipal or agricultural effluents, mineral fertilizers, synthetic detergents, etc., contaminated with biogenic substances. Phytoplankton has a direct effect on the quality of drinking water: suspension, color, toxicity, and with a significant development of biomass, it causes fish bloat, disruption of the operation of treatment facilities, pollution of the coast and beaches. Indicators of the quantitative development of phytoplankton are widely used in determining the trophic status of water bodies and for making decisions on the ecological rehabilitation of water bodies.

“Blooming” manifests itself in a change in the color of the water due to the mass reproduction of microscopic algae. At the same time, the methods of processing space images to detect areas of water “blooming” are usually based on the analysis of variations in the coefficient of diffuse reflection of light by the surface and subsurface layers of water with an increase in the concentration of phytoplankton in them. The red region of the spectrum of the visible range of 600...700 nm and the near-infrared range are most suitable for observations.

Also, the texture of the image can serve as an additional deciphering feature for the visual identification of water “blooming”, for example, areas of intense bloom are often characterized by a specific thread-like texture. During periods of prolonged warm, sunny and windless weather, cyanobacteria unite in aggregates that float to the surface, forming surface or subsurface clusters. On satellite images, cyanobacteria appear as bright thread-like bands or entire clusters.

On the basis of multispectral data from the Sentinel-2 MSI satellite – periods of massive phytoplankton development or water “blooming” – July – August in 2022 and 2023, the following water quality indicators were calculated:

Chlorophyll-a (Chl-a). The concentration of chlorophyll in water is an indicator of the presence and relative amount of phytoplankton, the unit of measurement is mg/m³. The indicator adapted for calculating the chlorophyll content based on Sentinel-2 data was used [27] (Fig. 2.25):

$$Chl-a = 14.039 + 86.11 \times (VNIR_{705} - Red) / (VNIR_{705} + Red) + 194.325 \times (VNIR_{705} - Red) / (VNIR_{705} + Red)^2$$



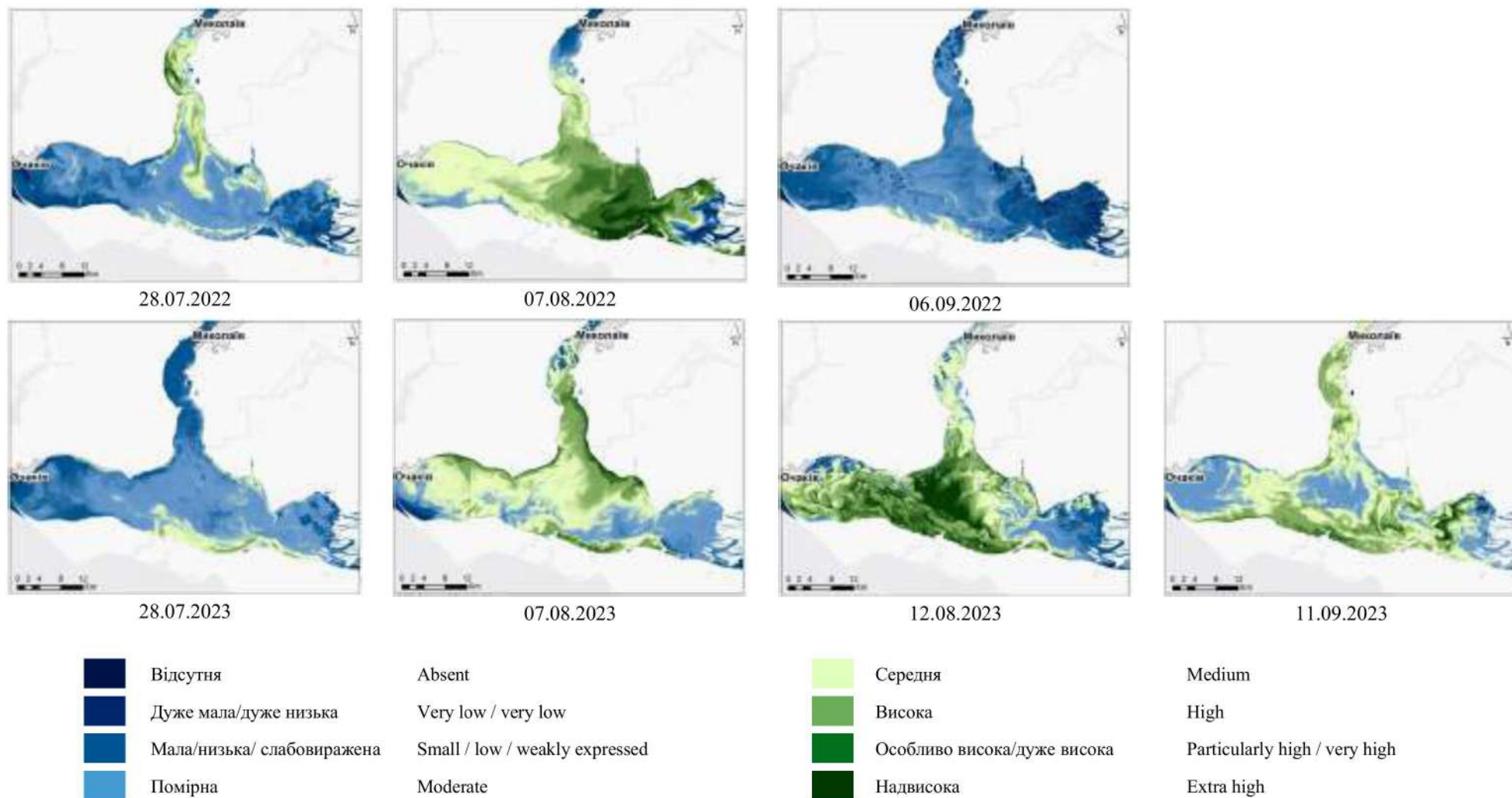


Рис. 2.25. Динаміка поширення планктонних водоростей у Дніпровсько-Бузькому лимані, отримана на основі значень хлорофілу (Chlorophyll-a) – 2022 – 2023 р. за знімками Sentinel-2

Fig. 2.25. The dynamics of the planktonic algae distribution in the Dnipro-Buzka estuary, obtained on the basis of Chlorophyll-a values – 2022 – 2023 from the Sentinel-2 images



Фікоціанін (Phycocyanin – PC). Концентрація фікоціаніну у воді – показник наявності та відносної кількості ціанобактерій, одиниці вимірювання – мг / м³. Використано показник адаптований для обчислення умісту хлорофілу за даними Sentinel-2 [28] (рис. 2.26):

$$PC = 21.554x(VNIR_{705\text{ nm}}/Red)^{3.4791}$$

Phycocyanin (PC). The concentration of phycocyanin in water is an indicator of the presence and relative amount of cyanobacteria, the unit of measurement is mg / m³. The indicator adapted for calculating the chlorophyll content based on Sentinel-2 data was used [28] (Fig. 2.26):

$$PC = 21.554x(VNIR_{705\text{ nm}}/Red)^{3.4791}$$

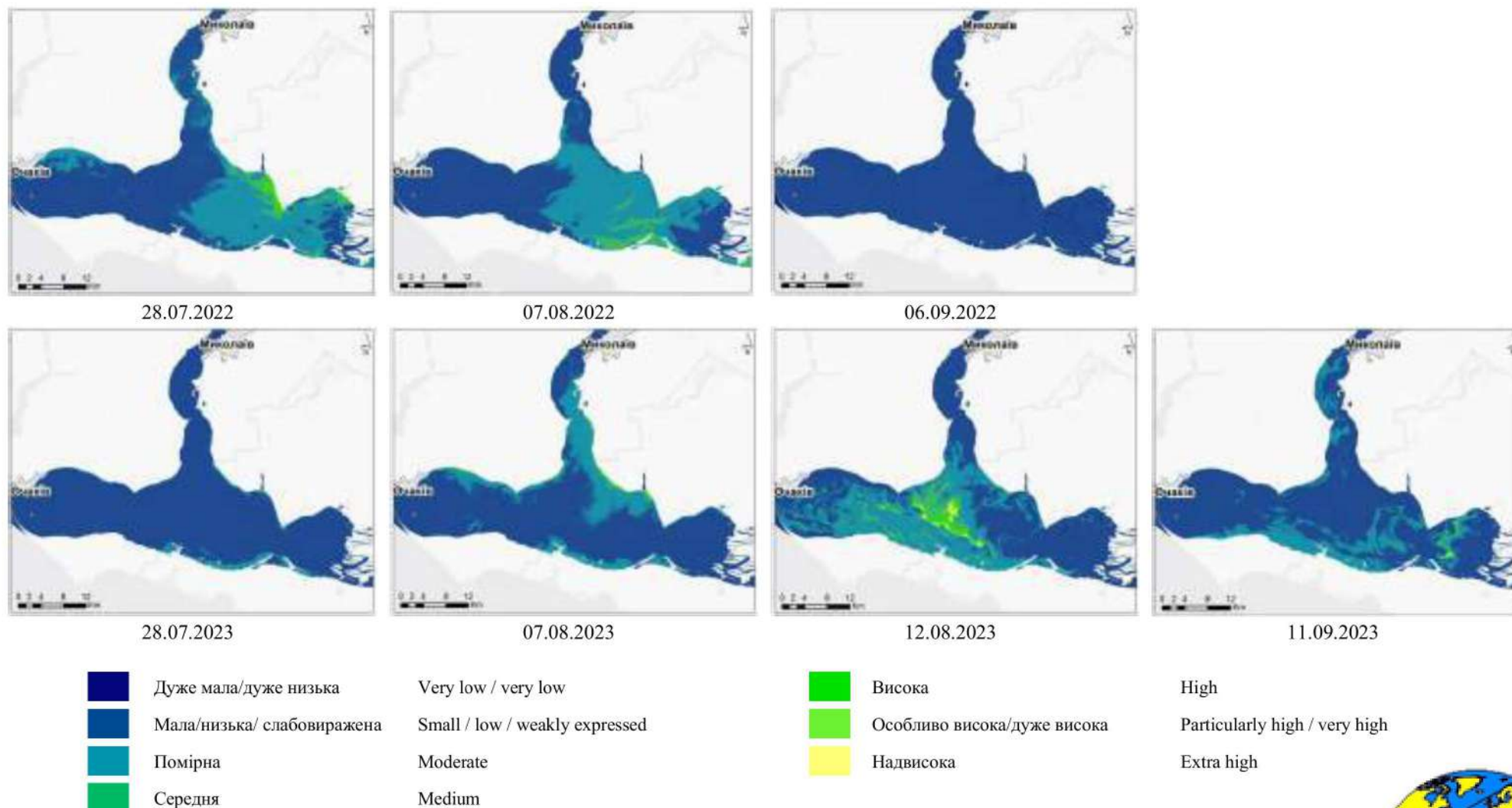


Рис. 2.26. Динаміка поширення планктонних водоростей у Дніпровсько-Бузькому лимані, отримана на основі значень фікоціаніну (Phycocyanin) – 2022 – 2023 р., за знімками Sentinel-2

Fig. 2.26. The dynamics of the planktonic algae distribution in the Dnipro-Buzka estuary, obtained on the basis of Phycocyanin values – 2022 – 2023 from the Sentinel-2 images



2.6. Стан сільськогосподарських угідь у межах областей, що зазнають впливу наслідків руйнування Каховської ГЕС

Південний степ України належить до зони ризикованого землеробства, де волога є головним фактором, що лімітує продуктивність рослин [29]. Одержання у регіоні високих та стабільних урожаїв сільськогосподарських культур, особливо овочевих, які у найбільшому обсязі вирощувалися у Херсонській області, істотно залежить від штучного зрошення сільгоспугідь.

Каховське водосховище було джерелом живлення для 94 % зрошувальних систем у Херсонській, 74 % – у Запорізькій та 30 % – у Дніпропетровській областях. З нього забирали воду одразу чотири потужні системи каналів – Каховський магістральний канал, Північнокримський канал, канал Дніпро – Кривий Ріг і Північно-Рогачинська зрошувальна система, через які здійснювалося зрошення 584 тис. га земель [30]. Після руйнування Каховської ГЕС, структура більшості господарств на цих територіях зазнала значних змін унаслідок зменшення водозабезпечення. Непрямого впливу зазнаватимуть і сільгоспугіддя Правобережжя, зокрема Миколаївської області, через збільшення навантаження на Інгулецьку зрошувальну систему, яку живить р. Інгулець.

Сумарну кількість вологи, що випаровується ґрунтом і транспірується рослинністю у атмосферу, дає змогу оцінити інформаційний продукт MOD16A2 для евапотранспірації (просторова розрізненість 500 м), отриманий зі спектро радіометра MODIS [31]. Цей біофізичний параметр корелює з біопродуктивністю та водозабезпеченням угідь. На евапотранспірацію впливають як водні умови та характеристики ґрунту, так і метеорологічні чинники, зокрема температура та вологість.

На рис. 2.27 та 2.28 показано просторовий розподіл повної евапотранспірації, що ураховує як випаровування ґрунту, так і транспірацію рослинності для територій, що зазнають впливу наслідків руйнування Каховської ГЕС. Значення евапотранспірації були усереднені за липень, найбільш посушливий та спекотний місяць для цього регіону, та отримані за три роки – 2023 – рік катастрофи, 2022 – початок повномасштабного воєнного вторгнення РФ в Україну, 2021 – довоєнне функціонування зрошувальних систем. Завантаження здійснювалося за допомогою веб-платформи Google Earth Engine з інформаційного продукту MOD16A2.061: Terra Net Evapotranspiration [32].

2.6. Land use changes within the regions affected by the consequences of the Kakhovka Dam destruction

The Southern Steppe of Ukraine belongs to the zone of risky land use, where moisture is the main factor limiting plant productivity [29]. Obtaining high and stable yields of crops in the region, especially vegetables, which were grown plentifully in the Kherson region, depends significantly on artificial irrigation of the land use.

Kakhovka Reservoir was a source of power for 94 % of irrigation systems in Kherson, 74 % – in Zaporizhia, and 30 % – in Dnipropetrovsk regions. It gave water simultaneously to four powerful canal systems - the Kakhovka Canal, the North Crimean Canal, the Dnipro – Kryvyi Rih Canal, and the North Rohachyn irrigation system, through which 584,000 hectares of land were irrigated [30]. After the destruction of the Kakhovka Dam, the structure of most farms in these territories underwent significant changes due to a decrease in the water supply. Land use of the Right Bank, in particular Mykolaiv region, will also be indirectly affected due to the increased load on the Ingulets irrigation system fed by the Ingulets River.

The total amount of moisture that evaporates from the soil and is transpired by vegetation into the atmosphere can be estimated by the MOD16A2 information product for evapotranspiration (spatial resolution – 500 m), obtained from the MODIS spectroradiometer [31]. This biophysical parameter correlates with bioproductivity and the water supply of lands. Evapotranspiration is influenced by water conditions, soil characteristics, and meteorological factors, particularly temperature and moisture.

Fig. 2.27 and 2.28 show the spatial distribution of total evapotranspiration, which considers both soil evaporation and vegetation transpiration, for the areas affected by the consequences of the Kakhovka Dam destruction. Evapotranspiration values were averaged for July, the driest and hottest month for this region, and obtained over three years: 2023 – the year of the disaster; 2022 – the beginning of Russia's full-scale military invasion; 2021 – the pre-war operation of irrigation systems. The download was carried out using the Google Earth Engine web platform from the data catalogue of MOD16A2.061: Terra Net Evapotranspiration[32].



