В рамках виконання роботи з прогнозу зон затоплень в нижніх б’єфах ГЕС Дніпровського каскаду водосховищ для різних сценаріїв руйнування гребель ГЕС внаслідок аварій чи військових дій при різних гідрологічних режимах водосховищ виконані наступні завдання:

1. Створено цифрову модель місцевості (ЦММ), відміток рельєфу дна водойм і берегів, Каховського водосховища і р. Дніпро та прирічкових територій у нижньому б’єфі Каховської ГЕС. Розроблено об’єднану двовимірну модель (ДВМ) Каховського водосховища і заплави р. Дніпро нижче греблі Каховської ГЕС для прогнозу затоплень берегів Дніпра у нижньому б'єфі Каховської ГЕС внаслідок прориву греблі Каховської ГЕС.
2. Для розробленої ДВМ проведено розрахунки, за заданими сценаріями прориву греблі Каховської ГЕС, зон затоплень заплави Дніпра у нижньому б'єфі Каховської ГЕС для заданих: геометрії пролому у греблі ГЕС, скидів ГЕС, рівнів Каховського водосховища і Дніпровської заплави. Визначені глибини затоплення у нижньому б’єфі Каховської ГЕС, кінцевий стан спустошеного Каховського водосховища, еволюція рівня води у заданих контрольних точках у водосховищі, уздовж русла Дніпра та на берегах у населених пунктах нижче греблі Каховської ГЕС.
3. Спеціалістами з геоінформаційного аналізу Центру ГІС АНАЛІТИК облаштований відповідний сегмент на Геопорталі ДСНС, для публікації зон затоплень з результатами оцінки можливих наслідків. Дані результатів моделювання у відповідних форматах передані спеціалістам Центру ГІС АНАЛІТИК. Ними на Геопорталі ДСНС, для регламентованого доступу спеціалістів ДСНС, розміщені результати гідродинамічного моделювання та просторового аналізу можливих наслідків затоплення заплави Дніпра в нижньому б’єфі Каховської ГЕС за заданими сценаріями прориву греблі Каховської ГЕС.

Опис розробленої ДВМ Каховського водосховища і заплави р. Дніпро в нижньому б’єфі Каховської ГЕС, а також отриманні результати моделювання затоплення заплави Дніпра та спустошення Каховського водосховища внаслідок прориву греблі Каховської ГЕС представленні у Додатку А.

Короткий опис використаної для розрахунків чисельної моделі двовимірної гідродинаміки мілкої води COASTOX, розпаралеленої для багатопроцесорних комп’ютерів і графічних процесорів представлено у Додатку Б.

Додаток А.

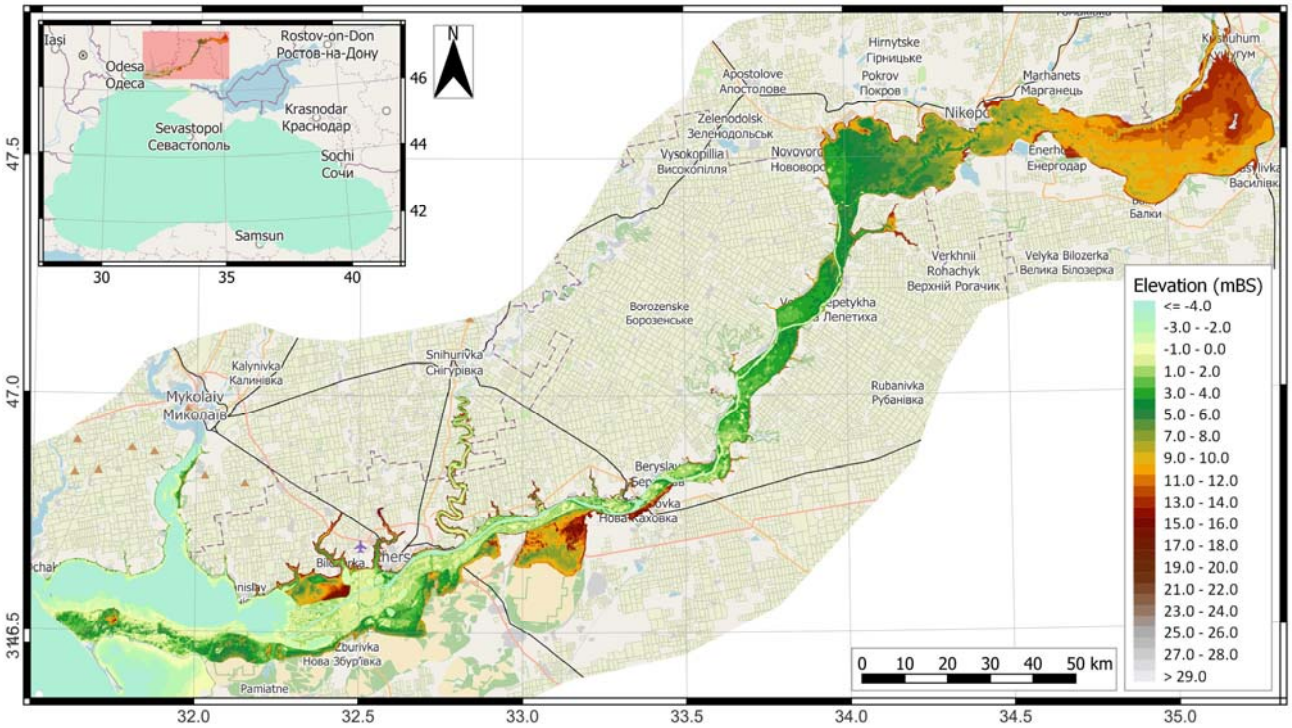

Рис. 1. Загальний вигляд топографії розрахункової сітки на карті району дослідження: Каховське водосховище, р. Дніпро від греблі Каховської ГЕС до гирла Дніпровська затока з прилеглими берегами.

Для прогнозу наслідків руйнування греблі Каховської ГЕС, спустошення Каховського водосховища і затоплення заплави р. Дніпро від греблі ГЕС до Дніпровської затоки, використовувалася чисельна гідродинамічна модель COASTOX-UN, розроблена в Інституті математичних машин і систем НАН України (ІПММС НАНУ) [1]. Модель прогнозує динаміку води у відкритих водоймах на основі розв’язку двовимірних рівнянь мілкої води на неструктурованих сітках з трикутними комірками змінного розміру.

Досліджувана область включала Каховське водосховище, від південного краю острова Хортиця до греблі Каховської ГЕС, і річку Дніпро із заплавою, від греблі ГЕС до Дніпровської затоки. Також в область включено заплаву річки Інгулець, від гирла до с. Новокондакове вище за течією, і Дніпровську затоку з Бузьким лиманом і прилеглим Кінбурнським півостровом. Для виділення заплав річок використовувалася цифрова модель рельєфу FABDEM (Forest And Buildings removed Copernicus DEM) [2] із роздільною здатністю 1 кутова секунда, що знаходиться у відкритому доступі [3]. Для виключення впливу випускної граничної умови нижче за течією до області було додане Чорне море. Загальний вигляд розрахункової області представлено на Рис. 1.

У якості даних рельєфу для досліджуваної області використовувалися цифрові топографічні карти масштабом 1:10000 з ізолініями рельєфу надані Державною службою України з питань геодезії, картографії і кадастру, і ЦМР FABDEM для ділянок, не покритих топографічними картами.

Відмітки рельєфу дна Каховського водосховища і Дніпра визначалися за значеннями глибин отриманими з навігаційних карт з набору № 3528 «Річкові навігаційні карти Нижнього Дніпра від Каховської ГЕС до гирла», масштабом 1:10000 і 1:25000, і набору № 3529 «Річкові навігаційні карти Каховського водосховища від Дніпровської ГЕС до Каховської ГЕС», масштабом 1:25000 і 1:50000. Відмітки дна Дніпровської затоки і Бузького лиману визначалися за картами: №3506 «Чорне море. Дніпровський Лиман. Від мису Станіслав до селища Кізомис», масштабом 1:25000, №3404 «Чорне море. Річка Південний Буг. Від гирла до Миколаєва», масштабом 1:50000, №3405 «Чорне море. Від Очакова до річки Південний Буг», масштабом 1:50000.

На основі цих даних була створена ЦМР Каховського водосховища, р. Дніпро від Каховської ГЕС до гирла і Дніпро-Бузького лиману із прилеглими берегами в декартовій системі координат UTM36 роздільною здатністю 20×20 м.

Частина розрахункової сітки Чорного моря з визначеним рельєфом була запозичена зі створеної раніше в ІПММС НАНУ моделі ерозії берегів Західного Криму [4] і перетворена від географічних координат до декартової системи координат розрахункової області UTM36. Ця частина розрахункової сітки складається з 100325 вузлів і 191766 трикутних комірок змінного розміру, від 25 км у відкритому морі до 500 м на узбережжі.

Частину розрахункової сітки для заплави Дніпра від греблі Каховської ГЕС до гирла і Дніпровської затоки з берегами було створено на основі ЦМР FABDEM. Використовуючи багатокутник на основі границь заплави з FABDEM була вирізана частина і кожен її піксель, що для даного регіону має розмір приблизно 20×30 м, було розділено по діагоналі на два трикутники. Отримана частина сітки має розмір 3544261 вузол і 7053704 комірки.

Сітку для Каховського водосховища було згенеровано за допомогою вільно розповсюджуваної Community Edition версії програмного пакету SMS 13.1 від компанії Aquaveo. Вона складається з 148707 вузлів і 279782 комірок. Вона згущена уздовж колишнього русла Дніпра, розмір комірок тут 70-80 м, і деталізована по берегах, розмір комірок – 50 м. У віддалених від берегів і русла частинах водосховища розмір комірок поступово збільшується до базової величини 250 м. Найбільш розрідженою частиною сітки водосховища є північно-східна ділянка біля архіпелагу Великі і Малі Кучугури.

Окремі частини об’єднувались також за допомогою програми SMS 13.1 Community Edition. Об’єднана розрахункова сітка всієї досліджуваної області, Каховське водосховище, заплава Дніпра нижче греблі ГЕС, Дніпровська затока з прилеглими берегами, плюс Чорне море, має 3793350 вузлів і 7527307 комірок. Рельєф для повної розрахункової сітки визначався лінійною інтерполяцією значень з побудованої ЦМР всієї області у вузли сітки. Кольорову карту рельєфу повної розрахункової сітки представлено на Рис. 1. Загальний вигляд сітки, її частину для Каховського водосховища, та ділянку в районі греблі Каховської ГЕС показано на Рис. 2-4.

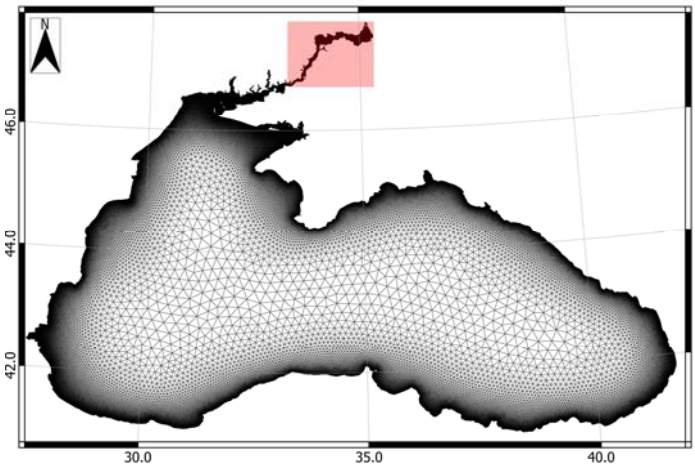

Рис. 2. Загальний вигляд розрахункової сітки.

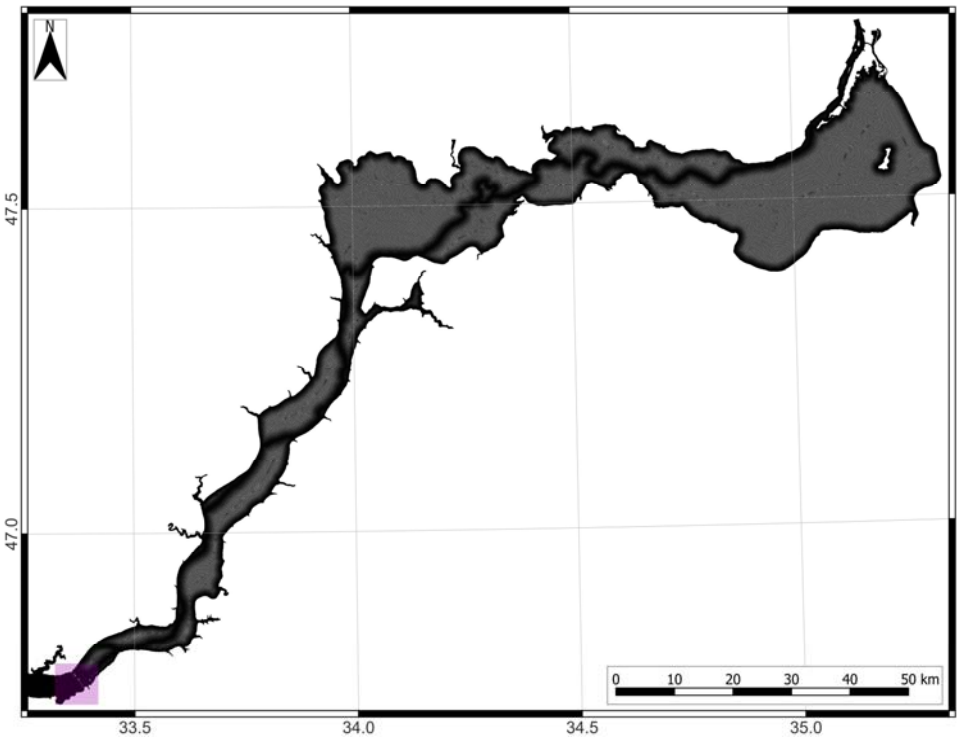

Рис. 3. Частина розрахункової сітки для Каховського водосховища. Показану область виділено рожевим прямокутником на Рис. 2.

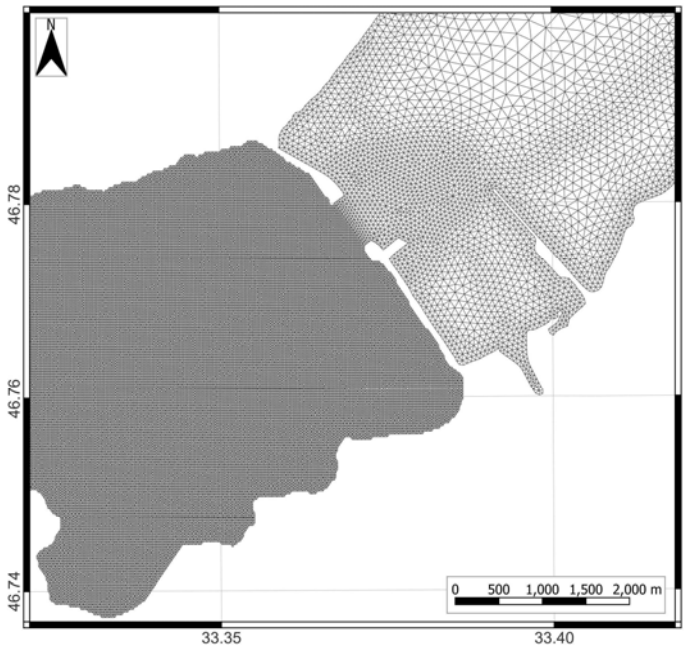

Рис. 4. Ділянка розрахункової сітки в районі греблі Каховської ГЕС. Показану область виділено фіолетовим прямокутником на Рис. 3.