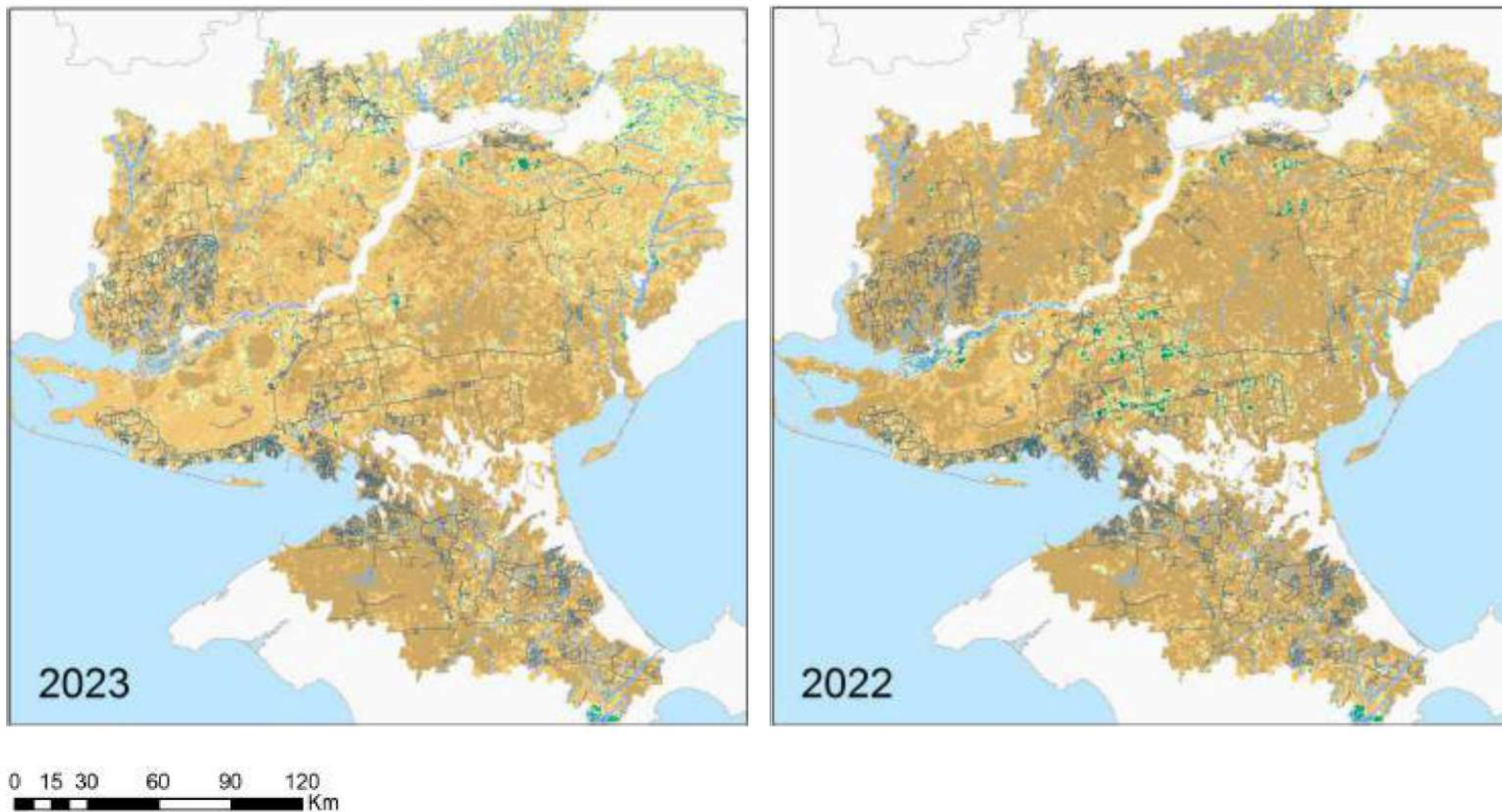


Рис. 2.27. Карти просторового розподілу середньомісячної повної евапотранспірації ($\text{кг/м}^2/\text{місяць}$) або кількість вологи, що виділяється внаслідок випаровування та транспірації з поверхні ґрунту у найспекотніший місяць (липень), 2021 – 2023 рр.



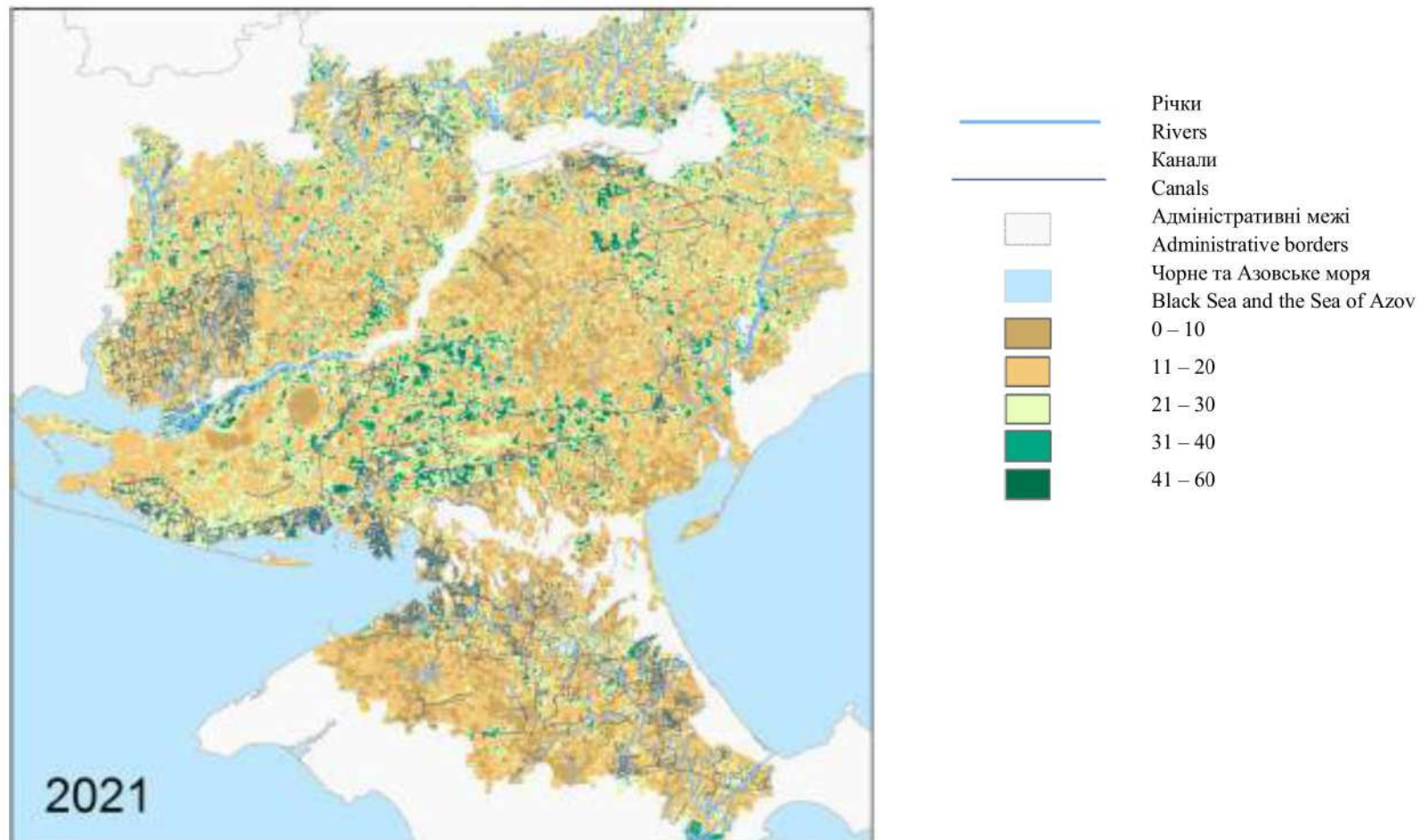


Fig. 2.27. Maps of the spatial distribution of monthly average total evapotranspiration ($\text{kg/m}^2/\text{month}$), or the amount of moisture released as a result of evaporation and transpiration from the soil surface in the hottest month (July) of 2021, 2022, and 2023.





2021



2022



2023

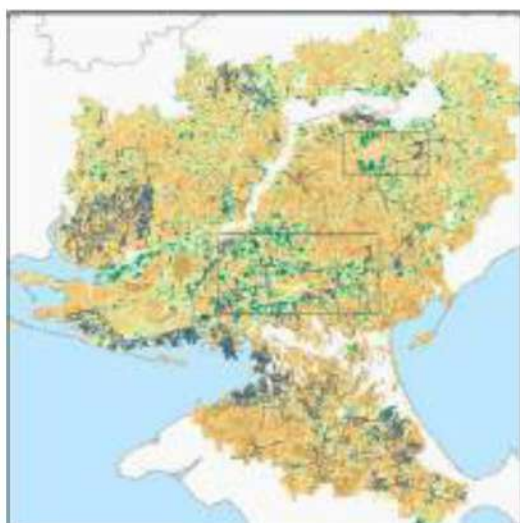
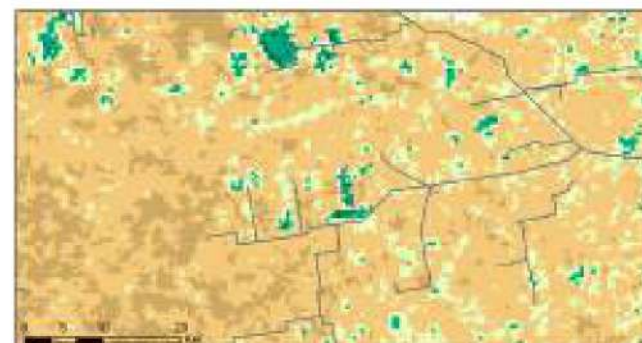
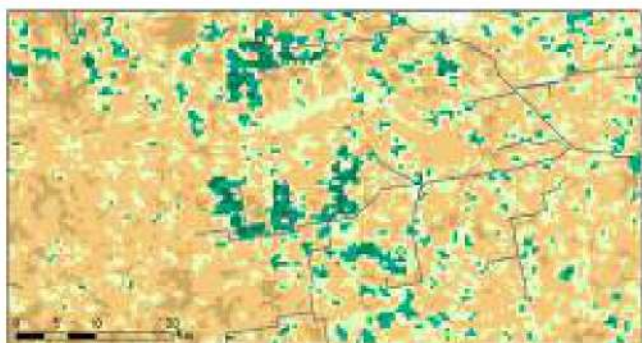


Рис. 2.28. Фрагменти карт просторового розподілу середньомісячної повної евапотранспірації ($\text{кг}/\text{м}^2/\text{місяць}$) у найспекотніший місяць (липень) 2021 – 2023 рр. на ділянки мережі каналів 1) Каховської зрошувальної системи у межах Каховського району Херсонської області та 2) Північно-Рогачицької зрошувальної системи у межах Василівського району Запорізької області

Fig. 2.28. Fragments of maps of the spatial distribution of average monthly total evapotranspiration ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{month}$) in the hottest month (July) of 2021, 2022, and 2023 for two sites:

- 1) the Kakhovka irrigation system within the Kakhovka district of the Kherson region and
- 2) the North-Rohachytka irrigation system in the Vasylivskiy district of the Zaporizhzhia region



РОЗДІЛ 3. ОСУШЕННЯ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА ВНАСЛІДОК ПІДРИВУ ДАМБИ: ЗА ДАНИМИ КОСМІЧНОЇ ЗЙОМКИ

3.1. Методика оцінювання динаміки осушення Каховського водосховища

Гідрологічний режим Каховського водосховища різко змінився внаслідок сходження води у червні 2023 р. та падіння рівня на Нікопольсько-Енергодарському створі водосховища до 7 – 9 м порівняно з нормою 15,5 – 16 м. Площі водних поверхонь протягом літніх місяців постійно скорочуються. Упродовж червня – липня відбулася диференціація поверхні дна з формуванням і розвитком нових геосистем. Для визначення швидкості та напрямку змін нами виконувався супутниковий геомоніторинг усього осушеного дна.

Так, якщо у перший місяць відбувалося тільки відновлення основного русла Дніпра та окремих проток та стариць (1 клас), а інша територія була дуже вологою, то в подальшому у ході осушення почали формуватися ділянки піщано-детритових прируслових валів, складених дрейсною (відмерлими стулками річкових молюсків – *Dreissena polymorpha*) та піщаним алювієм (2 клас). Надалі оголилися і висушилися значні території покриті мулистими наносами. Це вирівняні поверхні, що під час сходу води, пересихаючи розтріскувалися, ускладнювалися вторинною ерозією. Їх умовно назвали такироподібними за подібністю з формами сформованими в аридних умовах (осушені вирівняні мулисті поверхні схильні до пересихання та розтріскування – 3 клас). Утворилася велика кількість площ, що охоплюють вологі мулисті поверхні навколо останцевих озер та сегментовидної форми старичних понижень, які у подальшому будуть диференціюватися та заболочуватися, заростаючи водно-болотною рослинністю (4 клас).

CHAPTER 3. DRAINAGE OF THE KAKHOVSKY RESERVOIR AS A RESULT OF THE DETONATION OF THE DAM: ACCORDING TO SPACE SURVEY DATA

3.1. Methodology for assessing the Kakhovka Reservoir drainage dynamics

The hydrological regime of the Kakhovka Reservoir changed dramatically due to rising water in June 2023 and a drop in the level of the Nikopol-Energodar reservoir to 7 – 9 m compared to the norm of 15.5 – 16 m. The surface areas of water surfaces are constantly decreasing during the summer months. The bottom surface was differentiated in June-July, and new geosystems were formed and developed. We performed satellite geomonitoring of the entire drained bottom to determine the speed and direction of changes.

Thus, if in the first month, only the restoration of the main channel of the Dnipro and some canals and tributaries was observed (class 1), and the rest of the territory was very wet, then in the future, areas of river banks composed of greisen (river mollusc – *Dreissena polymorpha*) began to form (class 2). Further, significant areas covered with muddy sediments became exposed and dried up. These are levelled surfaces that dry up and crack during the ascent of water, complicated by secondary erosion. They were conditionally called tachyro-like due to their similarity with forms formed in arid conditions (drained, levelled muddy surfaces are prone to drying out and cracking – class 3). Many areas covered wet, muddy surfaces around the last lakes and the segment-shaped form of old depressions, which will later be differentiated and swamped, overgrown with wetland vegetation (class 4).



Упродовж трьох місяців відбувалося швидке заростання поверхонь 3 і 4 класів різними видами рослинності, з'являються поверхні укріті піонерною рослинністю з різною щільністю покриття (5 клас). Площі цього класу постійно збільшуються і розширюються. Надалі вони також поділятимуться на сухопутні і прибережно-болотні типи рослинності.

На осушених ділянках дна з'являються рудеральна та інша інвазійна рослинність, а біля НПП "Кам'янська Січ" більш звужена частина дна вдойми та прилеглі раніш затоплені гирлові частини балок укрилися щільними пагонами верби.

Розділення земної поверхні на відповідні класи виконано із застосуванням даних оптичного знімання, отриманих супутниками серії Sentinel-2 із застосуванням хмарного середовища Google Earth Engine, що уможливило виконання мозаїки з кількох сцен і об'єднання їх в єдине зображення. Отримано оптичні зображення у видимих кольорах на кожну дослідну дату – 20 червня 2023 р., 5 липня 2023 р., 19 серпня 2023 р. та 28 вересня 2023 р. (рис. 3.1 – 3.5).

Виконано класифікацію даних із застосуванням описаних вище класів земної поверхні (рис. 3.6 – 3.9), застосовано метод CART (Classification And Regression Tree). Проведено порівняння оптичних властивостей дна водосховища за даними багатоспектрального знімання супутником Sentinel-2 та оцінено розподіл вегетаційного індексу NDVI – Normalized Difference Vegetation Index (рис. 3.10 – 3.13), який демонструє густоти рослинного покриву.

Over three months, there has been a rapid overgrowth of the surfaces of classes 3 and 4, with various types of vegetation, and surfaces already covered with pioneer vegetation with different coverage densities (class 5) appear. The areas of this class are constantly increasing and expanding.

Ruderal and other invasive vegetation appears on the drained areas of the bottom. Near the Kamyanska Sich reserve, the more narrowed part of the bottom and the adjacent previously flooded mouth parts of the beams are covered with dense willow shoots.

The separation of the Earth's surface into the appropriate classes was performed using optical survey data received by the Sentinel-2 series satellites using the Google Earth Engine cloud environment, which allows to create a mosaic of several scenes and combine them into a single image, perform classification (the CART method is used - Classification And Regression Tree) and estimated the area of each of the classes for each experimental date: June 20, 2023, July 5, 2023, August 19, 2023, and September 28, 2023 (Fig. 3.1 – 3.5).

The data was classified using the classes of the earth's surface described above (Fig. 3.6 – 3.9), and the CART (Classification And Regression Tree) method was applied. The optical properties of the reservoir's bottom were also compared according to the multispectral imaging data of the Sentinel-2 satellite, and the distribution of the vegetation index NDVI—Normalized Difference Vegetation Index (Fig. 3.10 – 3.13), which shows the density of the vegetation cover, was evaluated.





Рис. 3.1. Зображення Каховського водосховища до руйнування греблі ГЕС, за даними оптичного знімання із супутника Sentinel-2 від 6 травня 2023 р.

Fig. 3.1. Kakhovka reservoir optical image before destruction of the Kakhovka dam, received by Sentinel-2 on May 6, 2023.

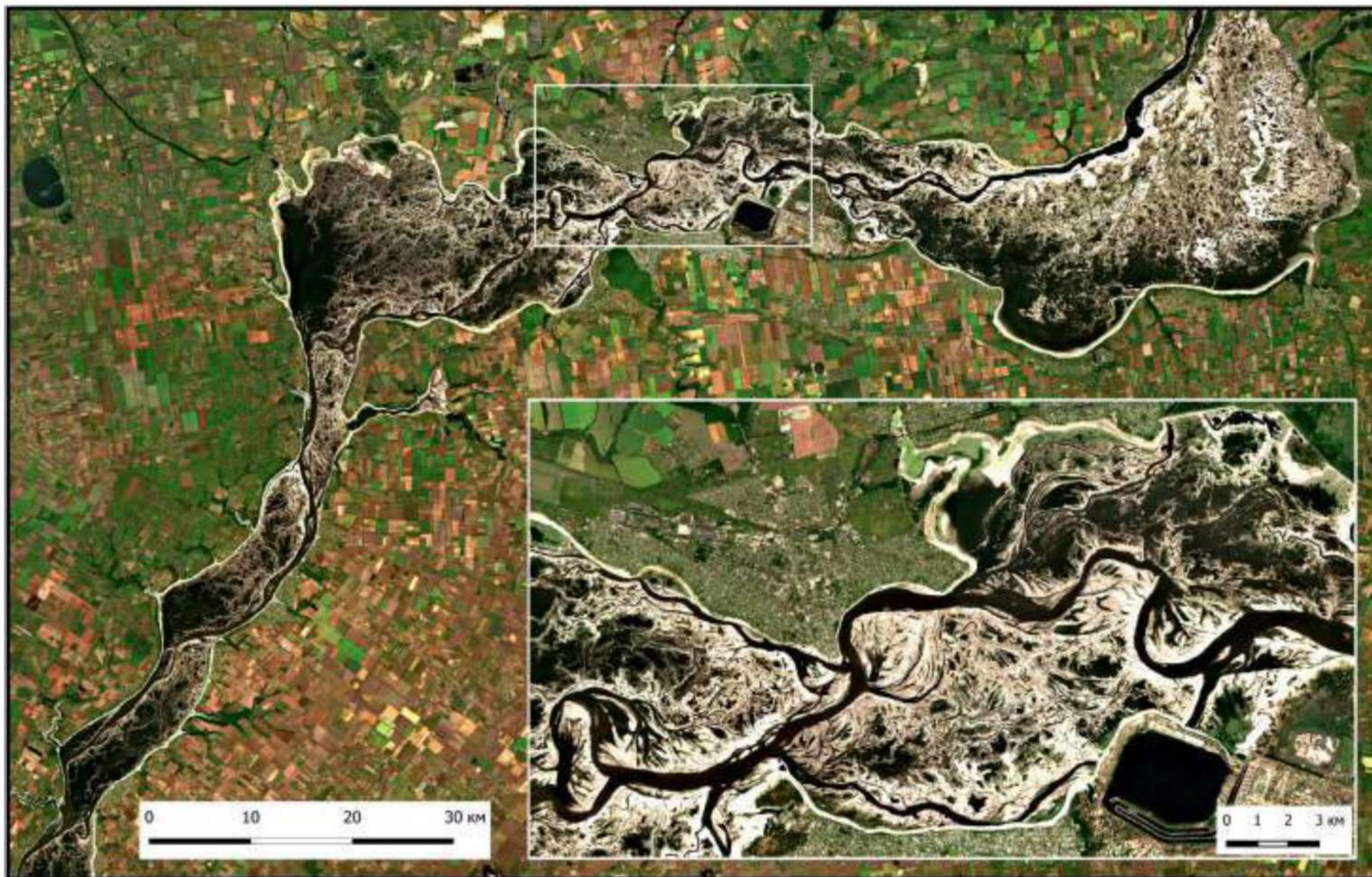


Рис. 3.2. Зображення Каховського водосховища, за даними оптичного знімання із супутника Sentinel-2 від 20 червня 2023 р.

Fig. 3.2. Kakhovka reservoir optical image after destruction of the Kakhovka dam received by Sentinel-2 on June 20, 2023.



Рис. 3.3. Зображення Каховського водосховища, за даними оптичного знімання із супутника Sentinel-2 від 5 липня 2023 р.

Fig. 3.3. Kakhovka reservoir optical image after destruction of the Kakhovka dam received by Sentinel-2 on July 5, 2023.

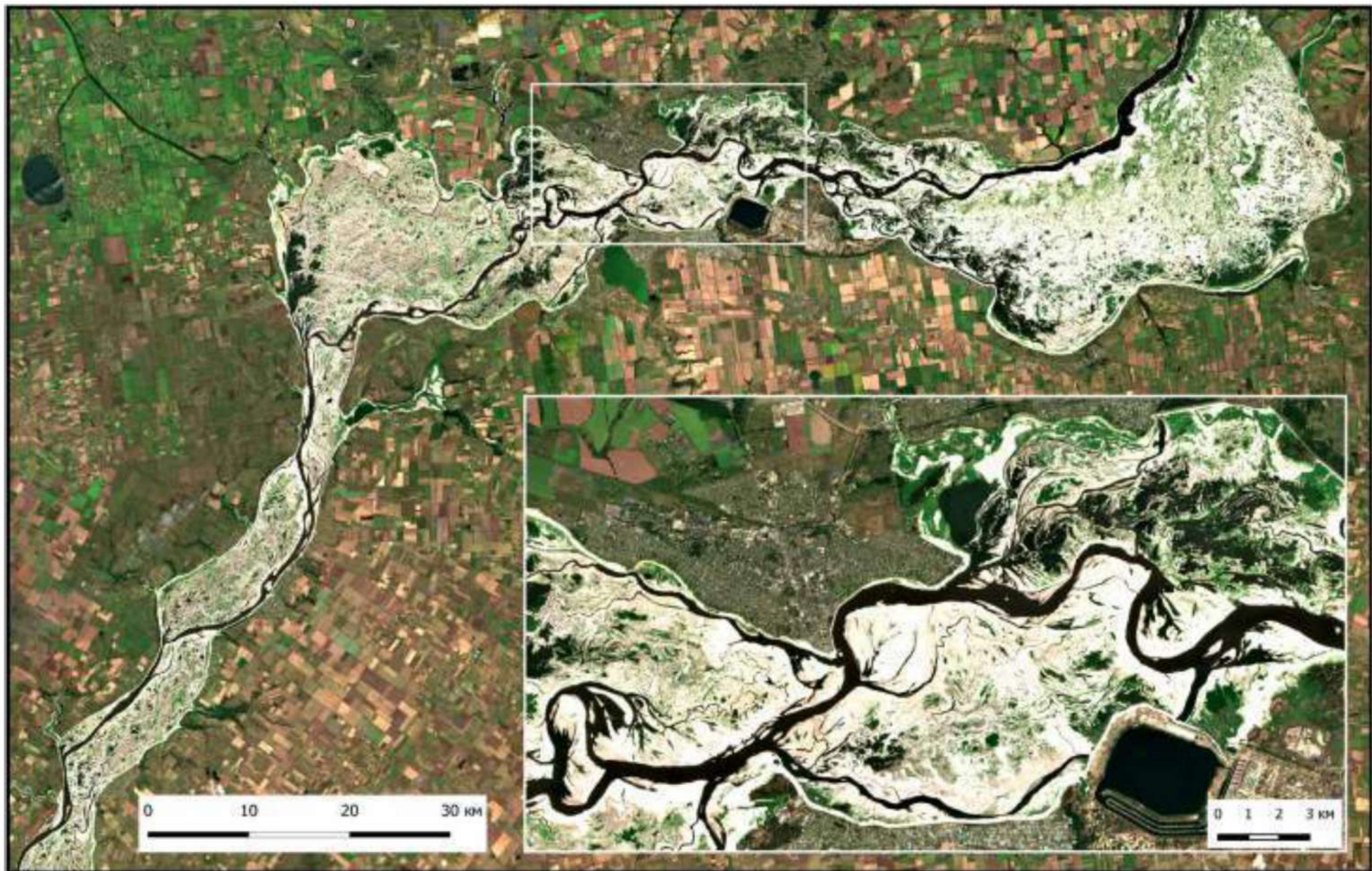


Рис. 3.4. Зображення Каховського водосховища, за даними оптичного знімання із супутника Sentinel-2 від 19 серпня 2023 р.

Fig. 3.4. Kakhovka reservoir optical image after destruction of the Kakhovka dam received by Sentinel-2 on August 19, 2023.

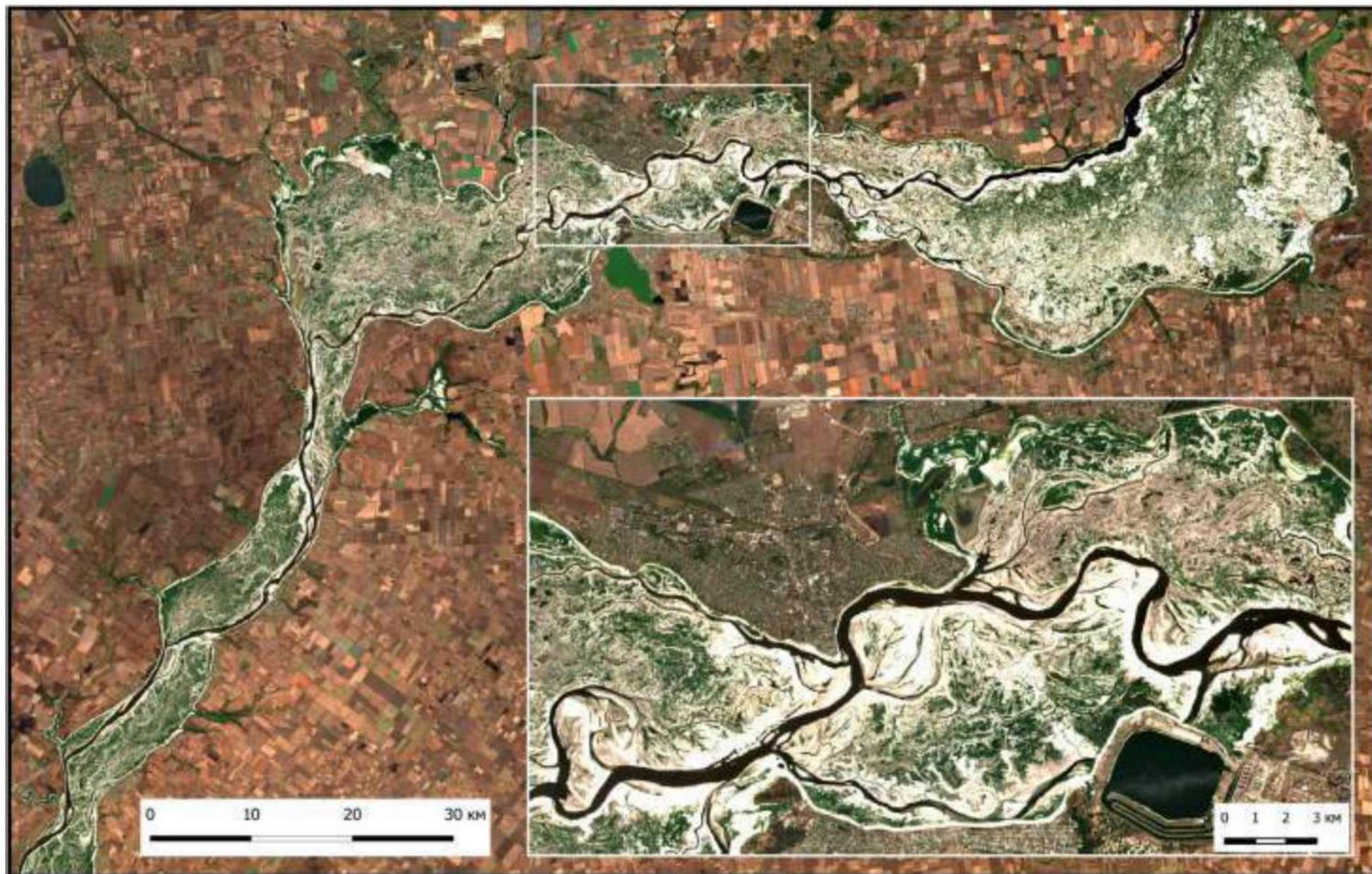
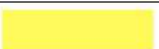


Рис. 3.5. Зображення Каховського водосховища, за даними оптичного знімання із супутника Sentinel-2 від 25 вересня 2023 р.

Fig. 3.5. Kakhovka reservoir optical image after destruction of the Kakhovka dam received by Sentinel-2 on September 25, 2023.

3.3. Класифікація даних оптичного знімання

3.3. Optical data classification

Клас / Class number	Колір класу / Class color	Тип поверхні / Land cover type
1		Водна поверхня / Water
2		Підвищені сухі піщано-детритові ділянки / Sandy dry surfaces
3		Плоскі сухі мулисті поверхні / Muddy dry surfaces
4		Заболочені поверхні / Wetlands
5		Поверхні, вкрита піонерною рослинністю / Primary vegetation

Приклади зовнішнього вигляду ландшафтів, представлених відповідними класами

(фото надане В.Г. Верховцевим) / Examples of the landscapes, represented by corresponding class (photo by V.G. Verhovtsev)



Водна поверхня (клас 1)
Water surface (class 1)



Сухі піщано-детритові ділянки (клас 2)
Sandy dry surfaces (class 2)



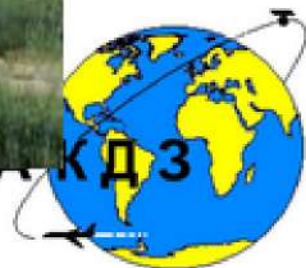
Сухі мулисто-суглинисті поверхні (клас 3)
Dry silty loamy surfaces (class 3)



Волога мулисто-суглиниста поверхня (клас 4)
Wet loamy surface (class 4)



Піонерна рослинність (клас 5)
Primary vegetation (class 5)



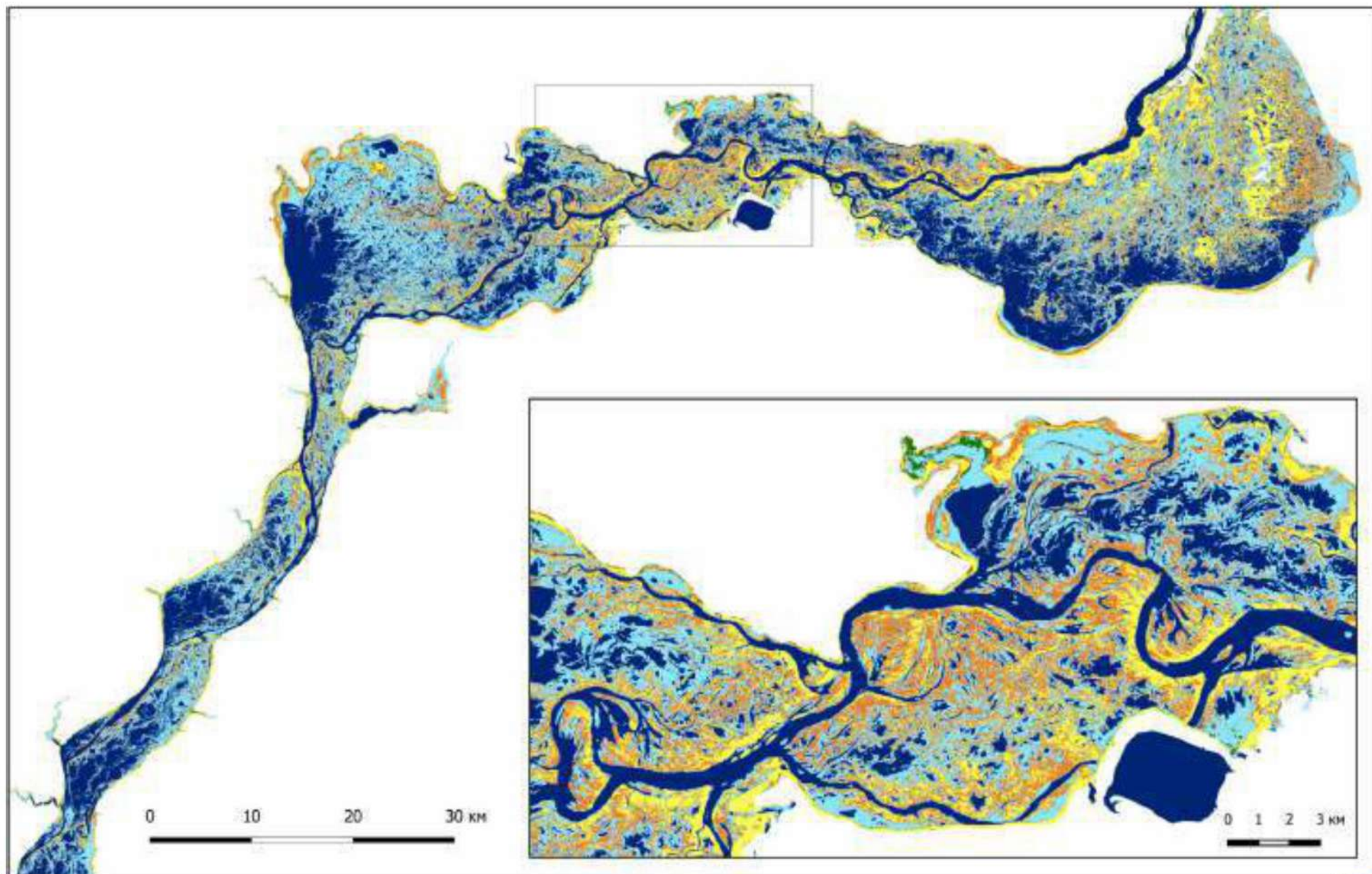


Рис. 3.6. Класифікація поверхні дна Каховського водосховища, за даними знімків Sentinel-2, 20 червня 2023 р.