Донне тертя для розрахункової області задавалось квадратичною залежністю від швидкості течії з коефіцієнтом тертя, визначеним за формулою Манінга. Коефіцієнт Манінга приймався рівним 0.022 для Каховського водосховища і 0.026 для русла Дніпра і Чорного моря. Для островів і берегів річок і моря коефіцієнт Манінга покладався рівним 0.1. Розподіл коефіцієнта Маніга для розрахункової області представлено на Рис. 5.

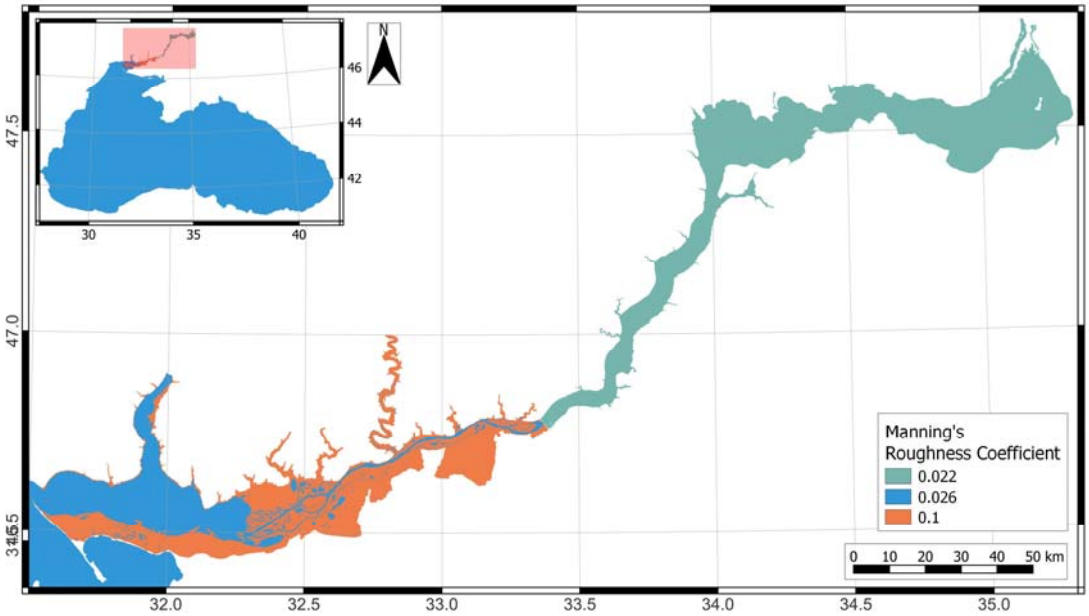

Рис. 5. Розподіл коефіцієнта шорсткості Манінга на розрахунковій сітці.

Також, для допоміжних цілей, з частин для заплави Дніпра, Дніпровської затоки і Чорного моря було скомпонована розрахункова сітка лише для ділянки розрахункової області нижче греблі Каховської ГЕС без Каховського водосховища. Її розмір 3645631 вузол і 7247431 комірка. Вона, разом з сіткою Каховського водосховища, використовувались для створення початкової умови на повній розрахунковій сітці перед проривом греблі.

Також ці сітки можуть використовуватись самостійно. Сітка Каховського водосховища – для моделювання розподілу течій у водосховищі. Сітка для ділянки нижче греблі Каховської ГЕС – для прогнозу затоплення заплави Нижнього Дніпра під час весняних повеней або при значних робочих чи аварійних скидах ГЕС.

Прогноз наслідків руйнування греблі Каховської ГЕС за допомогою розробленої моделі виконується наступним чином.

Спочатку на розрахунковій сітці Каховського водосховища, з початкової умови нульових швидкостей і заданого рівня води, моделюється розподіл течій і рівня вільної поверхні, що встановлюється при визначених граничних умовах на впускній і випускній границях, заданих скиді Дніпровської ГЕС і скиді Каховської ГЕС, або рівні води на верхньому б’єфі Каховської ГЕС.

Потім на розрахунковій сітці заплави Нижнього Дніпра, Дніпровської затоки і Чорного моря, з початкової умови нульових швидкостей і заданого рівня моря і Дніпра, моделюється розподіл течій і рівня вільної поверхні, що встановлюється при впускній граничній умові, заданому скиді Каховської ГЕС.

З отриманих розподілів швидкостей і рівня вільної поверхні вище і нижче греблі Каховської ГЕС програма препроцесор формує початкові умови на повній розрахунковій сітці і записує їх у рестарт файл програми COASTOX-UN.

Геометрія пролому у греблі ГЕС визначається значеннями рельєфу у відповідних вузлах сітки (Рис. 6). На даний момент форма пролому задається перед початком і не змінюється протягом моделювання. Це відповідає дуже швидкому, миттєвому руйнуванню греблі. На наступному етапі розвитку моделі, рельєф у відповідних вузлах сітки може бути заданим змінним за залежностями, шо описують теоретичну або емпіричну зміну форми пролому у часі.

Відповідно перед початком моделювання хвилі прориву маємо задану рельєфом геометрію пролому у греблі і розподіл швидкостей і рівня вільної поверхні вище і нижче греблі (Рис. 7). Зі стартом моделювання хвиля прориву починає рух відповідно до базових рівнянь моделі.

Масштаб хвилі прориву і характер затоплення заплави Нижнього Дніпра залежить від наступних основних параметрів: початкового рівня Каховського водосховища, скиду Дніпровської ГЕС, скиду Каховської ГЕС, початкового рівня Чорного моря, геометрії пролому.

Нами було розглянуто два сценарії прориву греблі Каховської ГЕС. Для обох пролом має прямокутну форму шириною 400 м на місці водозливної греблі ГЕС, нижній рівень пролому знаходиться на відмітці 0 м БС (Рис. 6). Для першого «мінімального» сценарію початковий рівень водосховища 13 м БС, близький до РМО 12.7 м БС, скиди Дніпривської і Каховської ГЕС дорівнюють 600 куб.м/с, початковий рівень Чорного моря і Нижнього Дніпра складає 0 м БС (Рис. 7). Іншій «актуальний» сценарій відповідає гідрологічній ситуації, на першу половину листопада: початковий рівень Каховського водосховища дорівнює 15 м БС, скиди Дніпривської і Каховської ГЕС – 1000 $м^3$/с, початковий рівень Чорного моря і Нижнього Дніпра – 0 м БС.

Під час моделювання програма COASTOX-UN з заданим часовим інтервалом виводить швидкості течії і рівень вільної поверхні у всіх вузлах розрахункової сітки у зовнішні файли бінарного формату програми SMS. Це дозволяє візуалізувати еволюцію течій і рівня води під час руху хвилі прориву у програмі SMS 13.1 Community Edition або у геоінформаційному пакеті QGIS версії 3.4 і старше.

На Рис. 8-12 зображено еволюцію 3D вільної поверхні води у перші 5 хвилин після прориву, з інтервалом 1 хвилина, побудовану в програмі SMS 13.1 для сценарію з рівнем води у Каховському водосховищі 13 м БС і скидом ГЕС 600 куб.м/с.

З рисунків видно, що модель відтворює основні особливості хвилі прориву у заплаві Дніпра: бор, що формується після прориву; гідравлічні стрибки напроти проламу, в місці найшвидшої течії; хвилю відбиту від острову напроти греблі.

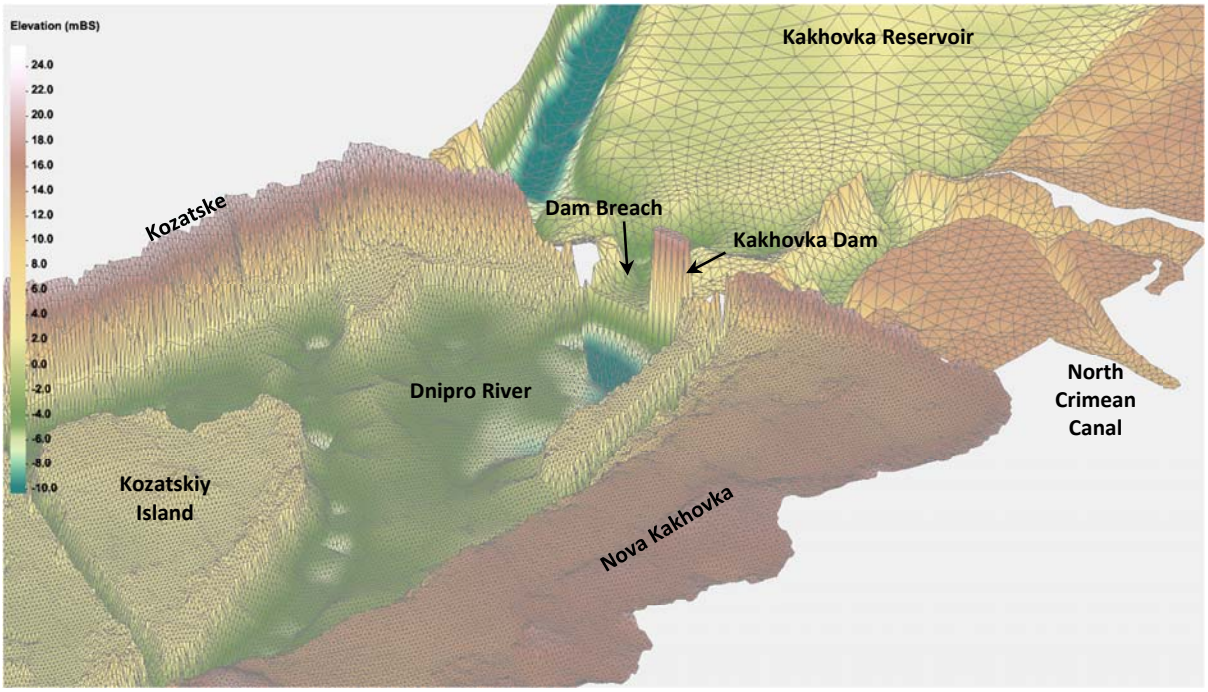

Рис. 6. Розрахункова сітка в районі греблі Каховської ГЄС.

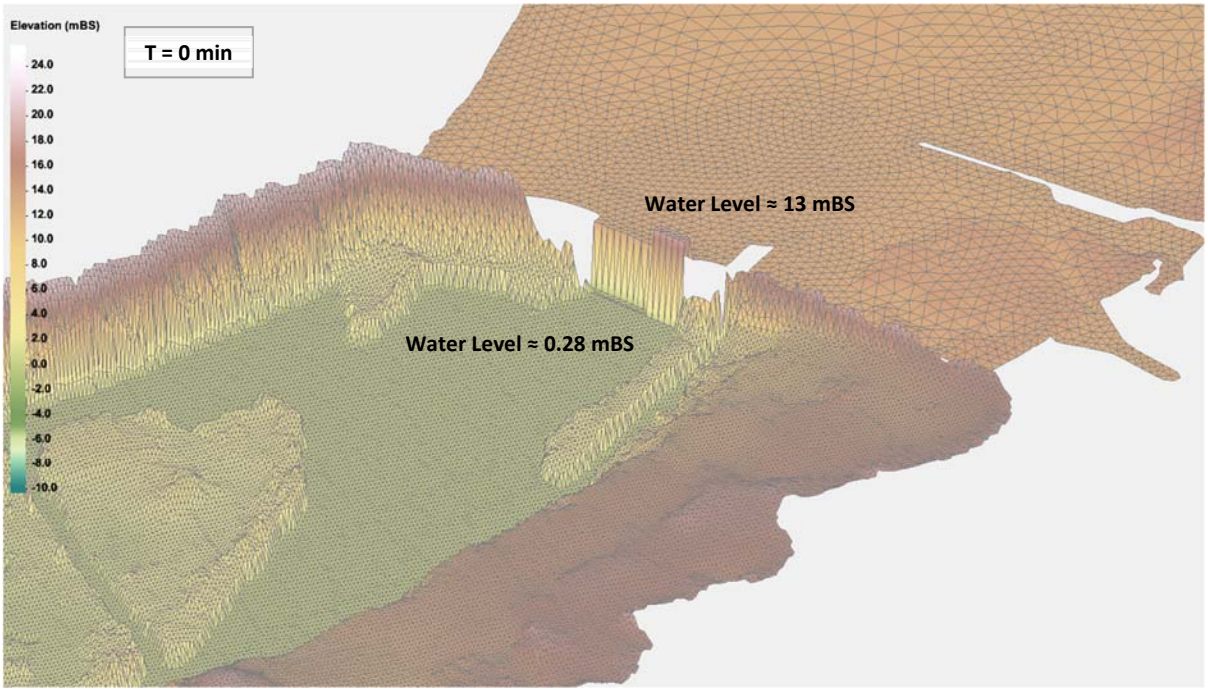

Рис. 7. Вільна поверхня води в районі греблі Каховської ГЄС перед проривом греблі. Сценарій із вільною поверхнею води у Каховському водосховищі 13 м БС, скидом ГЕС 600 куб.м/с і проломом у греблі завширшки 400 м.

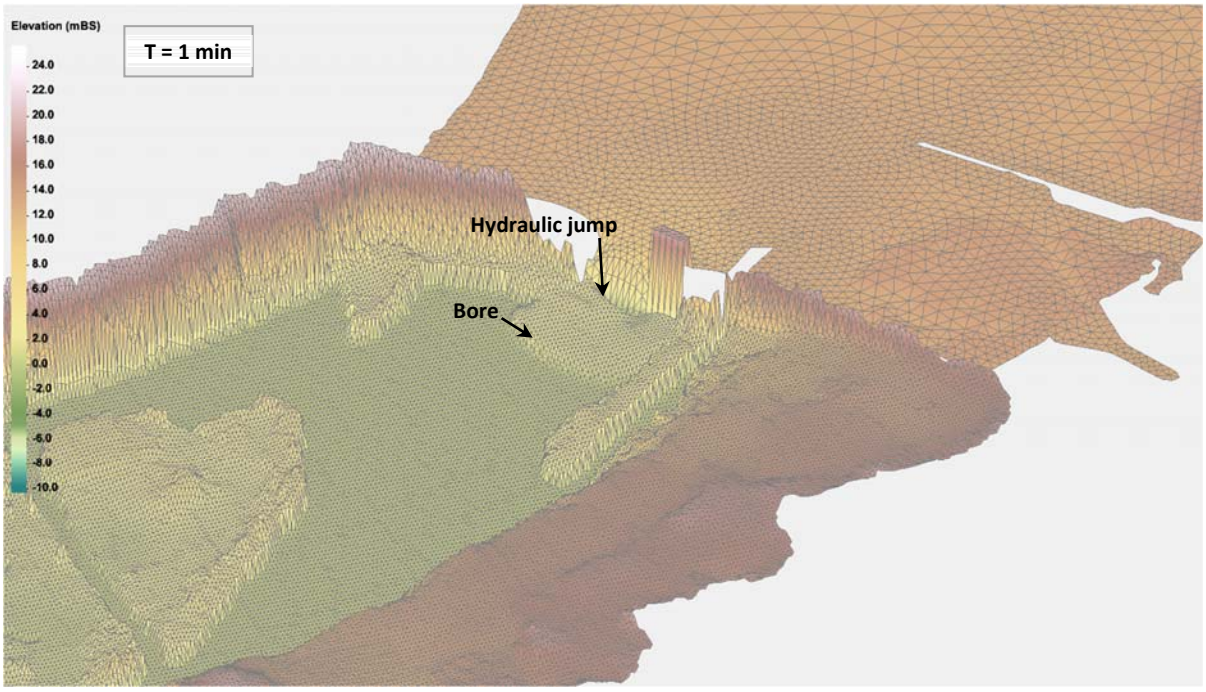

Рис. 8. Вільна поверхня води в районі греблі Каховської ГЄС через 1 хвилину після прориву греблі. Сценарій із вільною поверхнею води у Каховському водосховищі 13 м БС, скидом ГЕС 600 куб.м/с і проломом у греблі завширшки 400 м.