Fig. 3.6. Classification of the Kakhovka Reservoir surface using Sentinel-2 imagery, June 20, 2023.



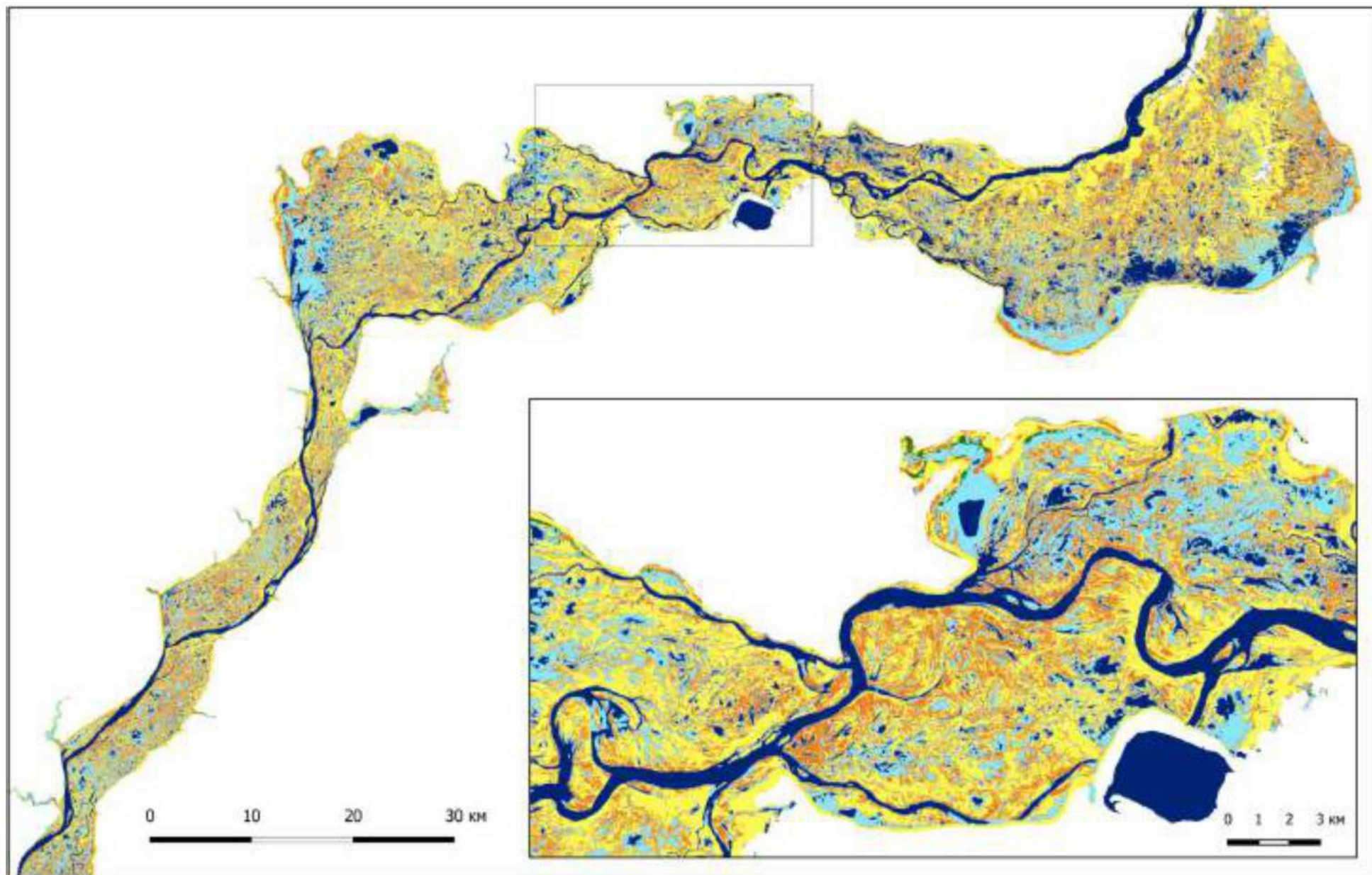


Рис. 3.7. Класифікація поверхні дна Каховського водосховища, за даними знімків Sentinel-2, 5 липня 2023 р.

Fig. 3.7. Classification of the Kakhovka Reservoir surface using Sentinel-2 images, July 5, 2023.

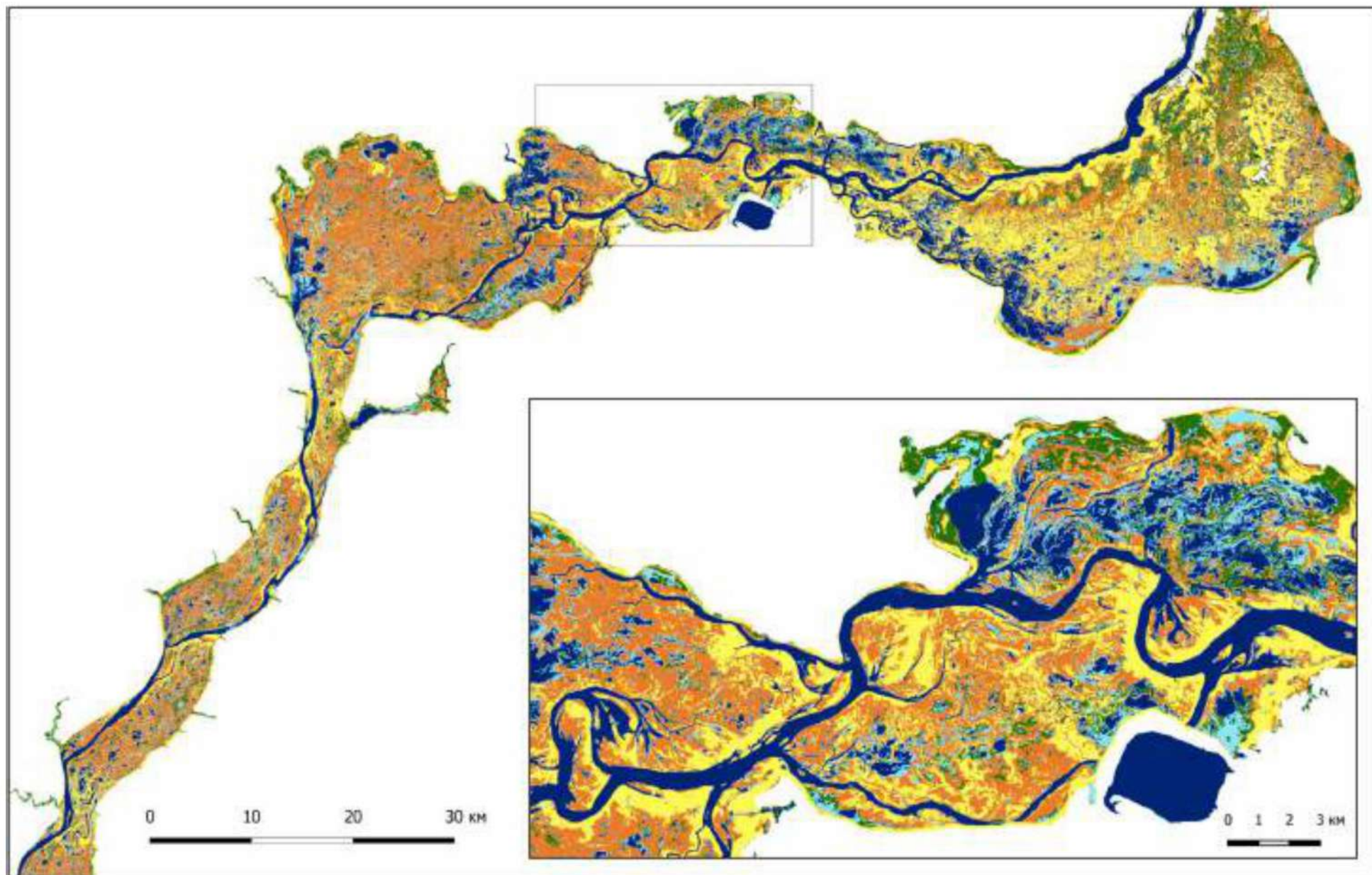


Рис. 3.8. Класифікація поверхні дна Каховського водосховища, за даними знімків Sentinel-2, 19 серпня 2023 р.

Fig. 3.8. Classification of the Kakhovka Reservoir surface using Sentinel-2 images, August 19, 2023.

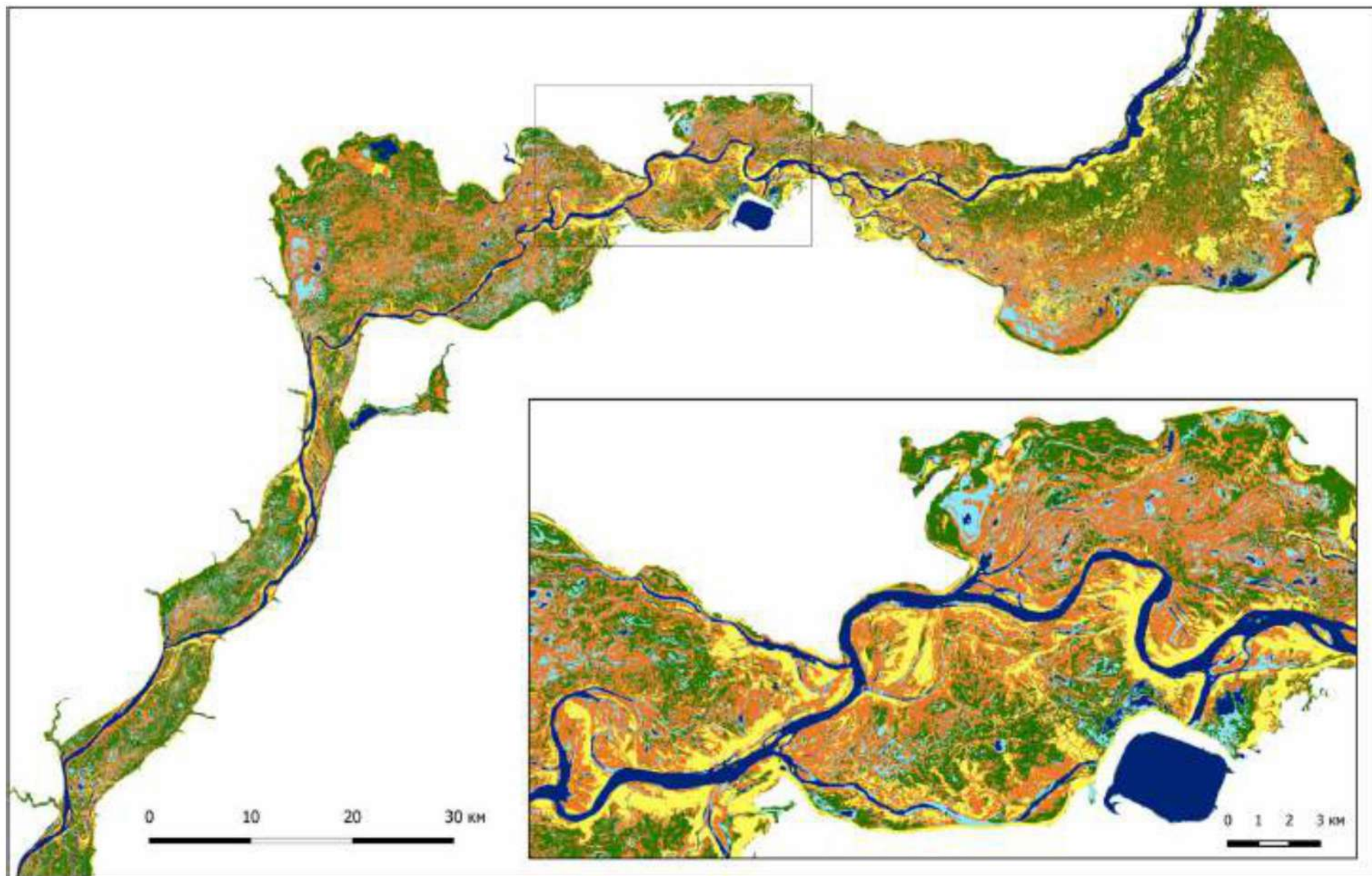


Рис. 3.9. Класифікація поверхні дна Каховського водосховища, за даними знімків Sentinel-2, 28 вересня 2023 р.

Fig. 3.9. Classification of the Kakhovka Reservoir surface using Sentinel-2 images, September 28, 2023.

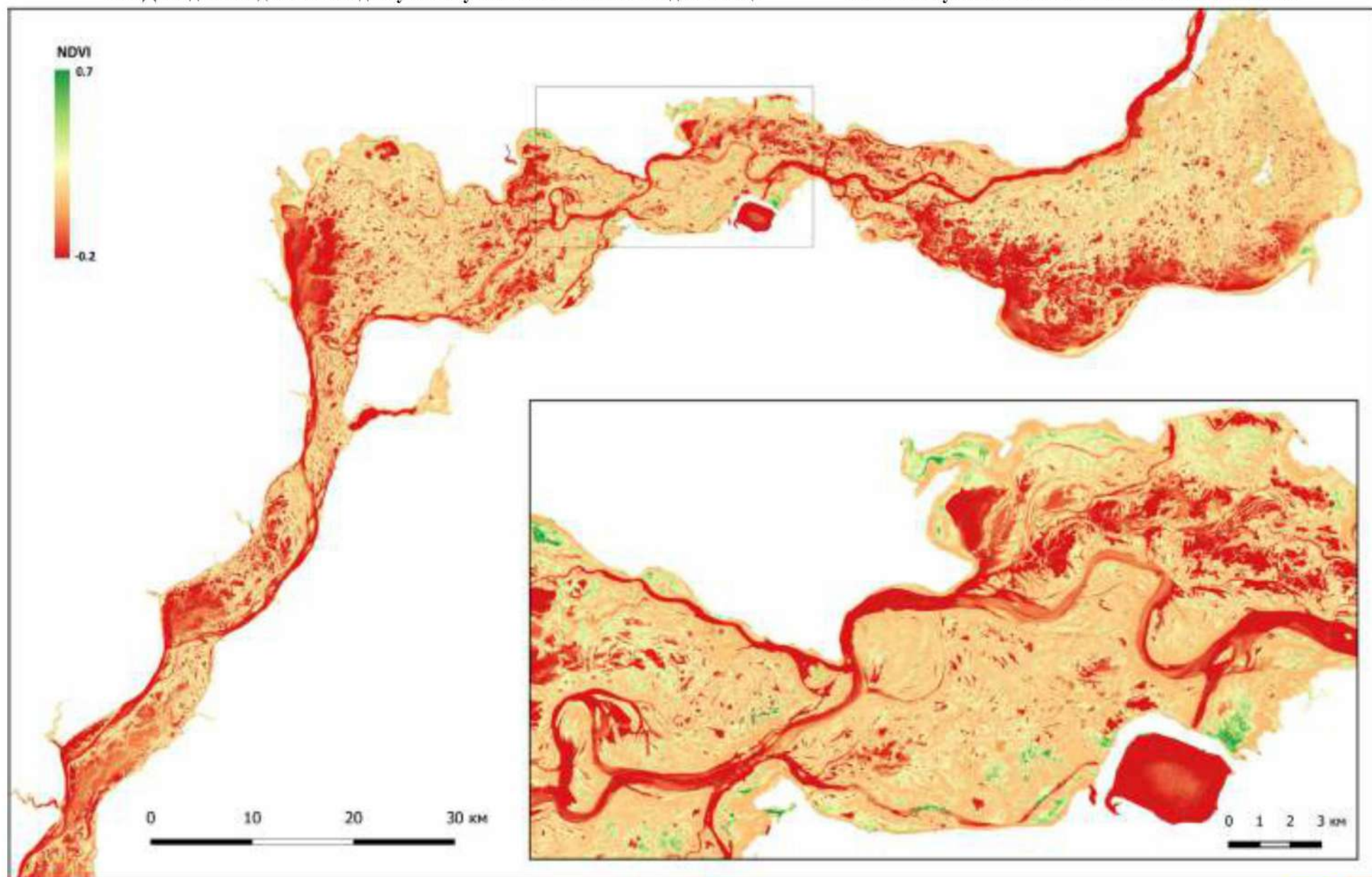


Рис. 3.10. Зображення розподілу вегетаційного індексу NDVI на поверхні дна Каховського водосховища, за даними знімків Sentinel-2, 20 червня 2023 р.

Fig. 3.10. NDVI distribution of the Kakhovka Reservoir surface using Sentinel-2 imagery, June 20, 2023.

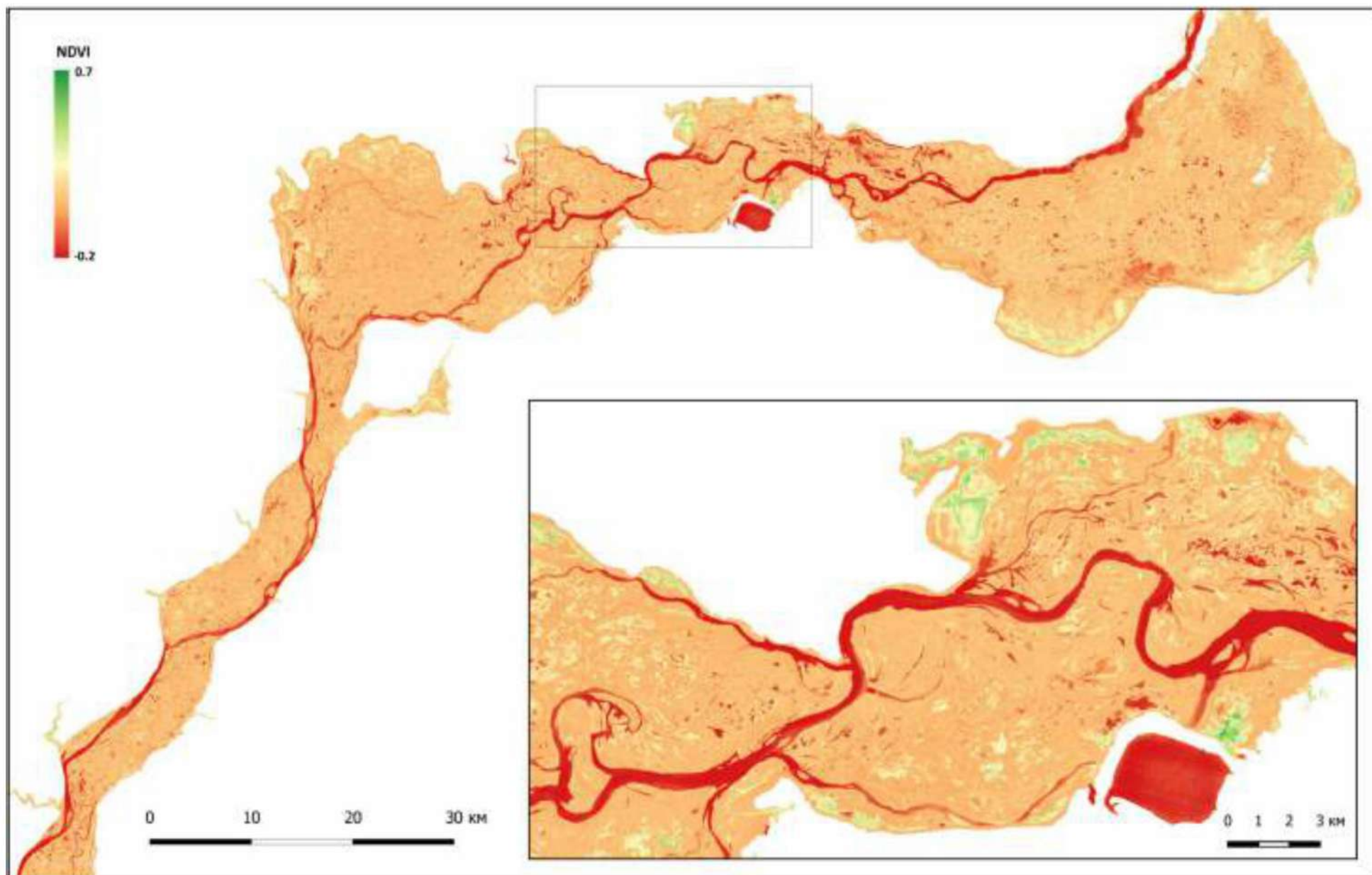


Рис. 3.11. Зображення розподілу вегетаційного індексу NDVI на поверхні дна Каховського водосховища, за даними знімків Sentinel-2, 5 липня 2023 р.

Fig. 3.11. NDVI distribution of the Kakhovka Reservoir surface using Sentinel-2 imagery, July 5, 2023.

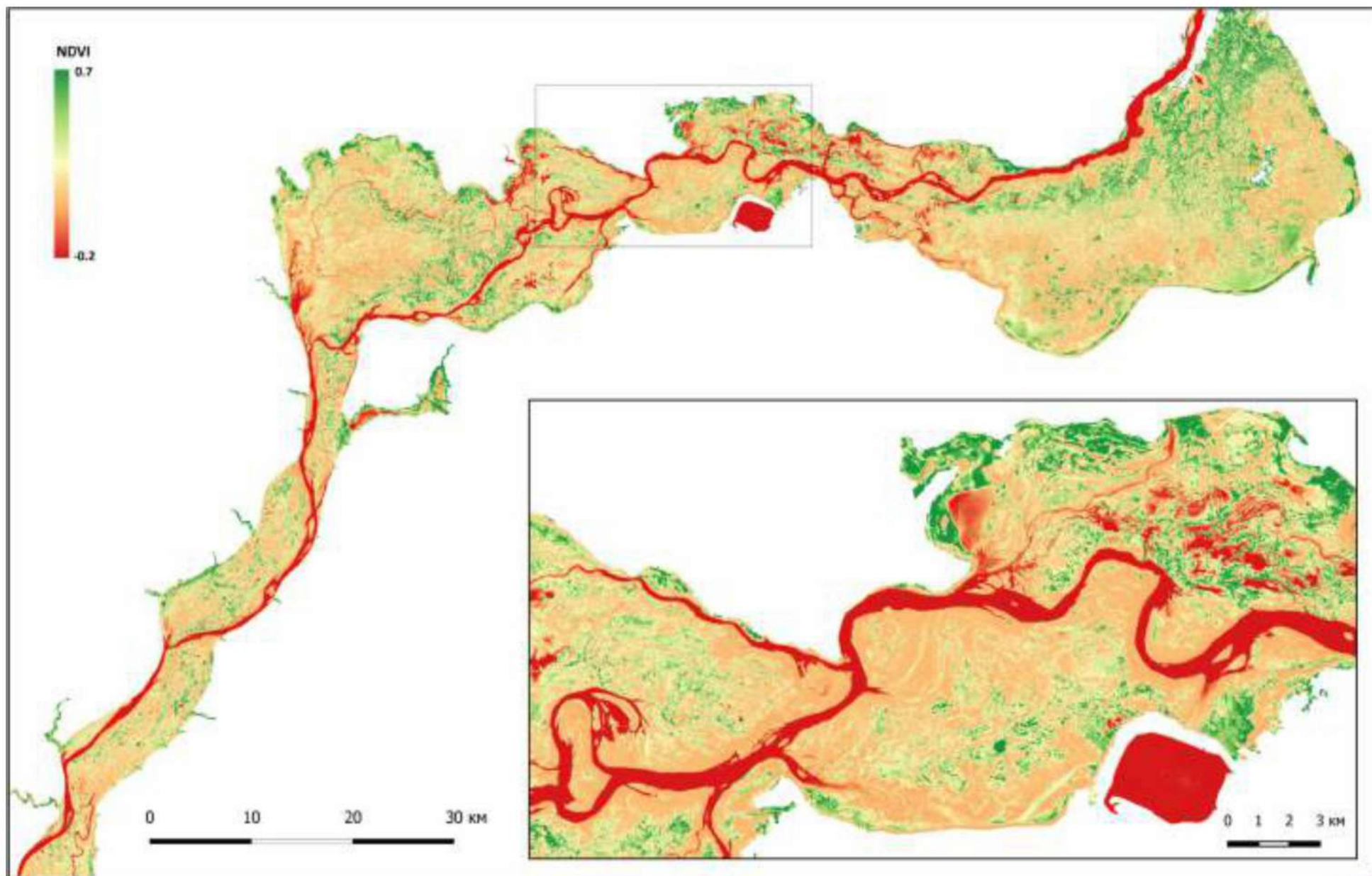


Рис. 3.12. Зображення розподілу вегетаційного індексу NDVI на поверхні дна Каховського водосховища, за даними знімків Sentinel-2, 19 серпня 2023 р.

Fig. 3.12. NDVI distribution of the Kakhovka Reservoir surface using Sentinel-2 imagery, August 19, 2023.

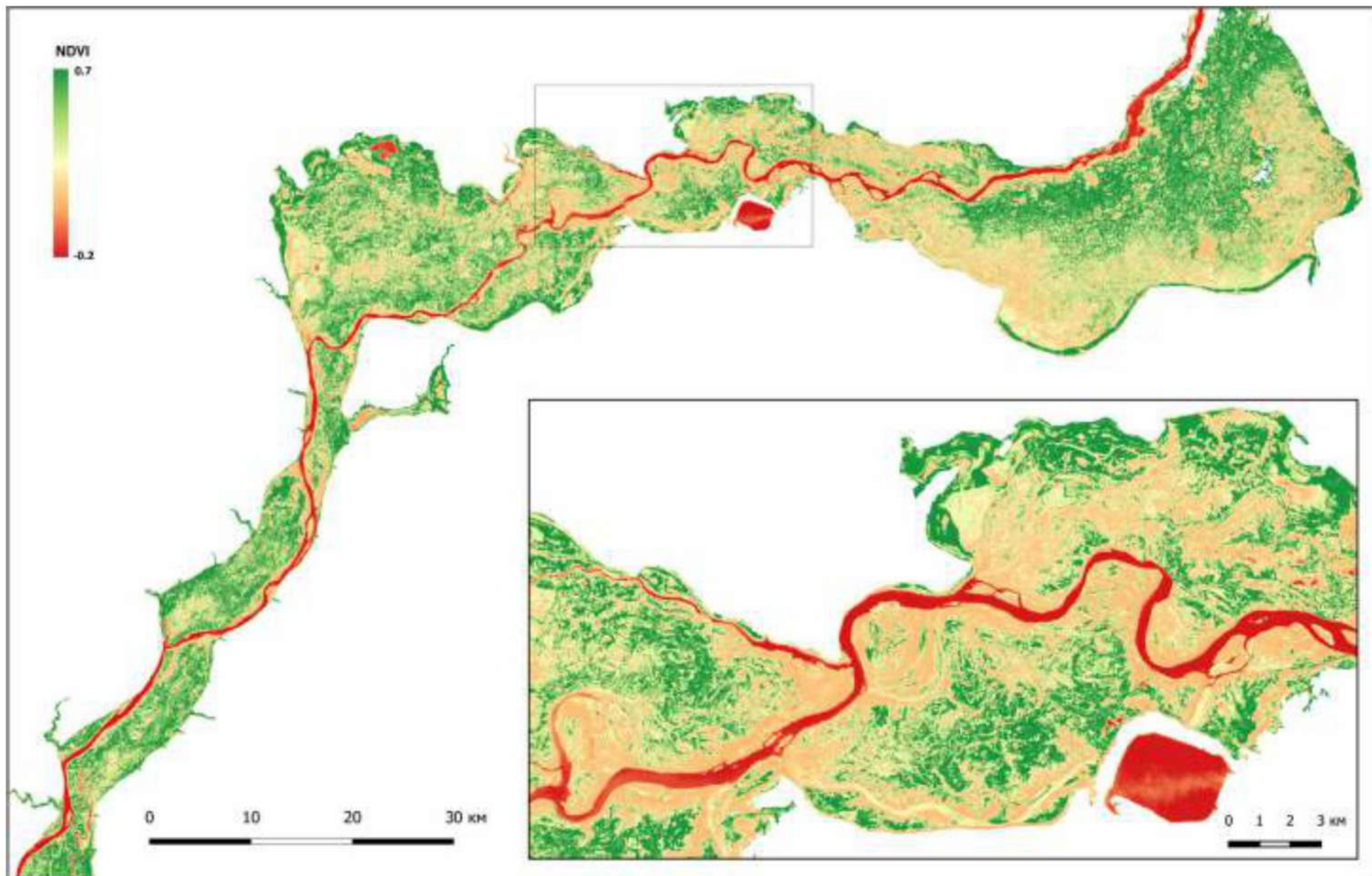


Рис. 3.13. Зображення розподілу вегетаційного індексу NDVI на поверхні дна Каховського водосховища, за даними знімків Sentinel-2, 28 вересня 2023 р.

Fig. 3.13. NDVI distribution of the Kakhovka Reservoir surface using Sentinel-2 imagery, September 28, 2023.

3.5. Загальна оцінка динаміки осушення Каховського водосховища

За результатами аналізу динаміки осушення дна Каховського водосховища оцінено площу у 1 995,3 км² та виявлено різке скорочення водної площі за червень та поступове відновлення історичного русла Дніпра. Сформовано великі заболочені улоговини, які у подальшому стануть основними осередками формування піонерної рослинності та нових невеликих водойм. Відзначено деяке скорочення площі рослинності упродовж червня, що може бути пов'язане з відмиранням залишкових водоростей, які залишилися після зниження рівня води.

Найнижча щільність рослинності відзначена у липні, коли ще не почала з'являтися піонерна рослинність та уже відмерла залишкова рослинність (1,7 % від загальної площі водосховища). У подальшому площа рослинності збільшувалася значними темпами – 8,3 % у серпні та 22,4 % у вересні. При цьому відбувалося поступове осушення оголених піщаних та мулистих ділянок та поступова стабілізація русла. Однак рівень води залишався мінливим через підвищену кількість опадів у весняний період, а також сніготанення та періодичні пуски води з верхніх водосховищ. Наприклад, у період інтенсивного осушення дна Каховського водосховища у серпні площа водного дзеркала була більшою, ніж у липні – 5,2 % проти 4,8 %. На кінець вересня площа водного дзеркала становила тільки 3 % загальної площі досліджуваної території (табл. 1).

Т а б л и ц я 1. Розподіл та співвідношення класів земної поверхні у межах Каховського водосховища за результатами класифікації чотирьох зображень, отриманих супутником Sentinel-2 за червень – вересень 2023 р.

	Площа відповідних класів станом на 20 червня 2023 р. / Particular class area on the June 20, 2023		Площа відповідних класів станом на 5 липня 2023 р. / Particular class area on the July 5, 2023		Площа відповідних класів станом на 19 серпня 2023 р. / Particular class area on the August 19, 2023		Площа відповідних класів станом на 28 вересня 2023 р. / Particular class area on the September 28, 2023	
	км ² / sq. km	%	км ² / sq. km	%	км ² / sq. km	%	км ² / sq. km	%
Водна поверхня / Water	389,36	19,5	96,37	4,8	102,76	5,2	60,34	3,0
Підвищені сухі піщано-детритові ділянки / Sandy-detritus dry surfaces	133,44	6,7	353,34	17,7	297,39	14,9	135,51	6,8
Мулисті сухі поверхні / Muddy dry surfaces	334,45	16,8	986,86	49,5	960,79	48,2	1165,07	58,4
Заболочені поверхні / Wetlands	1104,91	55,4	536,14	26,9	469,16	23,5	187,56	9,4
Піонерна рослинність / Primary vegetation	33,15	1,7	22,6	1,1	165,22	8,3	446,83	22,4

3.5. Overall Kakhovka reservoir drainage dynamics assessment

According to the results of the analysis of the drainage dynamics of the bottom of the Kakhovsky Reservoir, the area was estimated at 1,995.3 km² and a sharp reduction of the water area in the month of June and the gradual restoration of the historical channel of the Dnipro were revealed. Large swampy basins were formed, which will later become the main foci of the formation of pioneer vegetation and new small water bodies. Some reduction of the plant surface area during June was noted, which may be related to the drying of residual algae that remained after the water level decreased.