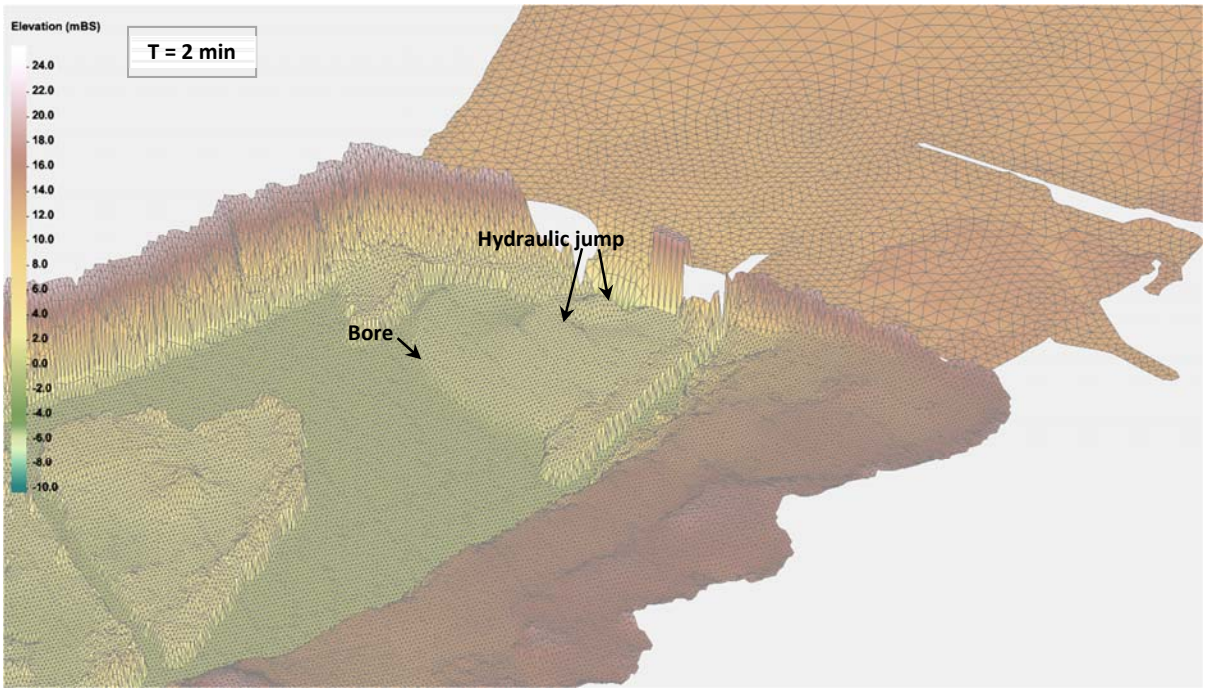

Рис. 9. Вільна поверхня води в районі греблі Каховської ГЄС через 2 хвилини після прориву греблі. Сценарій із вільною поверхнею води у Каховському водосховищі 13 м БС, скидом ГЕС 600 куб.м/с і проломом у греблі завширшки 400 м.

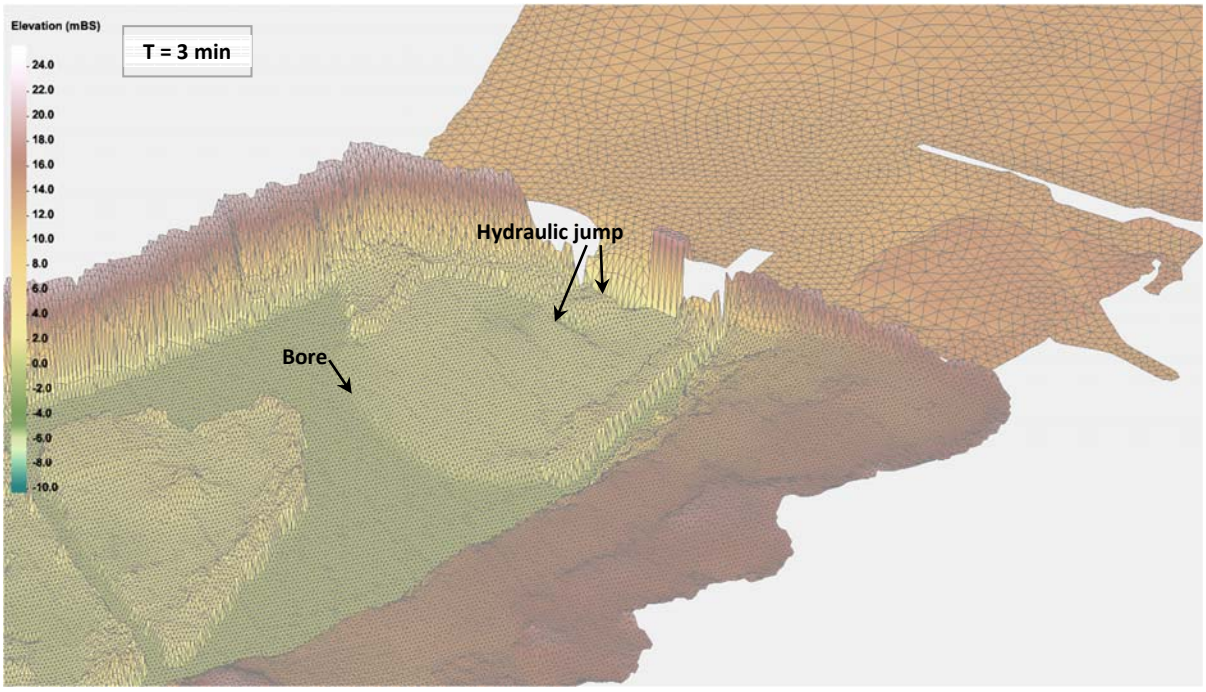

Рис. 10. Вільна поверхня води в районі греблі Каховської ГЄС через 3 хвилини після прориву греблі. Сценарій із вільною поверхнею води у Каховському водосховищі 13 м БС, скидом ГЕС 600 куб.м/с і проломом у греблі завширшки 400 м.

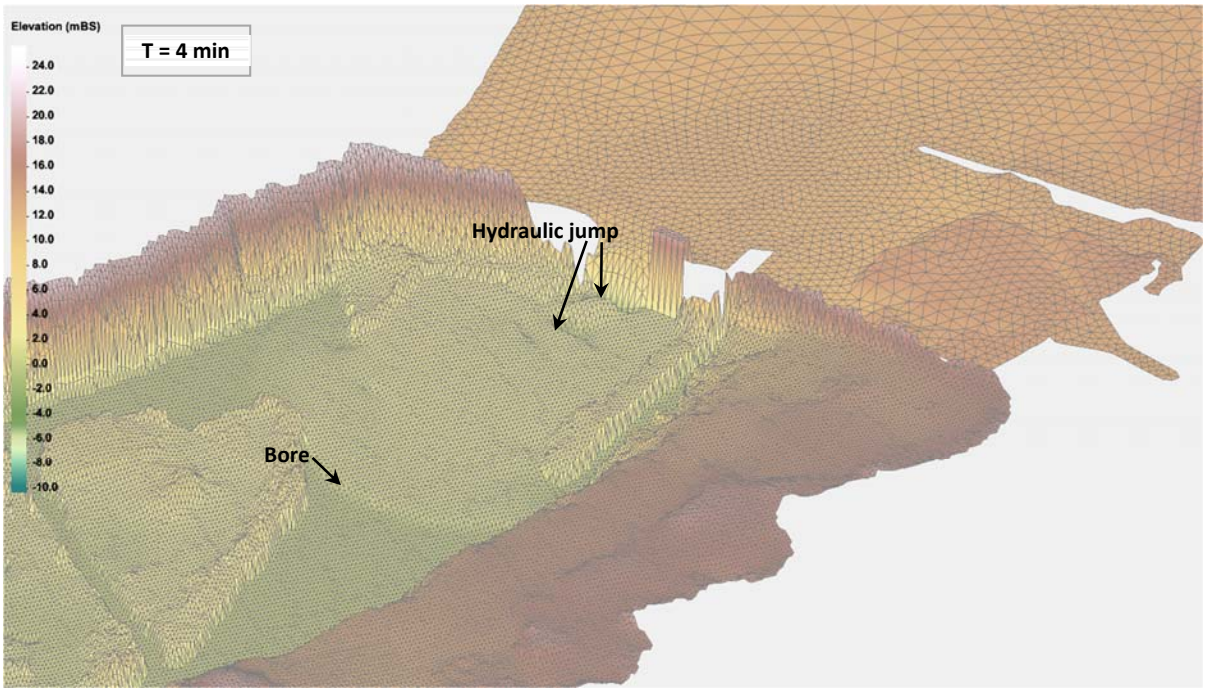

Рис. 11. Вільна поверхня води в районі греблі Каховської ГЄС через 4 хвилини після прориву греблі. Сценарій із вільною поверхнею води у Каховському водосховищі 13 м БС, скидом ГЕС 600 куб.м/с і проломом у греблі завширшки 400 м.

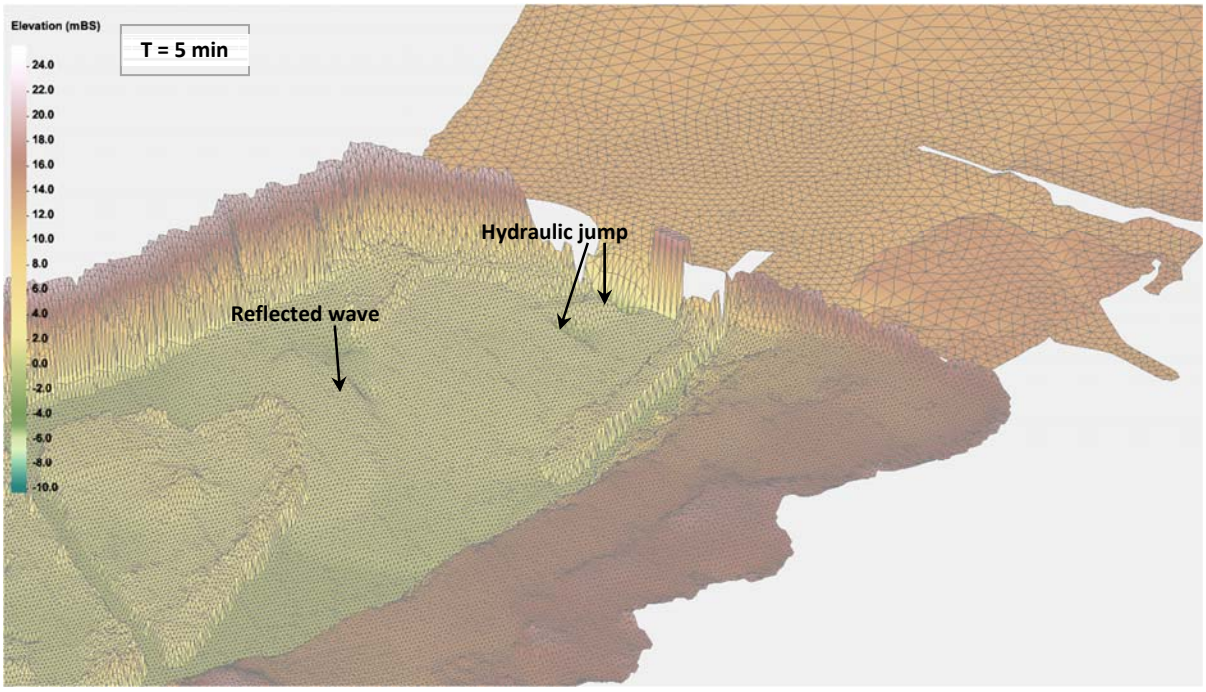

Рис. 12. Вільна поверхня води в районі греблі Каховської ГЄС через 5 хвилин після прориву греблі. Сценарій із вільною поверхнею води у Каховському водосховищі 13 м БС, скидом ГЕС 600 куб.м/с і проломом у греблі завширшки 400 м.

Також під час моделювання з заданим часовим інтервалом виводяться швидкості течії і рівень вільної поверхні води у обраних контрольних точках у розрахунковій області, а для визначених поперечних перетинів виводиться витрата води через ці перетини. Поперечні перетини нижче греблі Каховської ГЕС зображені на Рис. 13. Контрольні точки описані у Таблиці 1, їхнє розташування показано на Рис. 20, 22, 25, 28.

Таблиця 1. Контрольні точки в розрахунковій області моделювання прориву Каховської ГЕС.