The lowest density of vegetation was noted in July, when pioneer vegetation had not yet begun to appear and residual vegetation had died (1.7 % of the total area of the reservoir). Subsequently, the area of vegetation increases at a significant rate: 8.3 % in August and 22.4 % in September. At the same time, there is a gradual draining of exposed sandy and muddy areas and a gradual stabilization of the channel. However, the water level will be variable due to periodic releases of water from reservoirs upstream. For example, during the period of intensive drainage of the bottom of the Kakhovsky Reservoir in August, the area of the water table was larger than in July: 5.2 % versus 4.8 %. At the end of September, the area of the water mirror was only 3 % of the total area of the studied area (Table 1).

T a b l e 1. Distribution of land surface classes within the Kakhovka Reservoir according to the classification results of four images received by the Sentinel-2 satellite in the period June – September 2023



Для класифікації реалізовано діаграму розподілу класів за площами у межах колишнього Каховського водосховища (рис. 3.14).

Додатково виконано класифікацію та оцінку площі даних розподілу індексу NDVI за чотирма діапазонами: < 0 – умовно відповідає водній поверхні; $0 \dots 0,35$ – умовно відповідає осушеній поверхні без рослинності; $0,35 \dots 0,65$ – умовно відповідає осушеній поверхні з розрідженою рослинністю; $> 0,65$ – умовно відповідає осушеній поверхні з густою рослинністю. За цими даними також прослідковується чітка динаміка втрати площі водної поверхні та поступове збільшення площ територій з густою рослинністю та заболоченими ділянками.

У результаті аналізу цих зображень чітко простежуються швидкості зміни образу структури земної поверхні дна Каховського водосховища, наочно демонструється заміщення одних класів поверхні іншими з тенденцією до осушення і заростання.

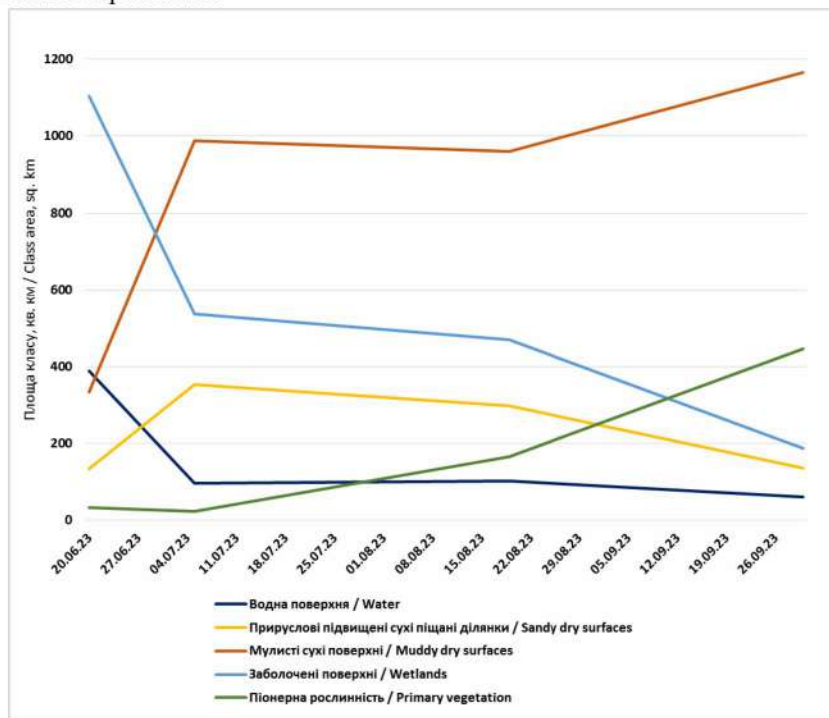


Рис. 3.14. Діаграма розподілу площ класів земної поверхні у межах Каховського водосховища за досліджуваний період

Fig. 3.14. Diagram of the land surface classes within the Kakhovka Reservoir for the study period

For classification, a diagram of the distribution of classes by area within the former Kakhovsky Reservoir was implemented (Fig. 3.14).

In addition, the classification and assessment of the data area of the distribution of the NDVI index was performed in four ranges: < 0 – conditionally corresponds to the water surface; $0 \dots 0.35$ – conditionally corresponds to the drained surface without vegetation; $0.35 \dots 0.65$ – conditionally corresponds to a drained surface with sparse vegetation; > 0.65 – conditionally corresponds to a drained surface with dense vegetation. According to these data, clear dynamics of the loss of the water surface area and the gradual increase in the area of territories with dense vegetation and wetlands are also observed.

Imagerye analysis clearly traced the rate of change in the image of the structure of the Earth's surface at the bottom of the Kakhovka reservoir. It also demonstrated the replacement of some classes of the surface by others with a tendency to drainage and overgrowth.

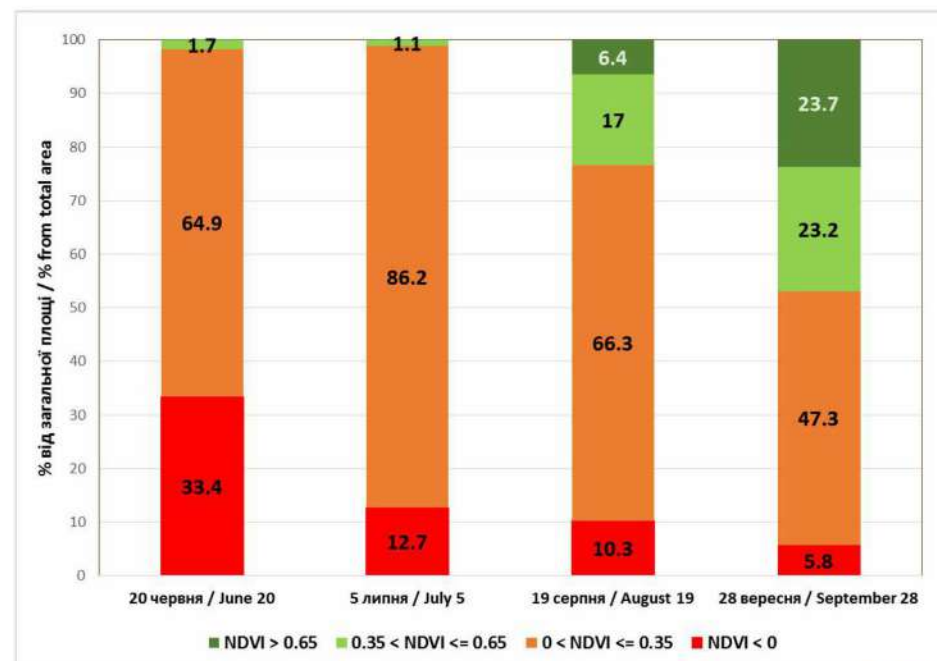


Рис. 3.15. Діаграма розподілу вегетаційного індексу NDVI у межах Каховського водосховища за дослідний період

Fig. 3.15. Diagram of the NDVI distribution of the within the Kakhovka Reservoir for the study period



3.6. Дослідження динаміки температурного поля дна Каховського водосховища

Дані довгохвильового інфрачервоного діапазону, надані супутниками Landsat дають змогу сформувати зображення розподілу температури земної поверхні та оперативно визначити ділянки, які піддаються порівняно швидкому висиханню, а також ділянки, що зберігають низьку температуру, які можуть бути осередками накопичення води та новоутвореними водоймами або осередками формування густого рослинного покриву.

До 2023 р. водна поверхня водосховища створювала охолоджувальний ефект у прилеглих до водосховища ділянках, існувало багато поливних земель. Найвищі показники поверхневої температури спостерігаються над промисловими підприємствами, не зарослими рослинністю відвалами, сільгоспугіддями, житловою забудовою міст.

Оцінка температурного поля поверхні у межах кожного знімку за 18 червня 2023 р., 4 липня 2023 р., 21 серпня 2023 р. та 30 вересня 2023 р. (рис 3.16 – 3.19) засвідчила відносні перепади поверхневої температури для окремих класів земної поверхні. Візуально простежується, що з часом дно стає сушішим і сильніше прогрівається (особливо у серпні). Тут більші амплітуди температурних коливань та значні диференціації між сухою, зволоженою і вкритою рослинністю землею поверхнею, яка швидкоплинно змінюється. Проте, вже у вересні, відбувається зменшення відносної диференціації поверхневої температури та заростання рослинністю і відчувається ефект охолодження укритих рослинністю ділянок.

Розраховані поверхневі температури коливаються в інтервалах від +22 °C для водної поверхні, до +30 °C на ділянках з піонерною рослинністю, до +40 °C на сухих мулистих поверхнях та до +53 °C на піщано-дитритових ділянках.

Проведений моніторинг поверхневих температур за Landsat територій униз і угору Дніпром від зруйнованої греблі. Періоди до підризу греблі і після показав, що разом з відновленням рослинного покриву відновлюється охолоджувальний ефект дна водосховища, тобто у тих самих ділянках, де відбувається приріст індексу NDVI.

У подальшому очікується більш інтенсивне відновлення рослинного покриву та відповідно більший охолоджувальний ефект, але відчутно слабший за рахунок значного зниження площі випаровування.

3.6. Study of the dynamics of the temperature field at the bottom of the Kakhovka Reservoir

Data of the long-wave infrared range provided by Landsat satellites make it possible to form an image of the temperature distribution of the earth's surface and quickly identify areas that are subject to relatively quick drying, as well as areas that maintain a low temperature, which can be centers of water accumulation and newly formed reservoirs or centers of the formation of dense vegetation cover.

By 2023, the water surface of the reservoir had a cooling effect on the areas adjacent to the reservoir, and there were many irrigated lands. The highest indicators of surface temperature are observed over industrial enterprises, dump sites not overgrown with vegetation, agricultural land, residential buildings of cities.

The assessment of the surface temperature field within each image for June 18, 2023, July 4, 2023, August 21, 2023, and September 30, 2023 (Figs. 3.16 – 3.19) showed relative differences in surface temperature for individual surface classes. It can be seen visually that over time, the bottom becomes drier and warms up more (especially in August). It has larger amplitudes of oscillations and differentiation between a dry, wet and vegetated surface, which rapidly changes its image. However, already in September, there is a decrease in the relative differentiation of the surface temperature when it is overgrown with vegetation, and the cooling effect of areas covered with vegetation is already felt.

The calculated surface temperatures range from +22 °C for the water surface, up to +30 °C on areas with pioneer vegetation, up to 40 °C on dry muddy surfaces and up to +53 °C on sandy-detrital areas.

The Landsat monitoring of surface temperatures in the areas downstream and upstream from the damaged dam along the Dnipro River, in the periods before and after the detonation, showed that the cooling effect of the bottom of the reservoir is restored together with the restoration of the vegetation cover, i.e. in the same areas where the NDVI index increases.

In the future, a more intensive restoration of the vegetation cover and, accordingly, a greater cooling effect is expected, but it will be significantly weaker due to a significant reduction in the area of evaporation.



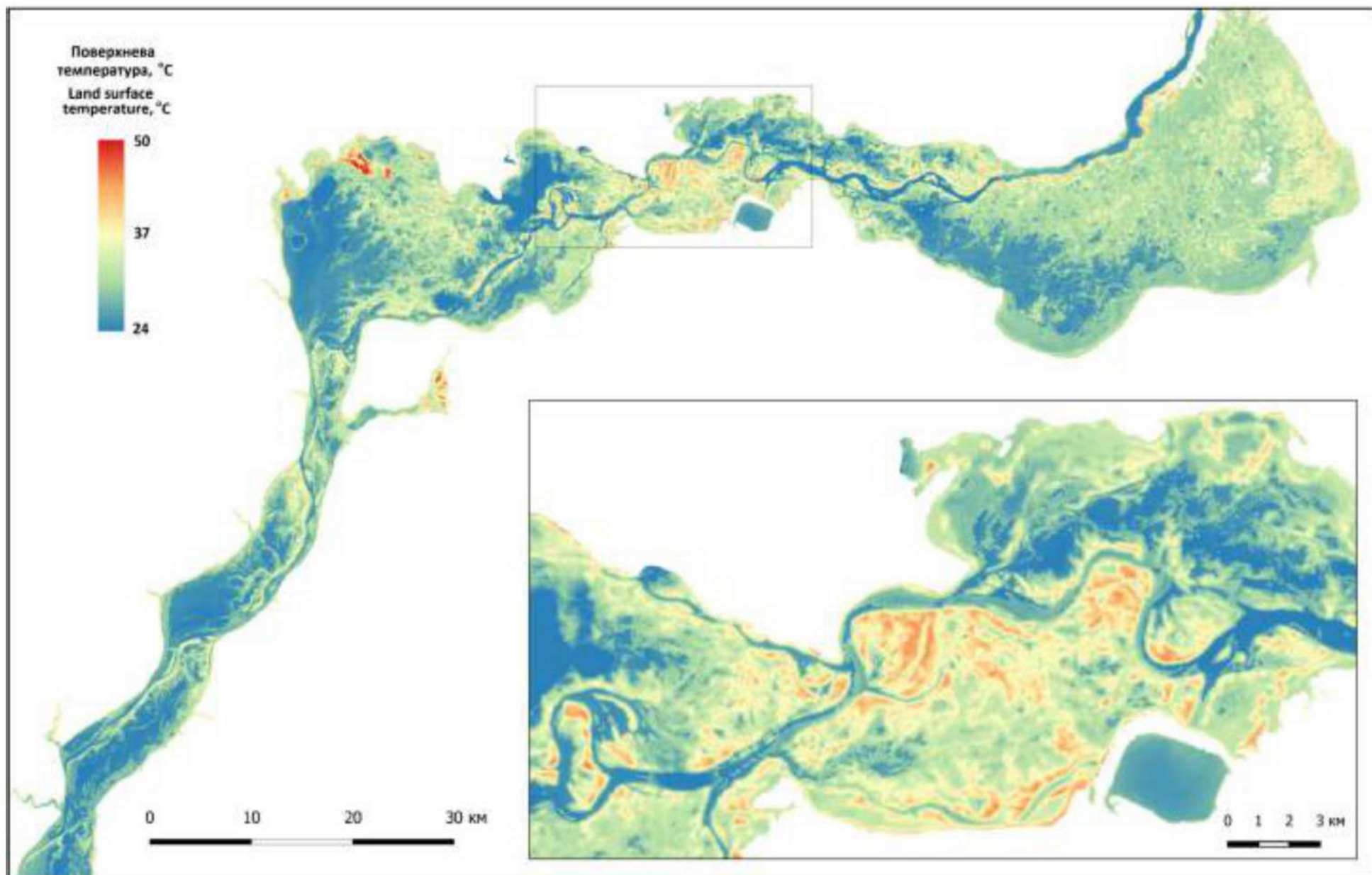


Рис. 3.16. Зображення розподілу температури на поверхні дна Каховського водосховища, за даними знімків Landsat, 18 червня 2023 р.

Fig. 3.16. Land surface temperature distribution of the Kakhovka Reservoir surface using Landsat imagery, June 18, 2023.

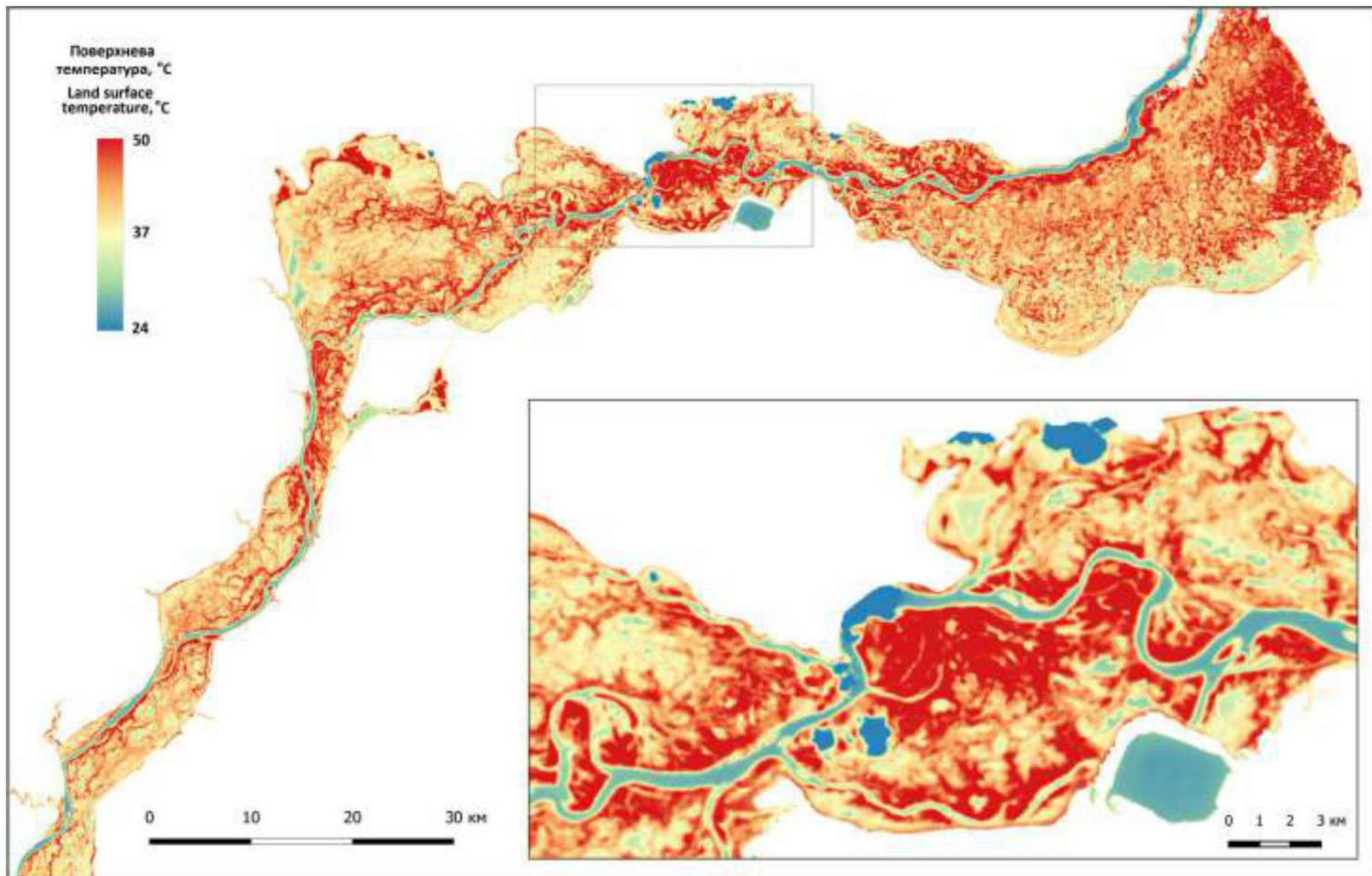


Рис. 3.17. Зображення розподілу температури на поверхні дна Каховського водосховища, за даними знімків Landsat, 4 липня 2023 р.

Fig. 3.17. Land surface temperature distribution of the Kakhovka Reservoir surface using Landsat imagery, July 4, 2023.

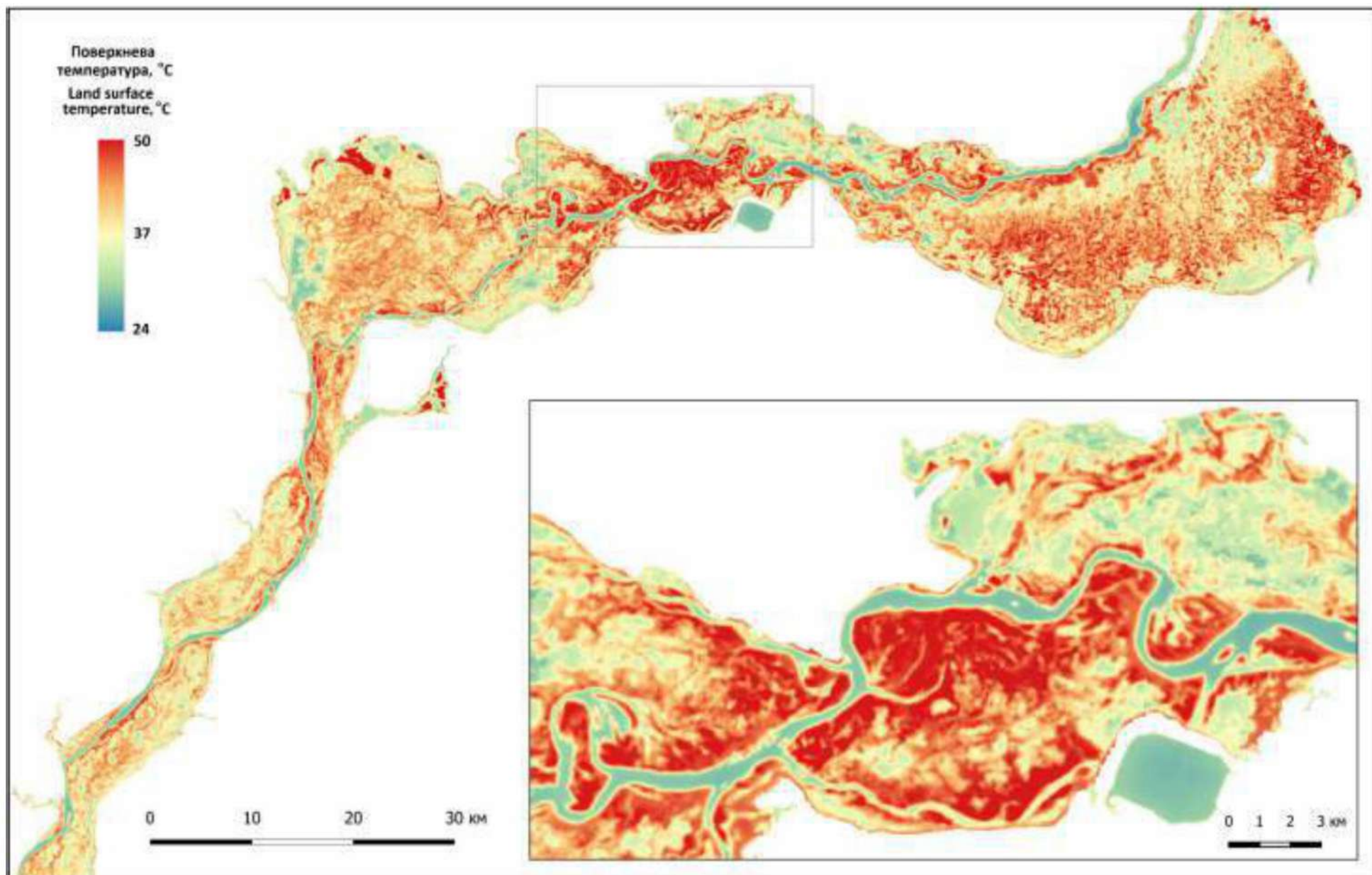


Рис. 3.18. Зображення розподілу температури на поверхні дна Каховського водосховища, за даними знімків Landsat, 21 серпня 2023 р.

Fig. 3.18. Land surface temperature distribution of the Kakhovka Reservoir surface using Landsat imagery, August 21, 2023.

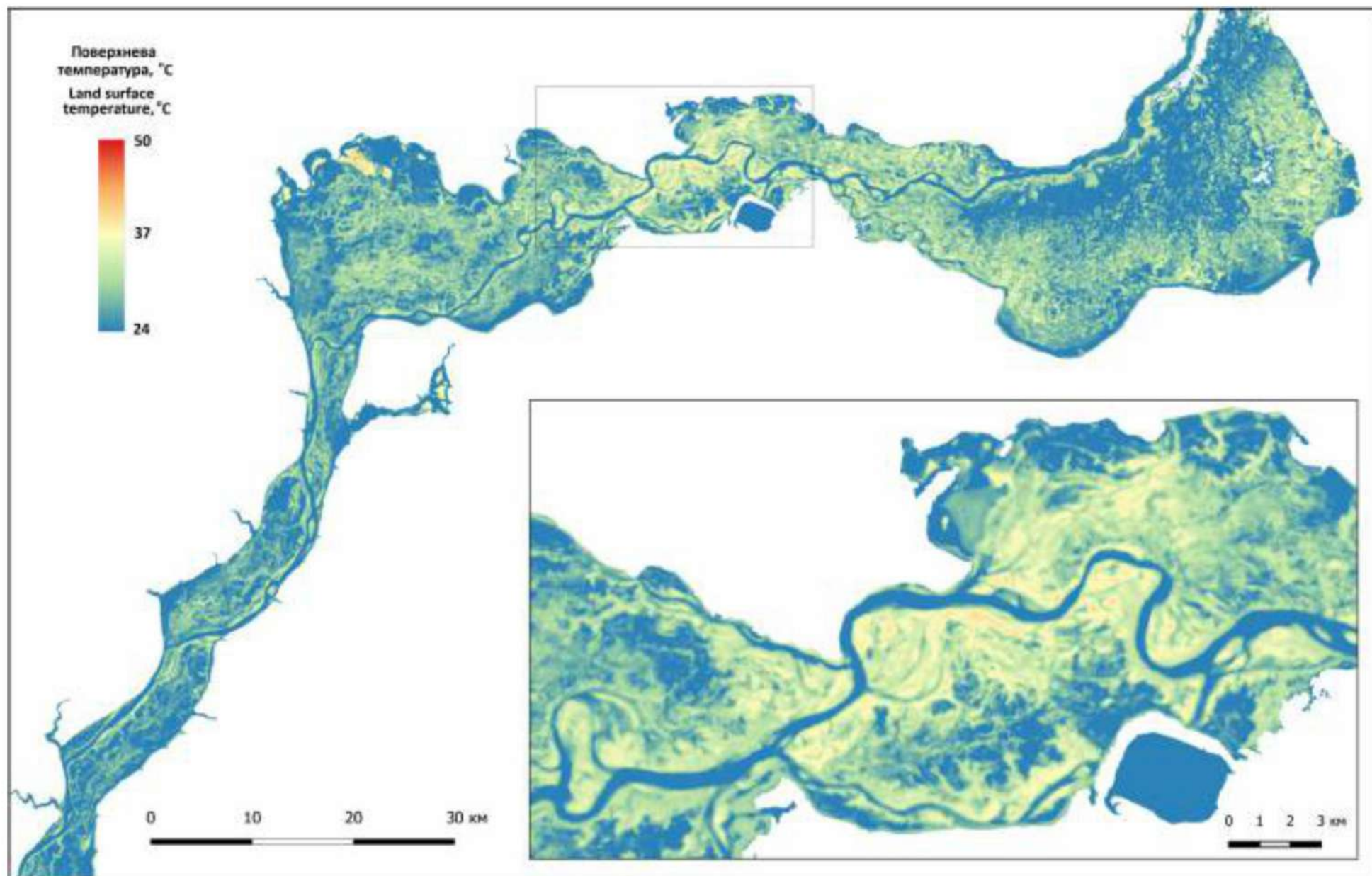


Рис. 3.19. Зображення розподілу температури на поверхні дна Каховського водосховища, за даними знімків Landsat, 30 вересня 2023 р.

Fig. 3.19. Land surface temperature distribution of the Kakhovka Reservoir surface using Landsat imagery, September 30, 2023.

РОЗДІЛ 4. ПРОГНОЗ РОЗВИТКУ БІОФІЗИЧНИХ ТА ГЕОЕКОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ УНАСЛІДОК ОСУШЕННЯ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА: “ЗА” І “ПРОТИ” ВІДНОВЛЕННЯ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

Українські біологи, ботаніки та екологи передбачають, що відновлення природних комплексів у межах колишнього Каховського водосховища триватиме 10 – 20 років, але на іншому біоценотичному рівні. Очікується, що пониження рівня ґрунтових і підземних вод спонукатиме до розвитку та активізації екзогенних процесів. Зменшиться або зовсім зникне абразія берегів, але активізується ерозія, заболочування заплав та осушеного дна водосховища внаслідок повеневих розливів води та періодичних опадів. Існують ділянки прибережних кіс та валів на піщаному ґрунті, які можуть важко закріплюватися, тому можуть активізуватися еолові процеси, а також ерозія. А ділянки понижень, що були заболочені, маючи певний рівень техногенного забруднення донних відкладів, у ході пересихання ще тривалий час можуть бути непридатними для використання та вегетаційної активності. Але вони започаткують нові біогеоценози і виконуватимуть інші екосистемні послуги, наприклад, постачання донних мулів та сапропелю для покращення родючості ґрунтів. На прилеглому суходолі в умовах дефіциту вологи, спостерігатимуться зміни геоєкологічного стану, деградації існуючих екосистем. Це стосується також затоплених гирлових частин балок, де були ставки, невеликі водосховища відгороджені дамбами.

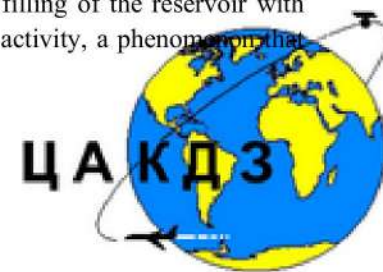
Важливим є те, що осушення водосховища не стало загрозою для Запорізької АЕС, що використовувала воду для свого ставка охолоджувача; рівень водозабезпечення атомної станції наразі є задовільним.

Натепер дослідження території колишнього Каховського водосховища демонструють поступове відновлення рослинного покриву та відновлення старих русел річок та рукавів Дніпра (рис. 4.1). У період зима – весна 2024 р. відбулося значне наповнення території водосховища паводковими водами, що потенційно спонукатиме до активного відновлення вегетаційного періоду, подальше дослідження якого продовжиться у майбутньому.

CHAPTER 4. BIOPHYSICAL AND GEOECOLOGICAL DEVELOPMENT FORECAST AS A RESULT OF THE KAKHOVKA RESERVOIR DRAINAGE: ADVANTAGES AND DISADVANTAGES KAKHOVKA RESERVOIR RESTORATION

Ukrainian biologists, botanists, and ecologists predict that restoring natural complexes within the former Kakhovka reservoir will last 10 – 20 years but at a different biocenotic level. Lowering the underground water level is expected to lead to the activation of exogenous processes. Coastal erosion will decrease or disappear; at the same time, erosion, floodplains' waterlogging and the reservoir's drained bottom will intensify due to floodwater spills and periodic rainfall. Coastal spits and embankments on sandy soil can be difficult to anchor, so eolian processes and erosion are likely to become more active. Swamped depressions with contaminated sediments and may not be suitable for use and vegetation activity for a long time after drying out. However, it can give life for new biogeocenoses and perform other ecosystem services, such as the bottom silts and sapropel formation to increase soil fertility. Changes in the geoecological state and degradation of existing ecosystems will be observed in moisture shortage conditions on the adjacent dry land. It also applies to the flooded streams in which dams fenced off ponds and small reservoirs. The restoration process also holds the potential for new ecosystem services, further enriching the ecological landscape.

It is reassuring to note that the reservoir's drainage did not pose a threat to the Zaporizhzhia Nuclear Power Plant, which relies on the reservoir for its cooling properties. The water supply of the power plant remains satisfactory and stable. Today, studies of the former Kakhovka reservoir reveal the gradual vegetation cover growth and the restoration of old riverbeds and branches of the Dnipro River (Fig. 4.1). During the winter-spring period in 2024, there was a significant filling of the reservoir with flood waters, which can potentially encourage vegetation activity, a phenomenon that requires further research.



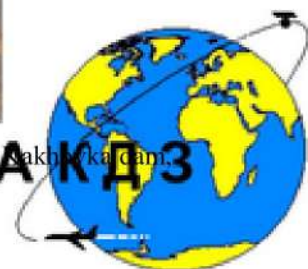
Поки складно робити прогнози щодо подальшого відновлення екосистем у межах колишнього водосховища та Великого Лугу, оскільки упродовж наступних років очікується поступова стабілізація берегових ліній. Однак уже за перший вегетаційний сезон було спростовано прогноз про те, що на цій території сформується перманентна пустеля та більш ймовірним стане формування широкого спектру різноманітних екоотопів, які потенційно можуть стати джерелом нових екосистемних послуг. Імовірно, більшість піонерної рослинності, що сформувалася упродовж першого після руйнування греблі вегетаційного сезону, загине та сформується набагато густіший рослинний покрив.

For now, it is difficult to predict further ecosystem restoration within the former reservoir and the Great Meadow, as the gradual stabilization of the coastlines is expected in the following years. However, the prediction that the permanent desert would form on this territory was disproved during the first growing season. A wide range of diverse ecotopes formed within the reservoir, potentially becoming a source of new ecosystem services, became more likely. Most of the pioneer vegetation grown during the first growing season after the dam destruction will die, and a much denser vegetation cover will be established.



Рис. 4.1. Зображення Каховського водосховища, за даними оптичного знімання із супутника Sentinel-2, 3 березня 2024 р.

Fig. 4.1. Kakhovka reservoir optical image after destruction of the Kakhovka dam, received by Sentinel-2 on March 3, 2024



Одразу після руйнування греблі Каховської ГЕС постало питання актуальності повоєнного відновлення греблі та гідроелектростанції. Сформувалися дві протилежні думки – за відновлення греблі, електростанції та водосховища та за збереження новосформованого русла Дніпра без відновлення греблі.