Номер точки	**Назва точки**	**x_UTM36, м**	**y_UTM36, м**	**Опис точки**
1	Khortitsa	661435.00	5293053.00	Південний край острова Хортиця
2	Energodar	616285.00	5266993.00	Каховське водосховище навпроти м. Енергодар
3	ZNPP Intake	614013.00	5263307.00	Водозабір Запорізької АЕС
4	Mihaylovka	573384.00	5240339.00	Каховське водосховище біля с. Михайлівка
5	NCC Intake	530177.80	5179811.20	Водозабір Північно-Кримського каналу
6	KHPP Up	528260.90	5180735.60	Каховська ГЕС, верхній б’єф, біля водозливної греблі

Номер точки	Назва точки	x_UTM36, м	y_UTM36, м	Опис точки
7	KHPP Up2	528460.80	5180434.50	Каховська ГЕС, верхній б’єф, біля будівлі ГЕС
8	KHPP Down	528032.00	5180590.00	Каховська ГЕС, нижній б’єф, біля водозливної греблі
9	Kozatske	526146.00	5180939.00	Р. Дніпро біля смт. Козацьке
10	Kozatsky Island	525645.00	5179937.00	Острів Козацький
11	Dnipryany	520413.00	5177685.00	Р. Дніпро біля смт. Дніпряни
12	Lvove	511550.00	5181270.00	Р. Дніпро біля с. Львове
13	Tyahynka	504569.00	5177783.00	Р. Дніпро біля гирла р. Тягинка
14	Tokarivka	496905.00	5176171.00	Р. Дніпро біля с. Токарівка
15	Inhulets	485585.00	5169602.00	Р. Дніпро біля гирла р. Інгулець
16	Anton Bridge	478706.00	5168485.00	Р. Дніпро біля Антонівського автомобільного мосту
17	Khers Panorama	480022.96	5169194.84	Р. Дніпро біля готельно-ресторанного комплексу «Панорама» у м. Херсон
18	Ant Sch21	477650.50	5169014.30	Смт. Антонівка, стадіон Школи №21
19	Ant Propan	481714.82	5162135.63	Смт. Антонівка, АГЗС «Пропан»
20	Ole Solar PP	476315.27	5162051.95	М. Олешки, сонячна електростанція
21	Ole Bursht Str	473876.00	5166705.00	М. Олешки, вул. Бурштинова
22	Khers Naberezhna	471147.00	5163649.00	Р. Дніпро біля набережної у м. Херсон
23	Khers Rybohrana	468099.00	5160922.00	Р. Дніпро біля Херсонської гідробіологічної станції НАН України
24	Khr Richmorvokzal	470265.24	5163507.52	М. Херсон, Річморвокзал
25	Khr Odeska Sq	470284.52	5163616.66	М. Херсон, Одеська площа
26	Khr Prychalna Str	468023.49	5163890.24	М. Херсон, вул. Причальна
27	Khr Rotor Parking	466023.31	5168399.57	М. Херсон, гаражный кооператив «Ротор»
28	Khr Dombudiv Str	466102.25	5163693.70	М. Херсон, вул. Домобудівна
29	Kor Pallada Pl	469614.40	5163126.89	М. Херсон, Корабел, завод «Паллада»
30	Kor Kuybyshev Pl	468918.81	5163529.99	М. Херсон, Корабел, Херсонський судноремонтний завод ім. Куйбишева
31	Kor M.Fortus Str	467530.90	5161256.95	М. Херсон, Корабел, кільцева розв’язка на вул. Марії Фортус
32	Kor Oil Terminal	465484.88	5160699.24	М. Херсон, Корабел, Нафтогавань
33	Solontsi	474506.44	5157237.30	С. Солонці
34	Kardashynka	470781.11	5155316.43	С. Кардашинка
35	Kokhany	470117.54	5152568.99	С. Кохани
36	Hola Prystan	463318.80	5151975.27	М. Гола Пристань
37	Bilohrudove	463444.00	5155507.00	Р. Дніпро біля с. Білогрудове
38	Zabych Island	446216.00	5155129.00	Дельта Дніпра біля острова Забич
39	Dnipro Bay	439890.00	5154130.00	Дніпровська затока напроти с. Широка Балка

Наприкінці моделювання, скрипти постобробки виконують наступні кроки:

- Для всіх вузлів розрахункової сітки виводять у зовнішні файли текстового формату програми SMS початкові значення глибин, кінцеві значення глибин і значення глибин найбільші за весь час моделювання. Ці розподіли глибин можуть бути візуалізовані у програмах SMS 13.1 Community Edition і QGIS.
- Для всіх вузлів розрахункової сітки створюють файли точкового формату SHP зі значеннями у вузлах початкових глибин, кінцевих глибин і максимальних глибин, а також відповідні SHP-полігони зон заповнених водою: початкової зони, фінальної зони і зони затоплення. Ці файли використовуються для відображення відповідних розподілів глибин і зон затоплення на геоінформаційному порталі засобами ArcGIS.
- Python-скрипт будує графіки рівня води у контрольних точках.

Оброблені результати моделювання двох розглянутих сценаріїв представлено нижче.

На Рис. 14 показані витрати через прямокутний пролом у водозливній греблі Каховської ГЕС при рівнях Каховського водосховища 13 м і 15 м.

На Рис. 15 – розподіли глибин у Каховському водосховищі перед початком прориву греблі Каховської ГЕС і на 20 день після прориву греблі ГЕС для сценарію з початковим рівнем вільної поверхні води у водосховищі 13 м БС і скидами ГЕС 600 куб.м/с.

На Рис. 16 – розподіли глибин у Каховському водосховищі перед початком прориву греблі Каховської ГЕС і на 20 день після прориву греблі ГЕС для сценарію з початковим рівнем вільної поверхні води у водосховищі 15 м БС і скидами ГЕС 1000 куб.м/с.

На Рис. 17 – початковий розподіли глибин у Нижньому Дніпрі перед проривом греблі Каховської ГЕС при скиді ГЕС 1000 куб.м/с.

На Рис. 18 – глибини затоплення внаслідок прориву греблі Каховської ГЕС для сценарію з початковим рівнем Каховського водосховища 13 м БС і скидами ГЕС 600 куб.м/с.

На Рис. 19 – глибини затоплення внаслідок прориву греблі Каховської ГЕС для сценарію з початковим рівнем Каховського водосховища 15 м БС і скидами ГЕС 1000 куб.м/с.

На Рис. 21, 23, 24, 26, 27, 29-31 – еволюцію рівня вільної поверхні води у контрольних точках для двох сценаріїв прориву греблі Каховської ГЕС: при початковому рівні води у водосховищі 13 м БС і скидах ГЕС 600 куб.м/с, при початковому рівні води у водосховищі 15 м БС і скидах ГЕС 1000 куб.м/с.

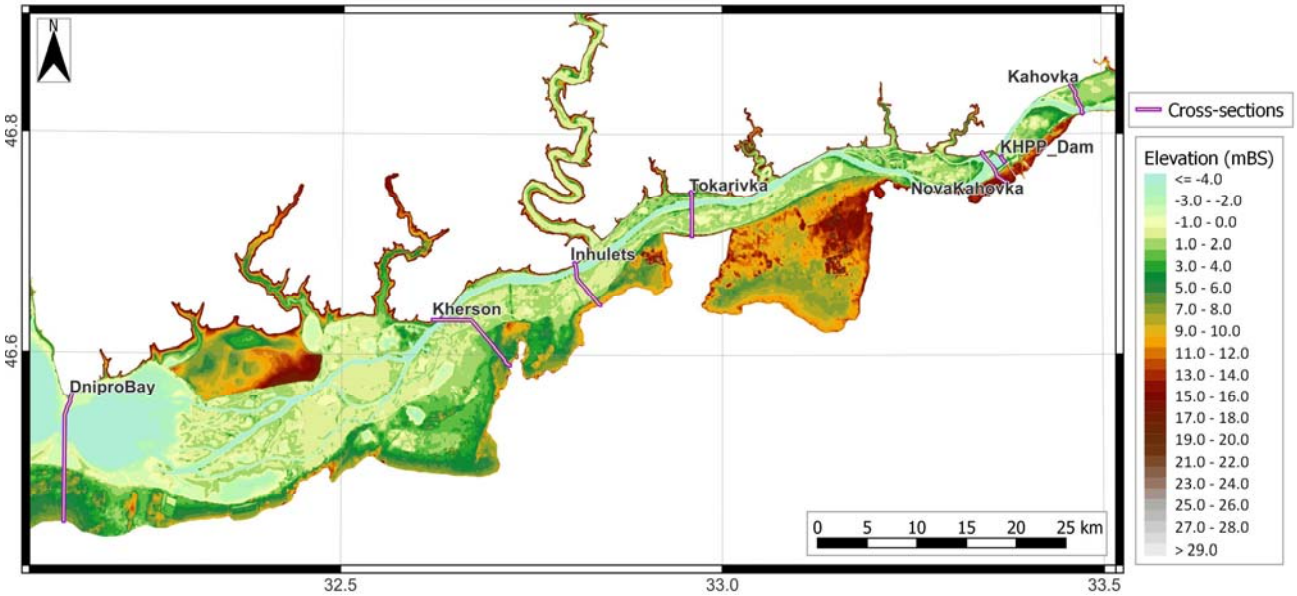

Рис. 13. Поперечні перетини для виводу витрат води.

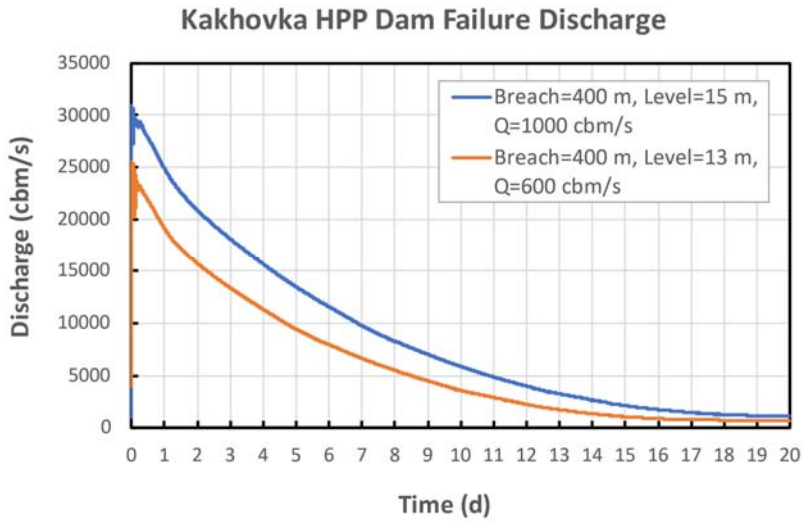

Рис. 14. Витрата води через пролом греблі Каховської ГЕС для двох сценаріїв прориву греблі: при початковому рівні води у водосховищі 13 м БС і скиді ГЕС 600 куб.м/с, при початковому рівні води у водосховищі 15 м БС і скиді ГЕС 1000 куб.м/с. Ширина пролому для обох сценаріїв складає 400 м.

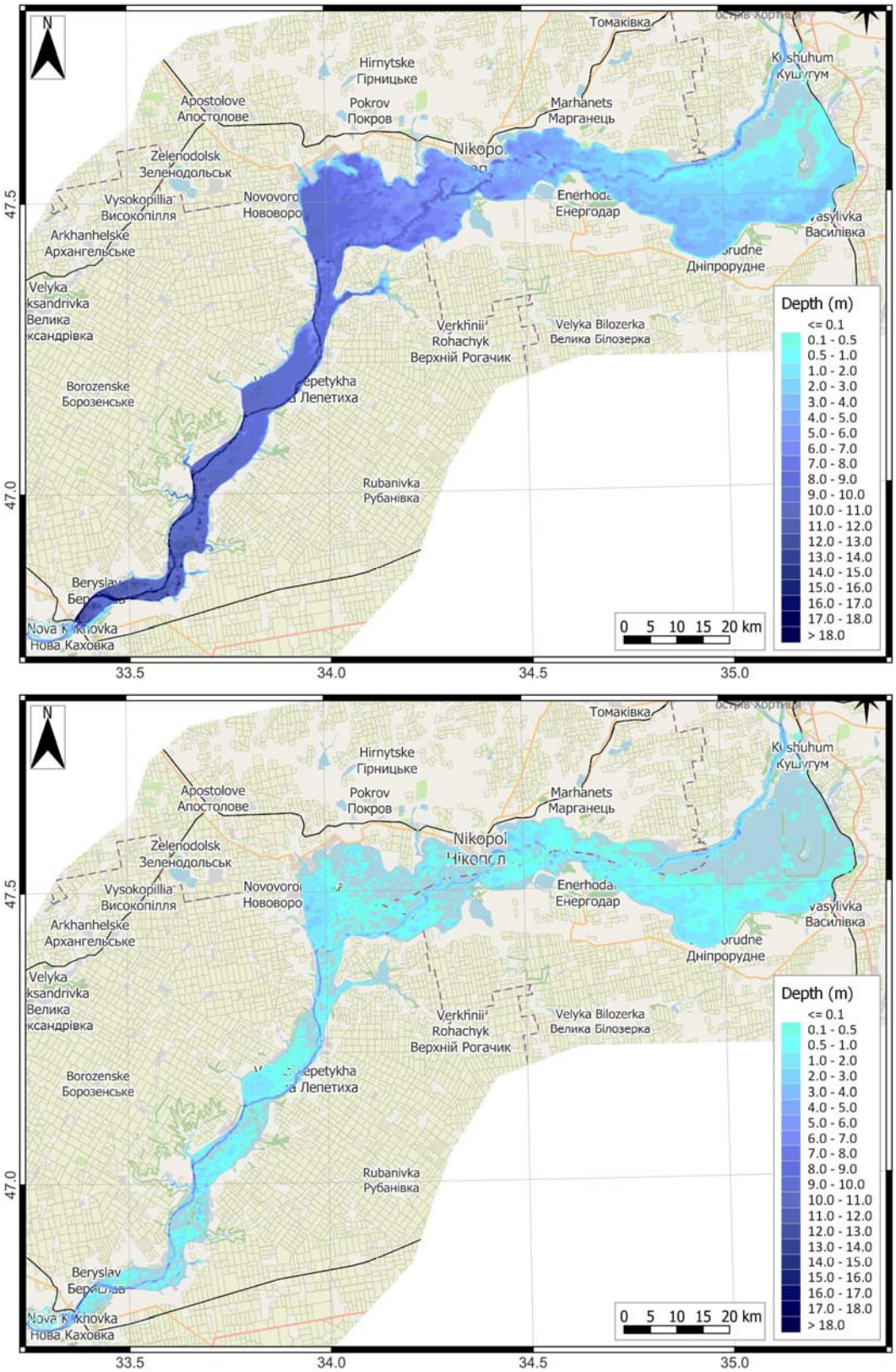

Рис. 15. Розподіли глибин у Каховському водосховищі перед початком прориву греблі Каховської ГЕС і на 20 день після прориву греблі ГЕС для сценарію з рівнем вільної поверхні води у водосховищі 13 м БС, скидом ГЕС 600 куб.м/с і проломом у греблі завширшки 400 м.