За відновлення греблі, електростанції та водосховища говорять ті, хто за необхідність відновлення водопостачання регіонів України, що залежало у минулому від каналів, які використовували воду з Каховського водосховища для багатьох потреб у металургії, енергетиці, сільському господарстві, побутовому водозабезпеченні. Регіон навколо Каховського водосховища комбінує активне сільське господарство та значні промислові потужності, що потребують великої кількості води. На 2023 – 2024 рр. склалася критична ситуація з водозабезпеченням важливих міст регіону – Нікополя, Марганця, Кривого Рогу. Дефіцит водних ресурсів у регіоні може призвести до економічних утрат та соціальних збитків на великих територіях.

Відновлення Каховської ГЕС уможливить генерування додаткової електроенергії, потужність у минулому якої становила усього 335 МВт.

Додатковим чинником є те, що в умовах повного зарегулювання Дніпра в усій своїй протяжності у межах України річка була судноплавною, а тепер судна можуть дістатись тільки до Запоріжжя.

З іншого боку, збереження поточного стану водосховища дасть змогу сформувати великі природні комплекси, що створять широкий спектр екосистемних послуг, уможливлять детальне та різнобічне вивчення земної поверхні, що десятиліттями перебували під водою.

Дискусія щодо відновлення Каховської ГЕС є відкритою, а ухвалення рішення про долю цих земель не буде вирішено до завершення воєнного стану в Україні, що дає змогу детально розробити найбільш ефективні та суспільно-корисні рішення.

Позитивні та негативні наслідки відновлення Каховської ГЕС наведено у *табл. 2*. Однак, якими б не були плани, їх втілення неможливе в умовах воєнного стану та постійної російської воєнної агресії проти населення прифронтових міст.

After the destruction of the Kakhovka dam, the relevance of the post-war dam restoration and the hydroelectric power station arose. Two opposite points of view were formed: either the dam, power plant, and reservoir restoration or the preservation of the newly formed Dnipro current without restoration of the hydro-technical facilities.

Building the new dam is required for water supply restoration in the regions of Ukraine, which depend on canals that take water from the Kakhovka reservoir for many needs: metallurgy, energy supply, agriculture, and domestic water supply. The area around the Kakhovka reservoir combines active agriculture and significant industrial facilities that require much water. In 2023 – 2024, there is a critical situation with the water supply of several big industrial cities: Nikopol, Marganets, and Kryvyi Rih. Water shortages in the region can result in economic and social losses over large areas.

Restoring the Kakhovska hydropower plant will also allow additional electricity generation; however, its energy capacity was only 335 MW in the past.

Another factor is that under full regulation, the Dnipro was navigable along its entire length within Ukraine's borders; now, ships can only reach Zaporizhzhia.

On the other hand, maintaining the current state offers the opportunity to create large natural complexes that can provide a diverse range of ecosystem services. It also allows for a detailed and comprehensive study of the land that has been submerged for decades, potentially yielding valuable insights and knowledge.

The discussion on the restoration of the Kakhovka Dam is open. The fate of these lands will be decided at the end of martial law in Ukraine, making it possible to develop the most effective and socially valuable solutions in detail.

All positive and negative consequences of restoring the Kakhovka hydropower plant are listed in *Table 2*. However, it's important to note that the current conditions of martial law and ongoing Russian military aggression against the population of the frontline cities pose significant challenges to the implementation of any plans, including the restoration of the Kakhovka hydropower plant.



Т а б л и ц я 2. Порівняльний аналіз економічних наслідків відновлення
Каховського водосховища

Позитивні	Негативні
Виробництво електроенергії	Уповільнення течій
Регулювання рівня води	Накопичення донних відкладів та аккумуляція забруднень та необхідність розчищення русла
Захист від повеней	Посилення евтрофікації
Судноплавство	Періодичний мор риби
Зрошення шляхом будівництва каналів до південних степів	Замулення джерел водозабезпечення річки
Покращення водозабезпечення для промислових об'єктів та населення	Підвищення рівня ґрунтових вод
Риборозведення	Підтоплення прилеглих територій
Зменшення ерозійних процесів на суходолі	Абразія та руйнування берегів
	Необхідність берегоукріплення

T a b l e 2. Comparison of the economic consequences of the Kakhovka reservoir
reconstruction

Positive	Negative
Electricity generation	River current slowing
Water level regulation	Sediments and pollution accumulation and current cleaning necessity
Flood prevention	Increasing eutrophication
Shipping	Periodic plague fish
Irrigation through building canals to the southern steppes	Siltation of water supply sources
improvement of water supply for industrial facilities and the population;	Ground water level rising
Fish farming	Periodic flooding
Erosion risk reduction	Abrasion and banks destruction
	Coastal fortification building necessity



ВИСНОВКИ

Знищення російською армією греблі Каховської ГЕС вночі 6 червня 2023 р. стало найбільшою техногенною катастрофою в Україні після Чорнобильської. Швидке підняття рівня води спричинило затоплення території на більш як 600 км² з повним затопленням кількох населених пунктів та великої кількості людських жертв.

З іншого боку, було осушене одне з найбільших водосховищ Європи з об'ємом 18,2 км³ води, що стало великим викликом для українського степу, який був залежним від водосховища. Дніпровські води, що дуже швидко наповнили Чорне море нижче гирла Дніпра, спричинили короточасне підвищення вегетаційної активності та зниження солоності моря. Після сходження води русло Дніпра стабілізувалось, а у межах колишнього Каховського водосховища почались докорінні екологічні зміни.

Незважаючи на 65-річний період експлуатації, накопичені донні відклади не змогли повністю замулити ані русло Дніпра, ані окремі його протоки та стариці. Наразі вони відновлюються майже у тих самих межах і абрисах. Значна частина колишньої заплави та надзаплавної тераси вийшла з води першою і там одразу почала проявлятися висока вегетаційна активність. У заболочених низинних ділянках заплави накопичуються значні об'єми донного осаду у вигляді мулів. Прибережні частини, збагачені делювіально-ілювіальними відкладами, є більш родючими, вони перші вкрилися паростками деревної і трав'яної рослинності.

CONCLUSIONS

The destruction of the Kakhovka dam by the Russian army on the night of June 6, 2023, became the largest man-made disaster in Ukraine after the Chernobyl disaster. The rapid rise of the water level caused the flooding of an area of more than 600 km², with the complete inundation of several settlements and a large number of human casualties.

On the other hand, one of the largest reservoirs in Europe, with a volume of 18.2 km³ of water, was drained, which became a big challenge for the entire Ukrainian steppe, which was dependent on the reservoir. The Dnipro waters, which quickly filled the Black Sea below the mouth of the Dnipro, caused a short-term increase in vegetation activity and decreased sea salinity. After the rise of the water, the Dnipro River began to stabilize, and fundamental ecological changes began within the former Kakhovka reservoir.

Despite the 65-year period of operation, the accumulated bottom sediments were unable to completely silt up the Dnipro riverbed, nor its distributary channels and old streams. They are restored almost in the same shapes. A significant portion of the former floodplain and fluvial terrace was the first to emerge from the water, sparking a surge in vegetation activity. In the swampy lowland areas of the floodplain, substantial volumes of bottom sediment in the form of silt accumulate. Coastal parts, enriched with deluvial-iluvial deposits, are more fertile, they were the first to be covered with sprouts of woody and herbaceous vegetation.



Сформувались нові прируслові вали, коси, банки з річкової дрейсени та алювіального піску, що вочевидь можуть змінювати абриси під час повеней та інтенсивних спусків води з верхніх водосховищ. Мулисті ґрунти, що висихають та розтріскуються, поступово стабілізуються вегетаційним рослинним покривом. За 2023 р. відбулося формування рослинності на 23 % території водосховища. Весняна повінь 2024 р., що вкрила більшу частину дна колишнього водосховища, підкріплює прогнози – вегетаційна активність тільки посилюватиметься.

Отже, створилися умови для відновлення цінних та унікальних екотопів на території понад на 2000 км² та формування нових заповідних територій.

Проте, у ході обговорення та планування майбутньої долі Каховської ГЕС і в цілому південного регіону, не можна ігнорувати проблему відновлення промислового та господарського водопостачання значної частини степової зони України, що багато десятиліть залежала від вод Каховського водосховища, над-важливого в умовах сучасних кліматичних викликів. Так, існують експертні оцінки, що без водосховища великі підприємства Дніпропетровської області не зможуть працювати навіть на 50 % своєї потужності. Залишається потреба у воді також і у Херсонській та Запорізькій областях, у визволеному Криму.

Слід ще враховувати, що у відсутність Каховського водосховища річковий транспорт перебуватиме замкненим у межах верхньої та середньої течії Дніпра, тобто зупиниться транзитне судноплавство від Києва до Чорного моря, що відіграло велику роль в аграрному та металургійному експорті України.

Отже, перед владою і відповідними відомствами виникла надскладна задача – віднайти економічно і екологічно обґрунтоване рішення щодо майбутнього Каховської ГЕС і південного регіону загалом. Очевидно, що пошук оптимального (раціонального) рішення, його обґрунтування неможливі без проведення комплексу міждисциплінарних наукових досліджень.

New dams, spits, banks of dreissena, and alluvial sand were formed, which can change their outlines during floods and intensive releases of water from upper reservoirs. Muddy soils that dry out and turns into takirs gradually stabilizes by vegetation cover. In 2023, vegetation covered 23 % former reservoir's area. The spring flood in 2024, which covered most of the bottom of the former reservoir, reinforces predictions that vegetation activity will only increase.

Thus, conditions were created to restore valuable and unique ecotopes on the territory of more than 2000 km² and to form new protected areas.

However, when discussing and planning the future fate of the Kakhovka dam and the southern region as a whole, one cannot ignore the problem of restoring industrial and economic water supply to a large part of the steppe zone of Ukraine, which for many decades depended on the waters of the Kakhovsky Reservoir, which is especially important in the conditions of modern climate challenges. Yes, there are expert assessments that large enterprises of the Dnipropetrovsk region will not be able to operate even at 50 % of their capacity without a reservoir. Water is also needed in the Kherson and Zaporizhzhia regions of liberated Crimea.

Furthermore, the absence of the Kakhovsky reservoir would have far-reaching implications. River transport would be halted within the upper and middle reaches of the Dnieper, effectively ceasing transit shipping from Kyiv to the Black Sea. This shipping route has been instrumental in Ukraine's agricultural and metallurgical exports, making its potential closure a significant concern.

Given these challenges, the authorities and relevant departments are confronted with a complex and demanding task. They must find an economically and ecologically sound solution for the future of the Kakhovsha dam and the southern region. It is clear that this task cannot be accomplished without a comprehensive and rigorous set of interdisciplinary scientific studies to guide the search for an optimal solution.



ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Лашенко Х.Г. Географія, природне середовище Вольностей Війська Запорозького та природокористування запорозьких козаків (1734 – 1775), дис. канд. іст. н., К.: Інститут історії НАН України, 2002. – 178 с.
2. Жуковский М.П. Про літочислення Нікополя. – К.: Українська видавнича спілка, 1996 – 2000. – 60 с.
3. Ельников М.В. Средневековый могильник Мамай –Сурка. – Запорожье, 2001, с. 106.
4. Яворницький Д.И. Запорожье в остатках старины и преданиях народа. Ч. 1, 2. – К.: Веселка, 1995. – 446 с.
5. Яворницький Д.И. Історія запорозьких козаків, у 3 томах. К.: Наук. думка, 1990.
6. Кашенко А. Ф. Оповідання про славне Військо Запорозьке Низове. – Дніпропетровськ: Січ, 1991. – 494 с.
7. Скальковський А.О. Історія Нової Січі або останнього Коша Запорозького. –Дніпропетровськ, 1994. – 157 с.
8. Чабаненко В. А. Українська Атлантида. Запоріжжя. 2006. – 215 с.
9. Чепурда Г.М. Великий план перетворення природи (1948 – 1965 рр.): Український вимір, дис. докт. іст. н., м. Черкаси, 2017. – 426 с.
10. Сандул В.А. Каховське водосховище сьогодні. Геоекологічні проблеми Каховського водосховища (до 50-річчя створення). – Кривий Ріг, 2008, с. 9 – 11.
11. Альохіна Т.М. Важкі метали у донних відкладах водосховищ. Геолого-екологічні проблеми Каховського водосховища. – Кривий Ріг, 2008, с. 30 – 32.
12. Бахтіарова Л.І. Історія досліджень причин та наслідків меліорацій в регіоні Північного Причорномор'я / Л.І. Бахтіарова // Вісник Одес. нац. ун-ту. Географічні та геологічні науки. – 2014. – Т. 19. Вип. 1, с. 69–78.
13. Ліщенко Л.П. Обґрунтування методики оцінки геоекологічного стану гірничопромислових територій на основі ландшафтно-системного підходу і аерокосмічної інформації. дис. к. г. н., – К. ЦАКДЗ ІГН НАН України, 2004. – 196 с.
14. Тектонічна карта України масштабу С.С. Круглов, Д.С. Гурський, 2007 Інтерактивні історичні карти Дніпра. Локація Великий луг. Сайт: oldmaps.dn.ua
15. Denysik G. Regional climate changes of the interzonal geoecon of Ukraine “forest-steppe-steppe” / Scientific Notes Ternopil National Pedagogical University, Series Geography. Тернопіль, 2020. № 2. Вип. 49. 246 с.
16. Великий Луг Запорозький: Історико-топонімічний словник. – Запоріжжя: ЗДУ, 1999. – 331 с.
17. Сайт: oldmaps.dn.ua (Інтерактивні історичні карти Дніпра).
18. Мичак А.Г., Філіпович В.Є., Мичак Н.Г. Сучасні геоекологічні проблеми північної частини басейну р. Ірпін та шляхи їх вирішення (на основі матеріалів космічних зйомок і наземних досліджень). Фізична географія та геоморфологія, 46 1–6 (117–122), 2023, с. 28–37. <https://doi.org/10.17721/phgg.2023.1-6.03>
19. Нижньодніпровський національний природний парк (2024, 1 березня). Про нас. <http://nppn.org.ua/pro-nas>
20. Національний природний парк “Нижньодніпровський” (2023, 7 червня). <https://www.facebook.com/nppNDpark/posts>
21. Farr T.G., Rosen P., Caro E. et al. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. Reviews of Geophysics, 45(2). <https://doi.org/10.1029/2005rg000183>
22. Sentinelhub (2024, 1 березня). Sentinel-2. <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel/sentinel-2/>
23. Sentinelhub (2024, 1 березня). Normalized difference vegetation index. <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/ndvi/>
24. Rodrigues G., Potes M., Costa M.J. et al. Temporal and Spatial Variations of Secchi Depth and Diffuse Attenuation Coefficient from Sentinel-2 MSI over a Large Reservoir. Remote Sens. 2020, 12, 7 <https://doi.org/10.3390/rs12050768>
25. Rodrigues G., Potes M., Penha A.M. et al. The Use of Sentinel-3/OLCI for Monitoring the Water Quality and Optical Water Types in the Largest Portuguese Reservoir. Remote Sens. 2022, 14, 2172. <https://doi.org/10.3390/rs14092172>
26. Lacaux J.P., Tourre Y.M., Vignolles C. et al. Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. Remote Sensing of Environment, Vol. 106, Issue 1, 2007, 66-74, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.012>
27. Mishra S., Mishra D.R. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a-concentration in turbid productive waters. Remote Sens. Environ. 2012, 117, 394–406 <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.016>



28. Sòria-Perpinyà X., Vicente E., Urrego P. et al. (2021). Validation of water quality monitoring algorithms for Sentinel-2 and Sentinel-3 in mediterranean inland waters with in situ reflectance data. *Water* 13(5), 686. <https://doi.org/10.3390/w13050686>
29. Зрошуване землеробство: Збірник наукових праць. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2010. Вип. 54. – 396 с.
30. Прес-служба Апарату Верховної Ради України (2023, 14 червня). Збитки гідротехнічної меліорації вже сягнули понад 150 млрд. гривень. https://www.rada.gov.ua/news/news_kom/237726.html
31. Running S., Mu Q., Zhao M. (2021). *MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061* [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. Accessed 2024-03-01 from <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.061>
32. Earth Engine Data Catalog (2023, March 01) MOD16A2.061: Terra Net Evapotranspiration 8-Day Global 500m. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/MODIS_061_MOD16A2





Наукове видання

**КАТАСТРОФА КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА:
свідчать супутникові знімки**

**КАКHOVKA RESERVOIR DISASTER:
satellite imagery evidence**

ТОВ «Українська Картографічна Група»
вул. Тампере, 13-Б, м. Київ, 02105, тел. (067) 464 11 81, www.ukg.org.ua
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців,
виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5097 від 12.05.2016 р.

ТОВ «ВБ «Аванпост-ПРИМ»
вул. Дениса Монастирського, 3, корп. 3, м. Київ, 03035
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців,
виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 3843 від 22.07.2010 р.

Формат 60 × 90/8
Ум. друк. арк. 11,5