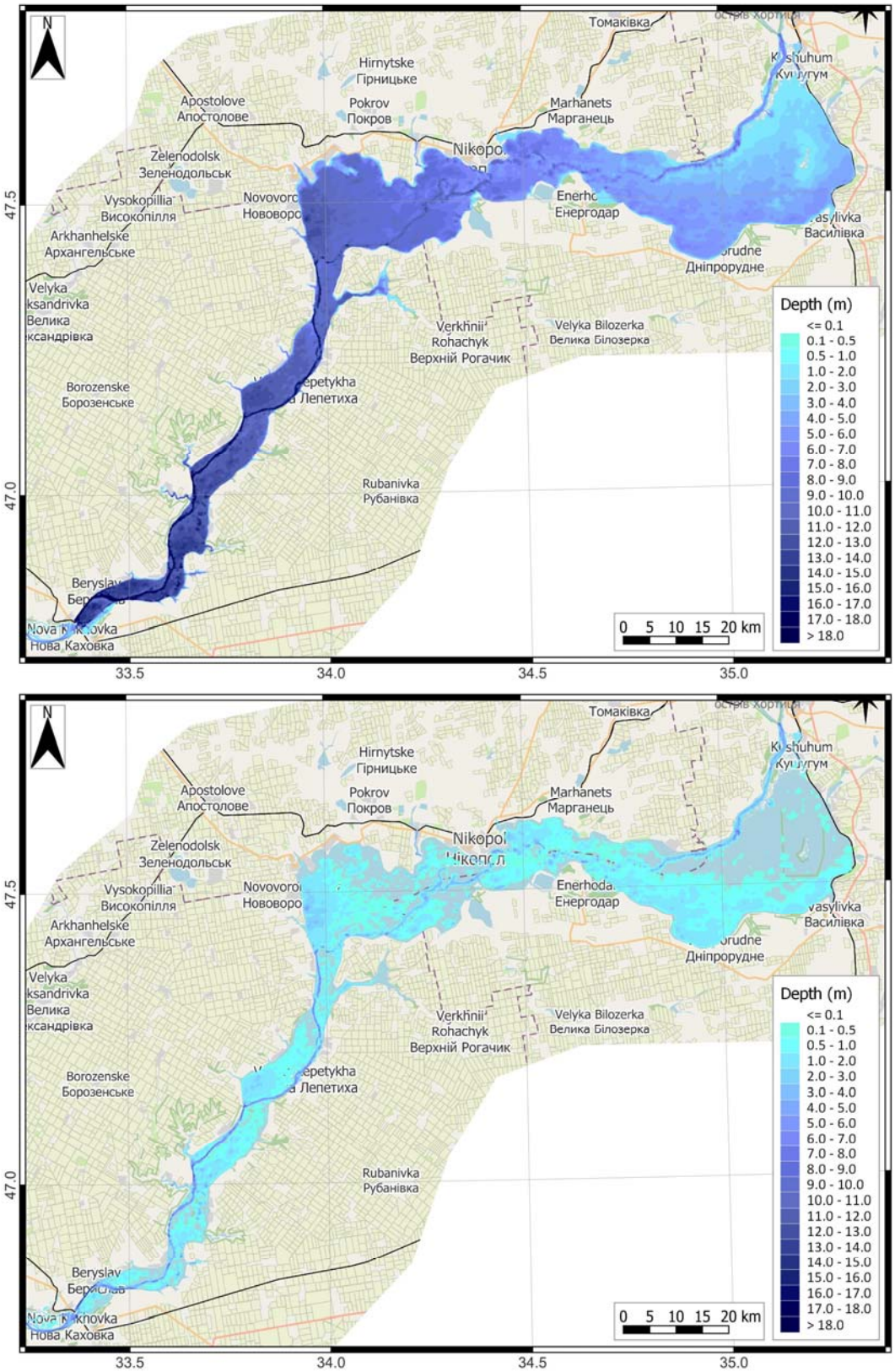

Рис. 16. Розподіли глибин у Каховському водосховищі перед початком прориву греблі Каховської ГЕС і на 20 день після прориву греблі ГЕС для сценарію з рівнем вільної поверхні води у водосховищі 15 м БС, скидом ГЕС 1000 куб.м/с і проломом у греблі завширшки 400 м.

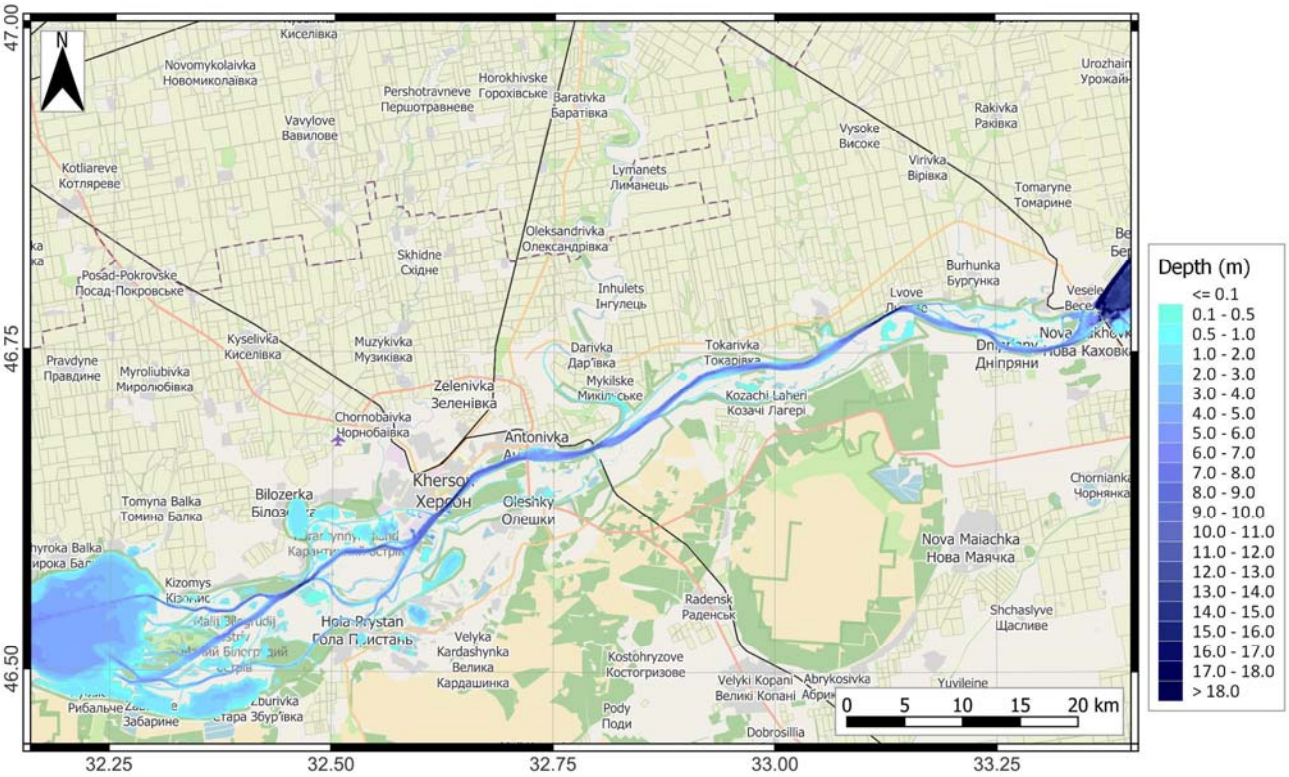

Рис. 17. Розподіли глибин у Дніпрі перед початком прориву греблі Каховської ГЕС при скиді ГЕС 1000 куб.м/с.

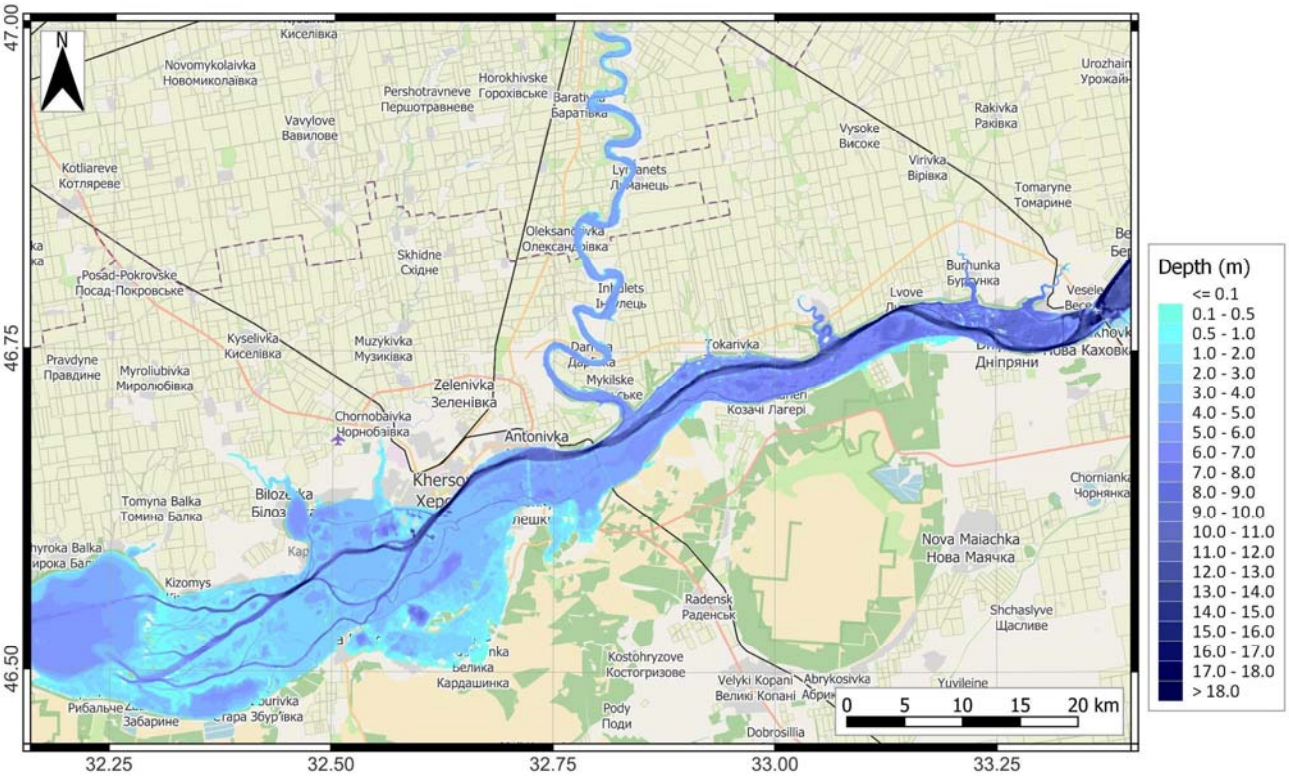

Рис. 18. Глибини затоплення внаслідок прориву греблі Каховської ГЕС для сценарію з рівнем Каховського водосховища 13 м БС, скидом ГЕС 600 куб.м/с і проломом у греблі 400 м.

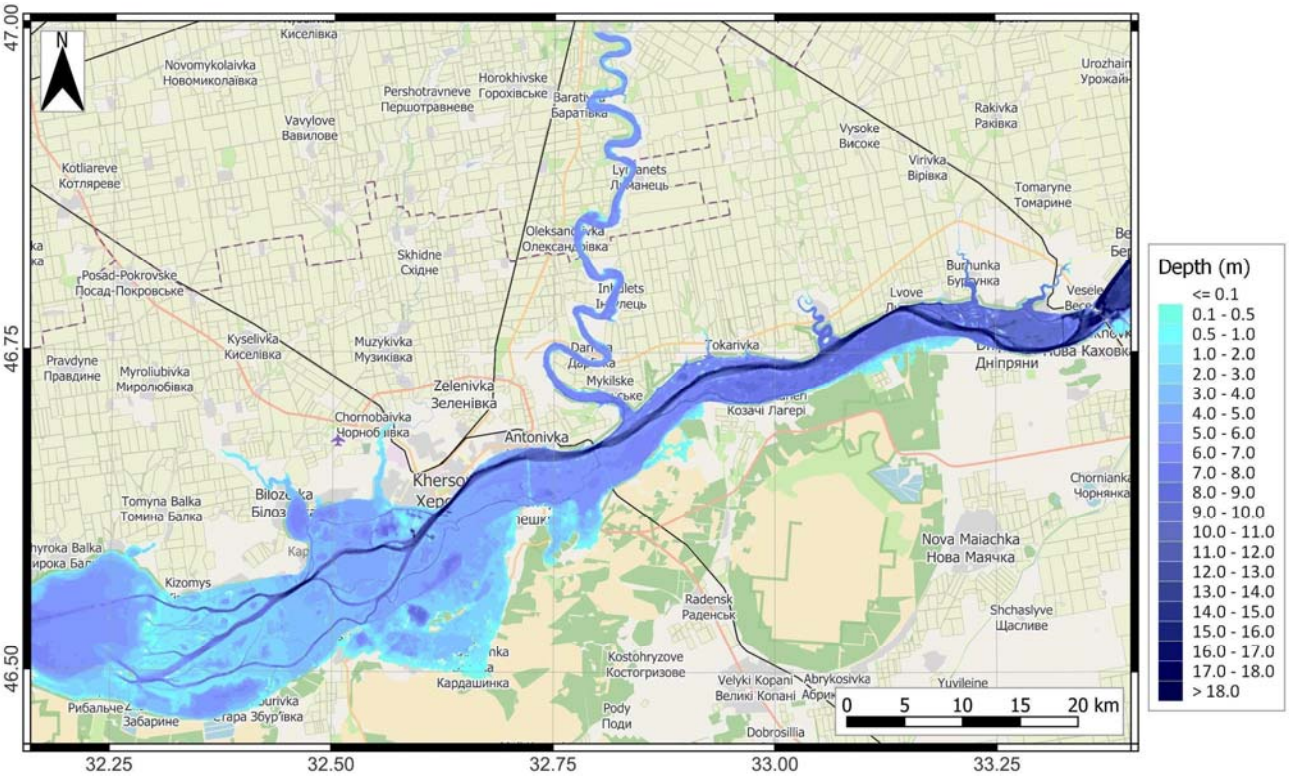

Рис. 19. Глибини затоплення внаслідок прориву греблі Каховської ГЕС для сценарію з рівнем Каховського водосховища 15 м БС, скидом ГЕС 1000 куб.м/с і проломом у греблі 400 м.

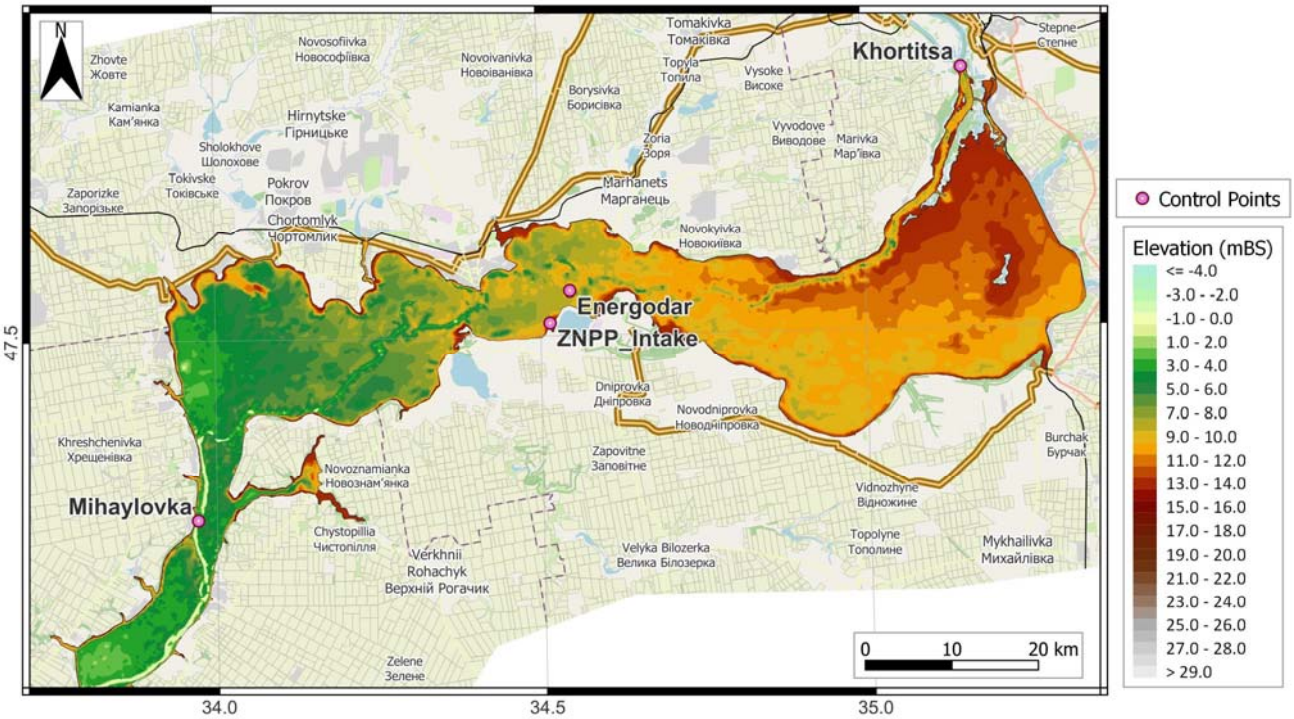

Рис. 20. Топографія східної частини розрахункової сітки і контрольні точки східного району Каховського водосховища.

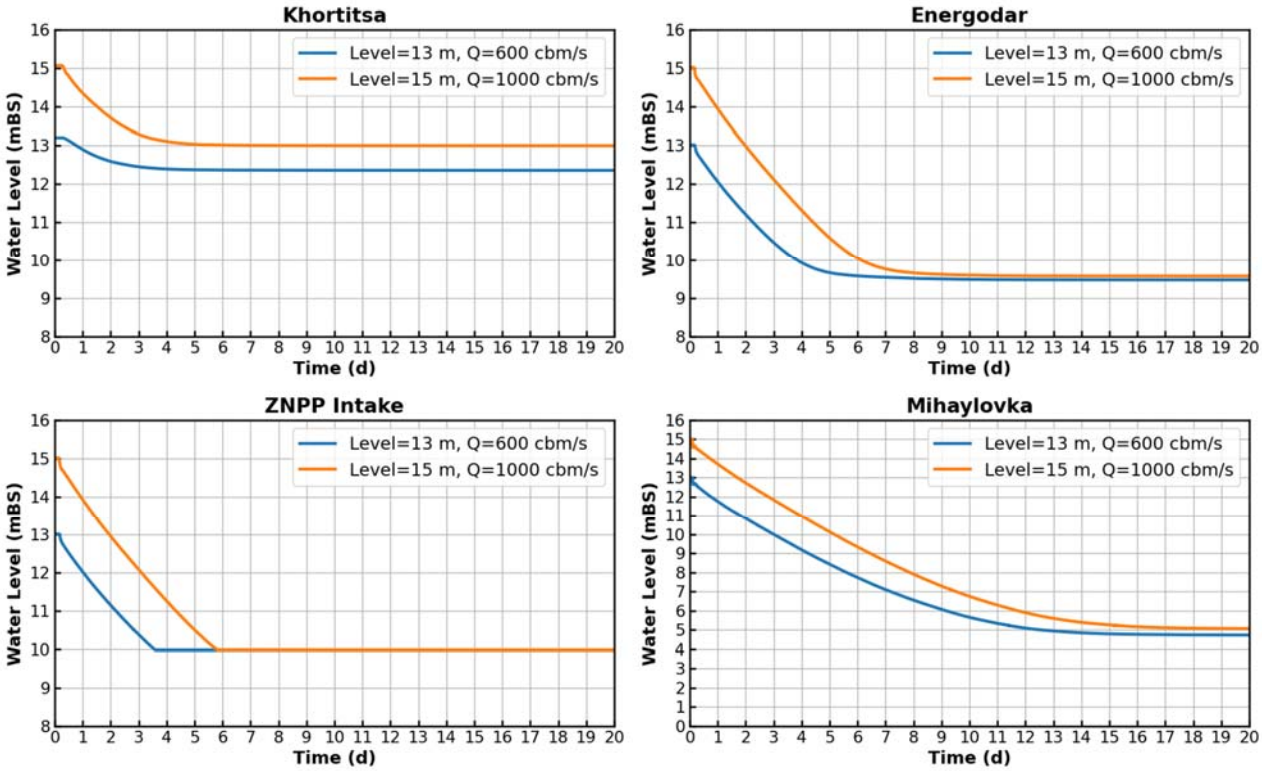

Рис. 21. Еволюція рівня вільної поверхні води у контрольних точках східного району Каховського водосховища для двох сценаріїв прориву греблі Каховської ГЕС: при початковому рівні води у водосховищі 13 м БС і скиді ГЕС 600 куб.м/с, при початковому рівні води у водосховищі 15 м БС і скиді ГЕС 1000 куб.м/с.

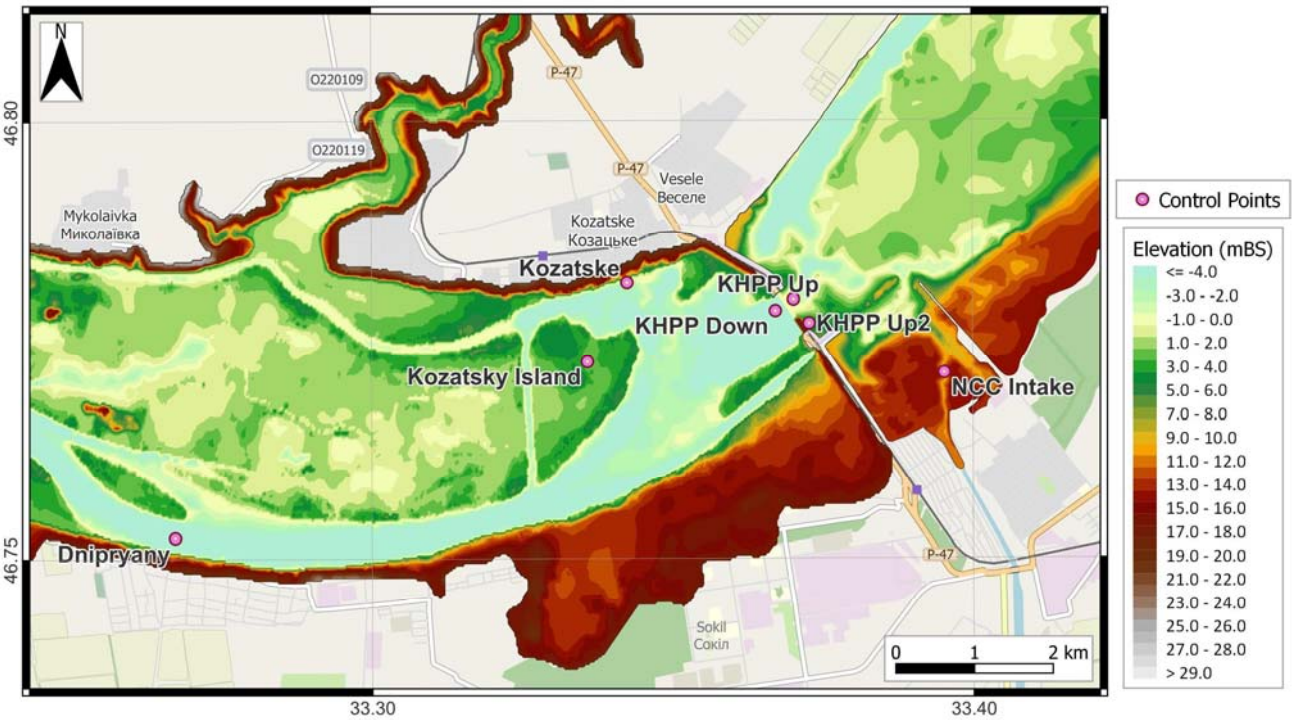

Рис. 22. Топографія розрахункової сітки і контрольні точки в районі греблі Каховської ГЕС.

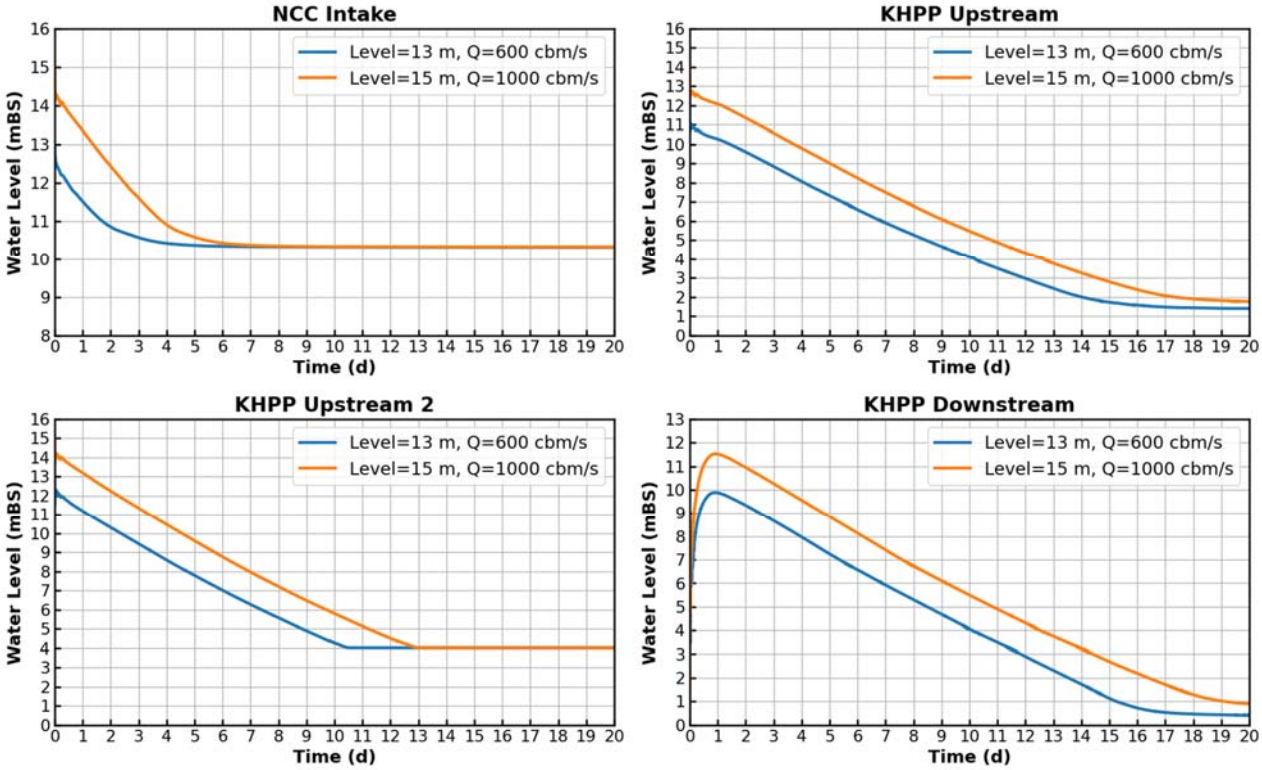

Рис. 23. Еволюція рівня вільної поверхні води у контрольних точках в районі греблі Каховської ГЕС для двох сценаріїв прориву греблі Каховської ГЕС: при початковому рівні води у водосховищі 13 м БС і скиді ГЕС 600 куб.м/с, при початковому рівні води у водосховищі 15 м БС і скиді ГЕС 1000 куб.м/с.

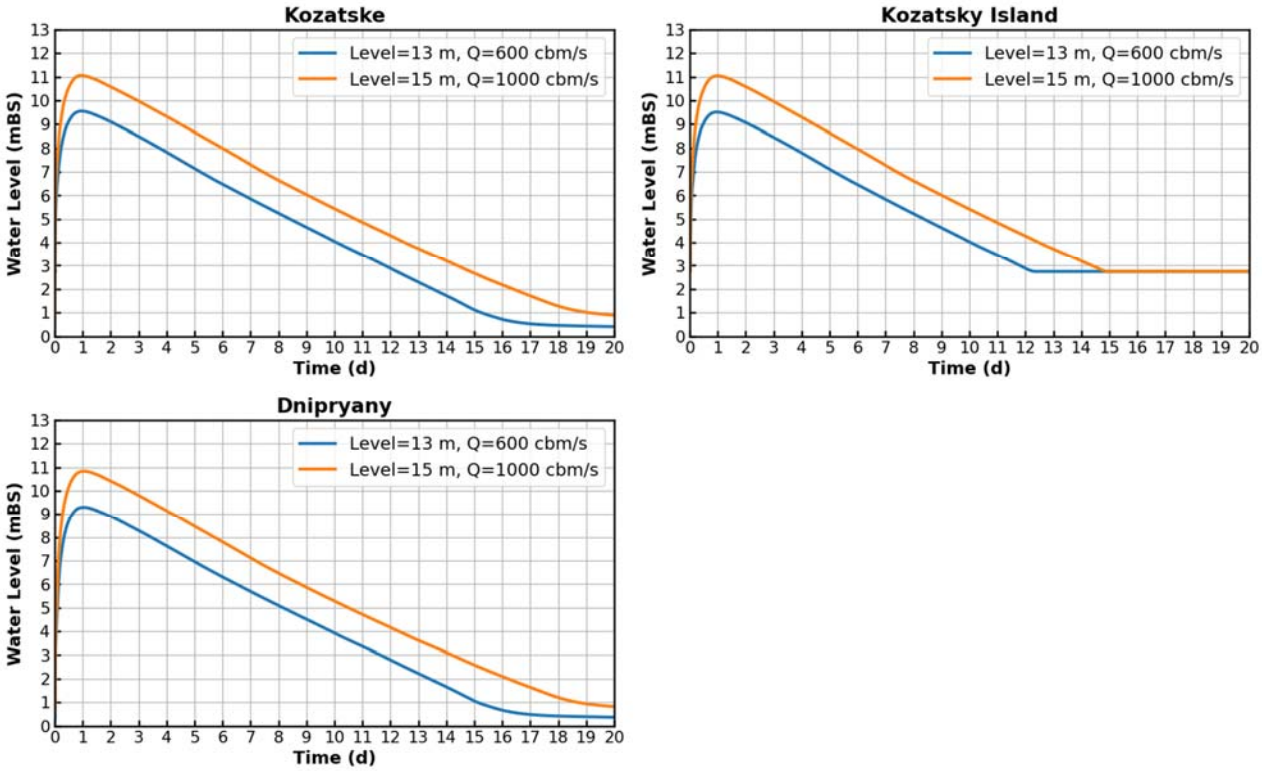

Рис. 24. Еволюція рівня вільної поверхні води у контрольних точках в районі греблі Каховської ГЕС для двох сценаріїв прориву греблі Каховської ГЕС: при початковому рівні води у водосховищі 13 м БС і скиді ГЕС 600 куб.м/с, при початковому рівні води у водосховищі 15 м БС і скиді ГЕС 1000 куб.м/с. (Продовження).

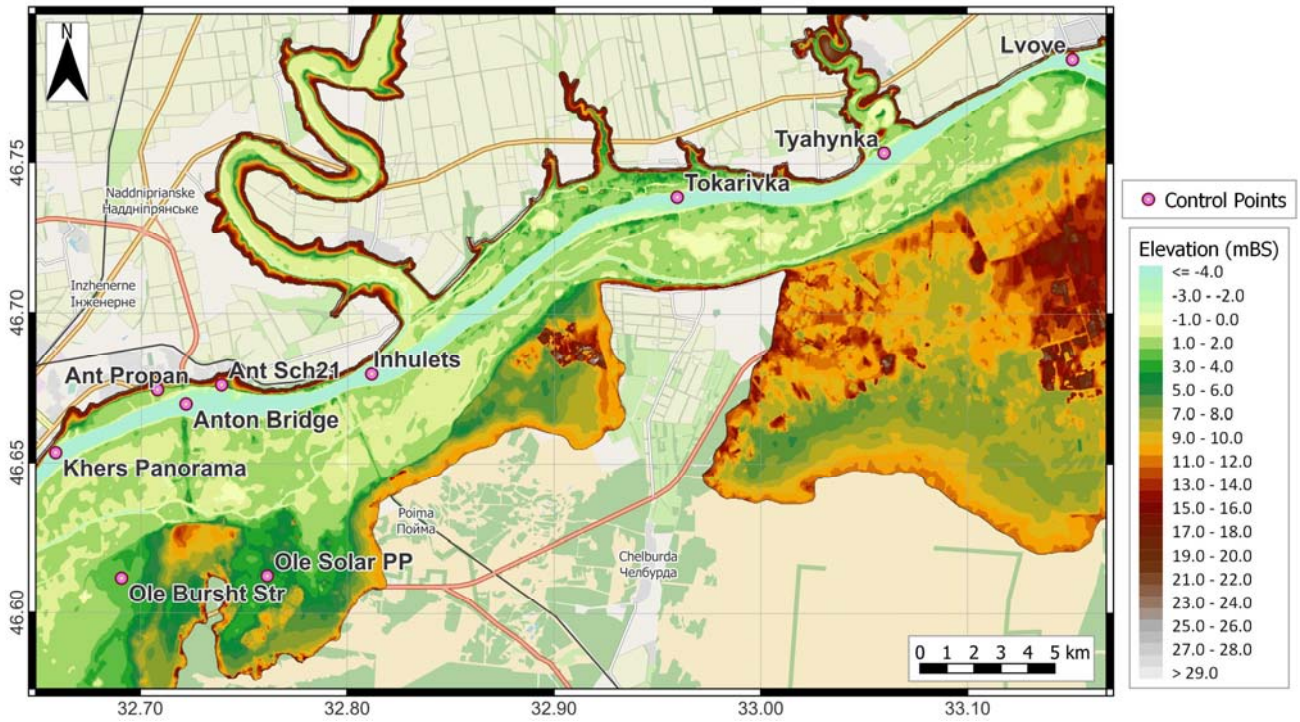

Рис. 25. Топографія розрахункової сітки і контрольні точки в районі річок Тягінка, Інгулець і смт. Антонівка.

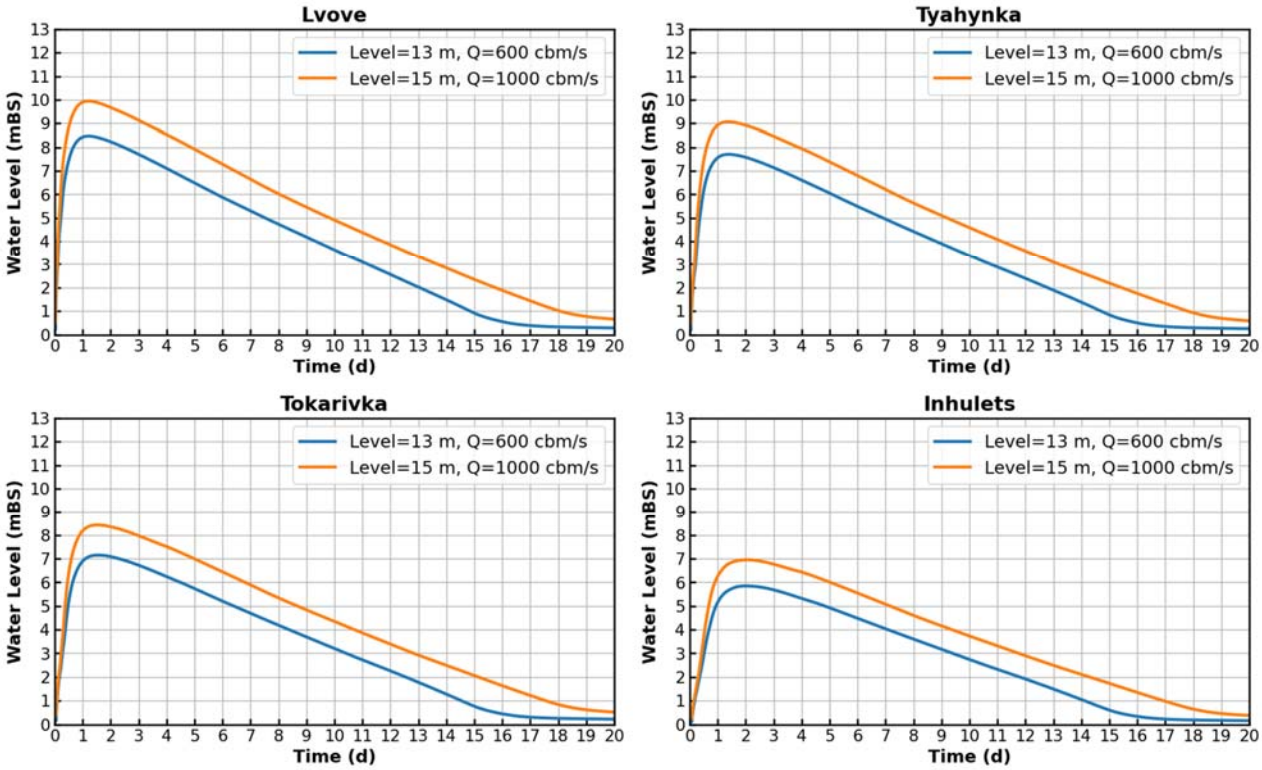

Рис. 26. Еволюція рівня вільної поверхні води у контрольних точках в районі річок Тягінка, Інгулець і смт. Антонівка для двох сценаріїв прориву греблі Каховської ГЕС: при початковому рівні води у водосховищі 13 м БС і скиді ГЕС 600 куб.м/с, при початковому рівні води у водосховищі 15 м БС і скиді ГЕС 1000 куб.м/с.

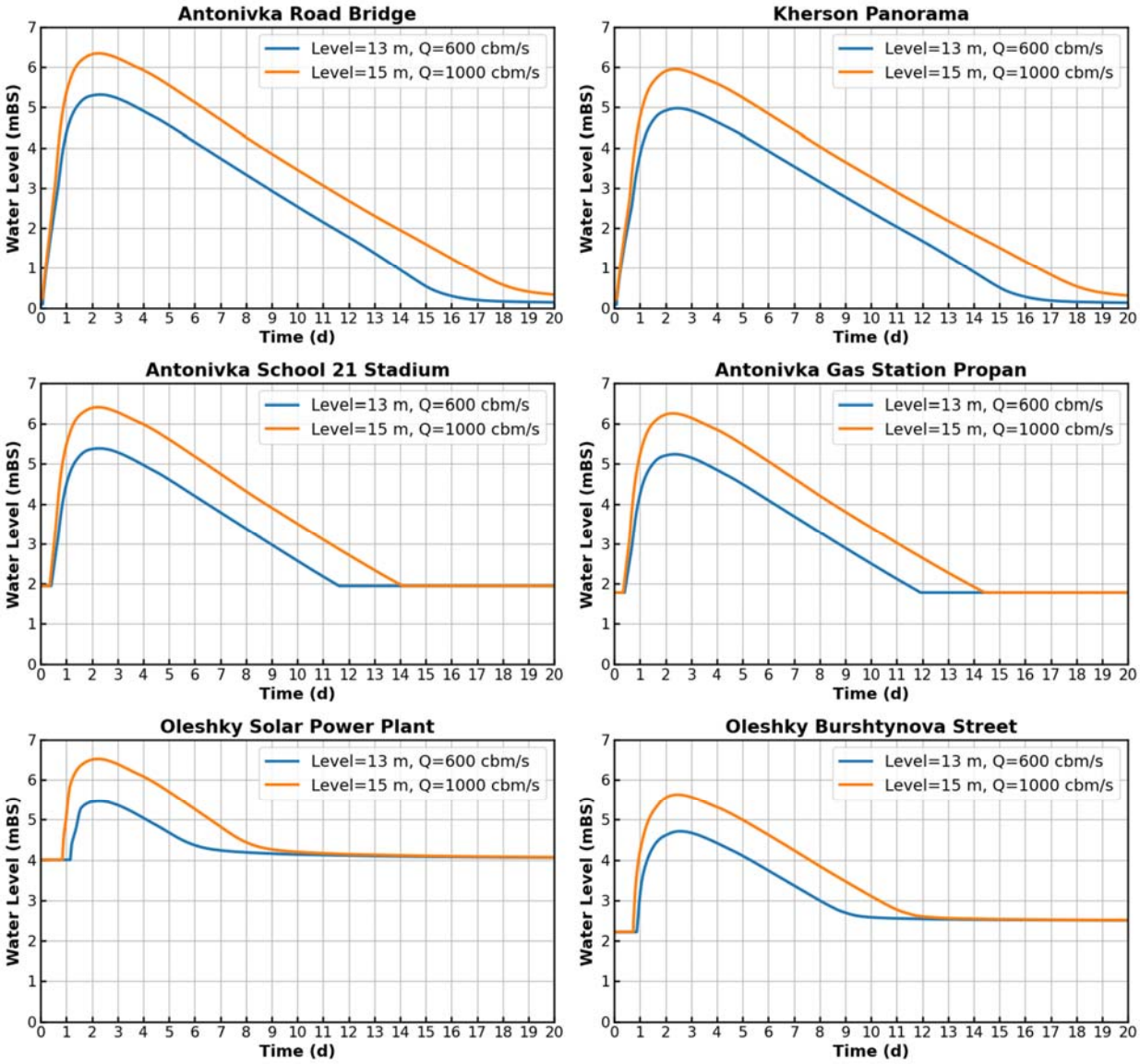

Рис. 27. Еволюція рівня вільної поверхні води у контрольних точках в районі річок Тягінка, Інгулець і смт. Антонівка для двох сценаріїв прориву греблі Каховської ГЕС: при початковому рівні води у водосховищі 13 м БС і скиді ГЕС 600 куб.м/с, при початковому рівні води у водосховищі 15 м БС і скиді ГЕС 1000 куб.м/с. (Продовження).

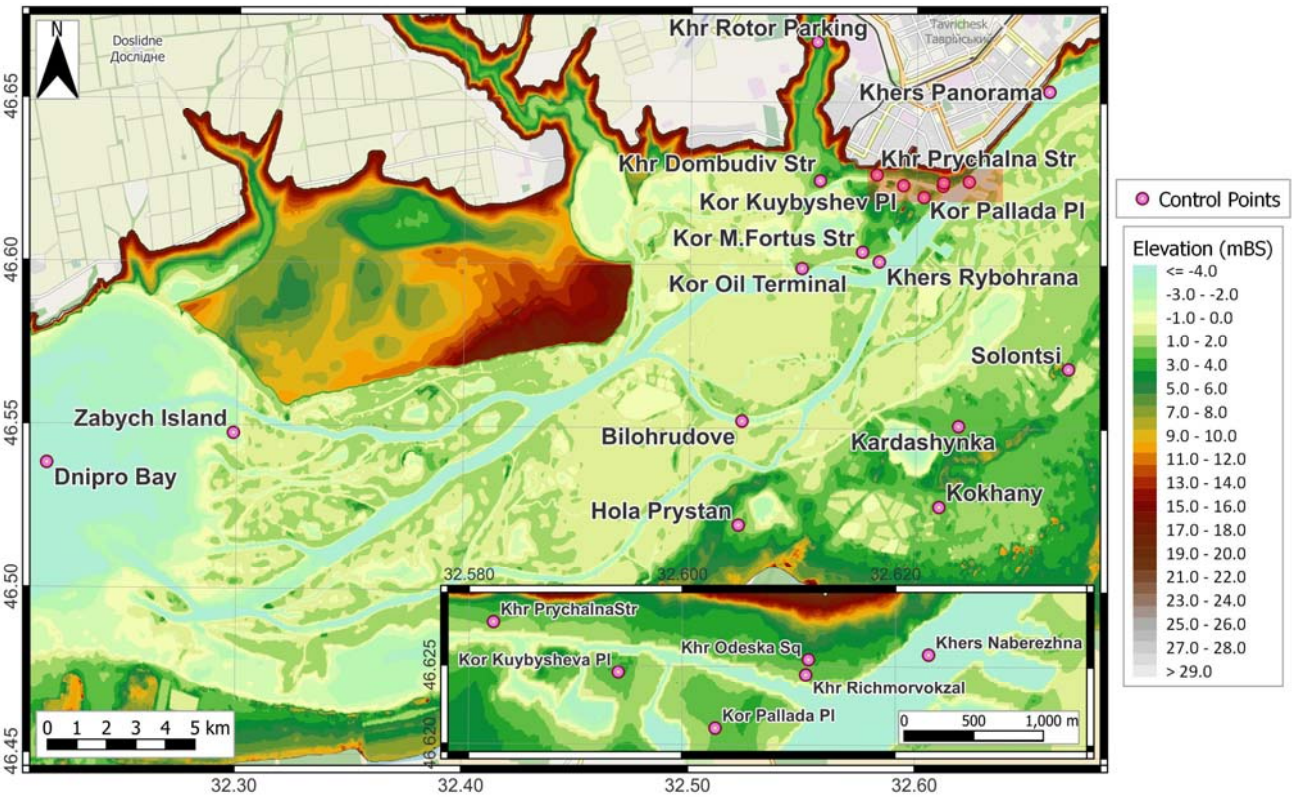

Рис. 28. Топографія розрахункової сітки і контрольні точки в районі м. Херсон і дельти Дніпра.

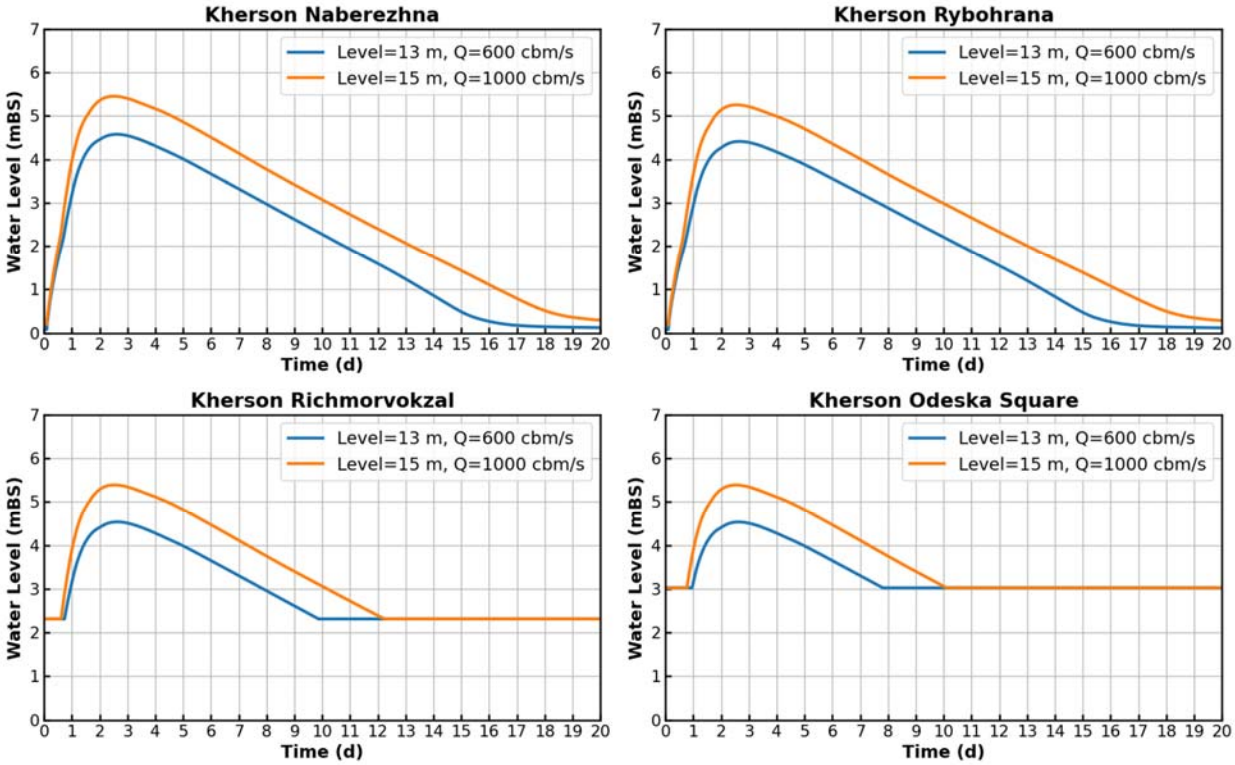

Рис. 29. Еволюція рівня вільної поверхні води у контрольних точках в районі м. Херсон і дельти Дніпра для двох сценаріїв прориву греблі Каховської ГЕС: при початковому рівні води у водосховищі 13 м БС і скиді ГЕС 600 куб.м/с, при початковому рівні води у водосховищі 15 м БС і скиді ГЕС 1000 куб.м/с. (Продовження).

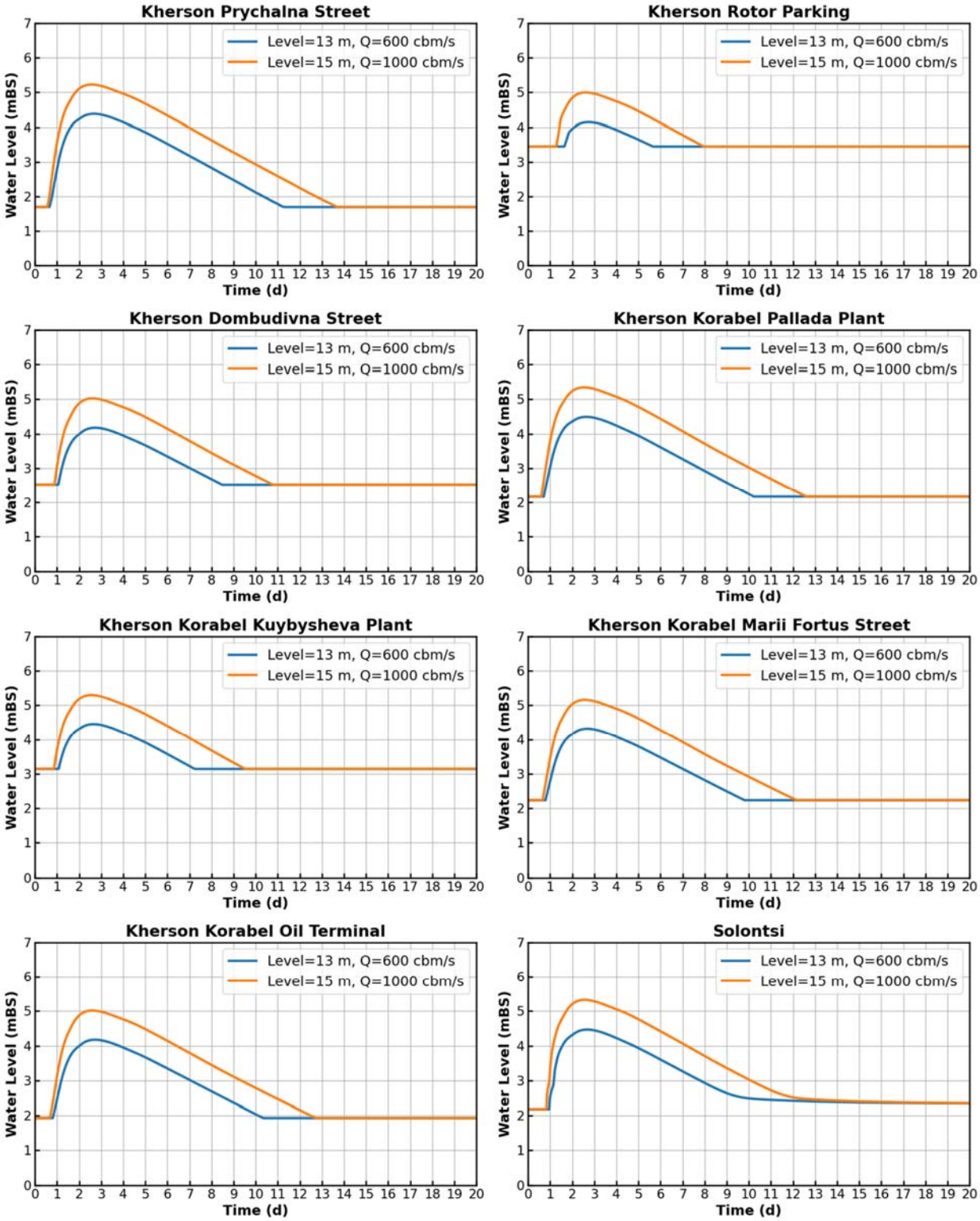

Рис. 30. Еволюція рівня вільної поверхні води у контрольних точках в районі м. Херсон і дельти Дніпра для двох сценаріїв прориву греблі Каховської ГЕС: при початковому рівні води у водосховищі 13 м БС і скиді ГЕС 600 куб.м/с, при початковому рівні води у водосховищі 15 м БС і скиді ГЕС 1000 куб.м/с. (Продовження).

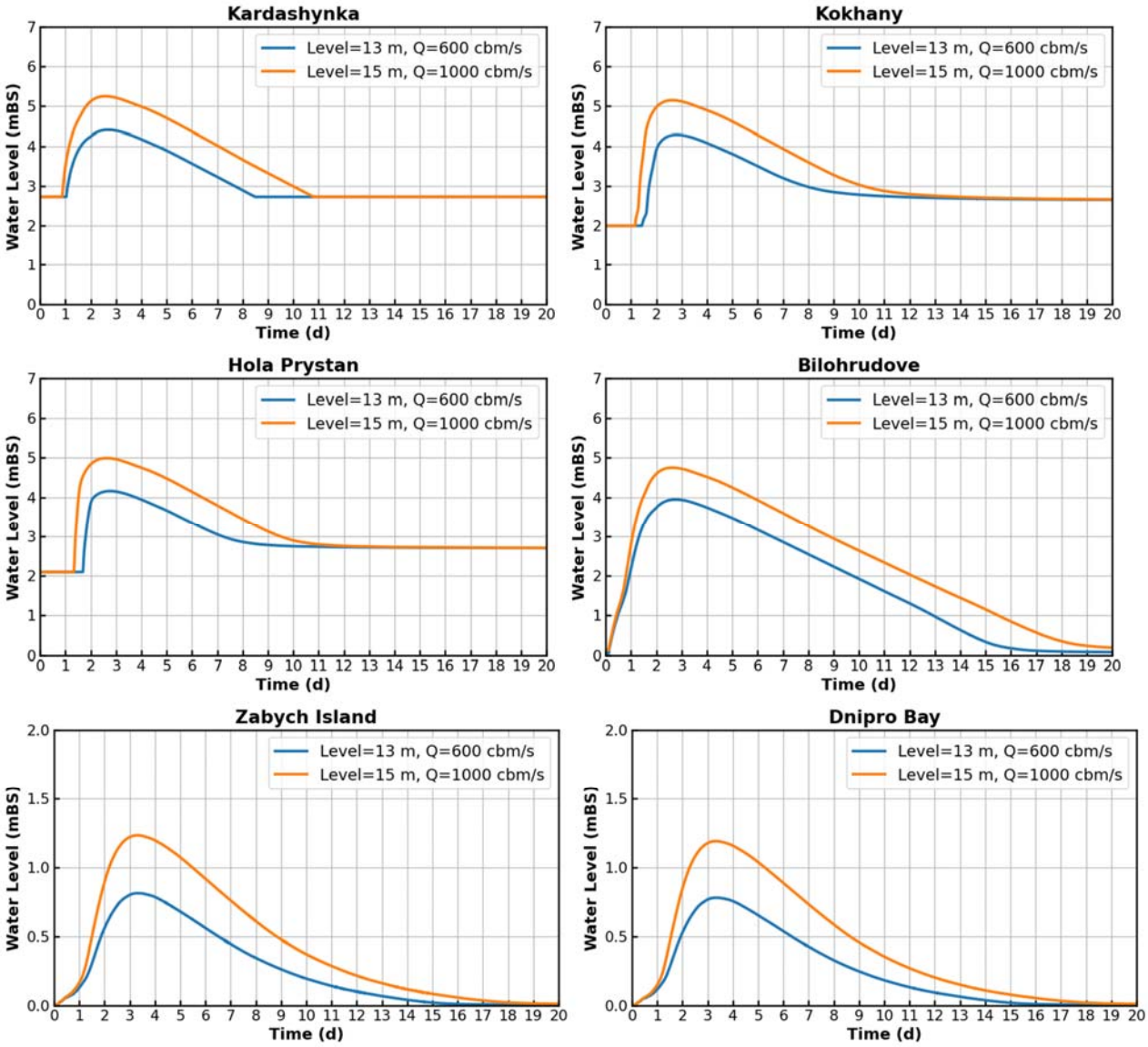

Рис. 31. Еволюція рівня вільної поверхні води у контрольних точках в районі м. Херсон і дельти Дніпра для двох сценаріїв прориву греблі Каховської ГЕС: при початковому рівні води у водосховищі 13 м БС і скиді ГЕС 600 куб.м/с, при початковому рівні води у водосховищі 15 м БС і скиді ГЕС 1000 куб.м/с. (Продовження).

Список джерел до Додатку А:

1. Zheleznyak, M., Kivva, S., Pylypenko, O., Sorokin, M. 2022. Modeling of Behavior of Fukushima-Derived Radionuclides in Freshwater Systems. In: Nanba, K., Konoplev, A., Wada, T. (eds) Behavior of Radionuclides in the Environment III. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6799-2_11.
2. Laurence Hawker *et al.* 2022. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environ. Res. Lett.* **17,** 024016. https://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f
3. Laurence Hawker, Jeffrey Neal (2021): FABDEM. https://doi.org/10.5523/bris.25wfy0f9ukoge2gs7a5mqpq2j7
4. Дикий П.В., Железняк М.Й., Коломієць П.С., Ківва С.Л., Сорокін М.В., 2013. Моделювання впливу регіональних змін клімату на ерозію берегів західного Криму. Тези доповідей восьмої науково-практичної конференції Математичне та імітаційне моделювання систем, МОДС '2013, Київ, 24-27 червня 2013, с. 56-59.

Додаток Б.

Для виконання розрахунків у роботі використовувалася двовимірна модель гідродинаміки і переносу забруднень COASTOX розроблена у Інституті проблем математичних машин і систем НАН України (ІПММС НАНУ).

Розробка COASTOX почалась після аварії на Чорнобильській АЕС для моделювання переносу радіонуклідів (^{90}Sr та ^{137}Cs) у заплаві р. Прип'ять та водосховищах р. Дніпро та для обґрунтування водоохоронних заходів у Чорнобильській зоні відчуження [1-3].

На теперішній час COASTOX – це система моделювання гідродинаміки, транспорту наносів і радіонуклідів у річкових системах і прибережних районах морів, заснована на двовимірних рівняннях мілкої води і рівняннях переносу, що розв'язуються за допомогою чисельних методів скінчених об'ємів на неструктурованих розрахункових сітках з трикутними комірками змінного розміру [4].

COASTOX э аналогом відомих і широко використовуваних систем моделювання: програмного комплексу MIKE 21 розробки датської фірми DHI, системи моделювання TELEMAC від консорціуму TELEMAC-MASCARET, системи Delft3D нідерландської компанії Deltares.

Основні особливості моделюючої системи COASTOX:

- Гідродинаміка описується на основі двовимірних нелінійних рівнянь мілкої води з урахуванням зволоження-осушення.
- Для переносу наносів використовуються двовимірні рівняння адвекціїї-дифузії з доданками типу джерело-стік, що описують змучування/осадження частинок наносів.
- Для морфодинамики – рівняння типу рівняння Екснера, що описує зміну донного рельєфу завдяки змучуванню/осадженню частинок, швидкість якого залежить від різниці між фактичною та рівноважною концентрацією частинок наносів.
- Транспорт радіонуклідів розглядається у трьох взаємодіючих фазах: радіонукліди у розчині, адсорбовані на зважених частинках та радіонукліди у донних відкладах.
- Для переносу радіонуклідів у розчині та на зважених частинках використовуються двовимірні рівняння адвекціїї-дифузії з доданками типу джерело-стік, що описують змучування/осадження забруднених частинок, дифузію між поровою водою верхнього шару донного ґрунту та водною товщею, сорбцію-десорбцію радіонуклідів між водою та завислими частками та між водою та донними відкладами.

- Рівняння моделі розв’язуються за допомогою чисельних схем скінчених об’ємів, FCT Годуновської типу предиктор-коректор, консервативних, що мають TVD властивості.
- Розрахункові сітки моделі – неструктуровані з трикутними комірками змінного розміру, що згущаються в місцях найбільшого інтересу.
- У якості зовнішніх факторів впливу розглядаються атмосферний тиск, вітер, хвильові радіаційні напруження, рух кораблів, припливи, річковий стік.
- COASTOX може поєднуватися з кількома хвильовими моделями: SWAN (TU Delft), ARTEMIS (TELEMAC) або моделлю HWAVE, розробленою в ІПММС НАНУ [5].
- Програмний код COASTOX реалізовано на мові програмування Fortran для Windows і Linux ПК та розпаралелено за допомогою функцій бібліотеки MPI для багатоядерних робочих станцій та кластерів, та за допомогою директив OpenACC для графічних процесорів (GPU)

Модель COASTOX перевірено на ряді аналітичних тестів і верифіковано шляхом порівняння з даними лабораторних експериментів і польових спостережень.

Модель використовувалася у великій кількості проектів у США, Індонезії, Сінгапурі, Японії та Україні [6-11].

На її основі було створено модуль дисперсії радіонуклідів у водному середовищі для СППР – багатоплатформної системи ядерного аварійного реагування JRODOS [12], а також розроблено декілька СППР у випадку катастрофічних паводків: системи прогнозування затоплення берегів р. Дніпро у м. Київ [13], системи моделювання повеней на р. Дністер у м. Могилів-Подільський [14], системи передбачення паводків в Українській частині басейнів річок Прут та Сирет [15].

Структуру моделюючої системи COASTOX представлено на Рис. 1.

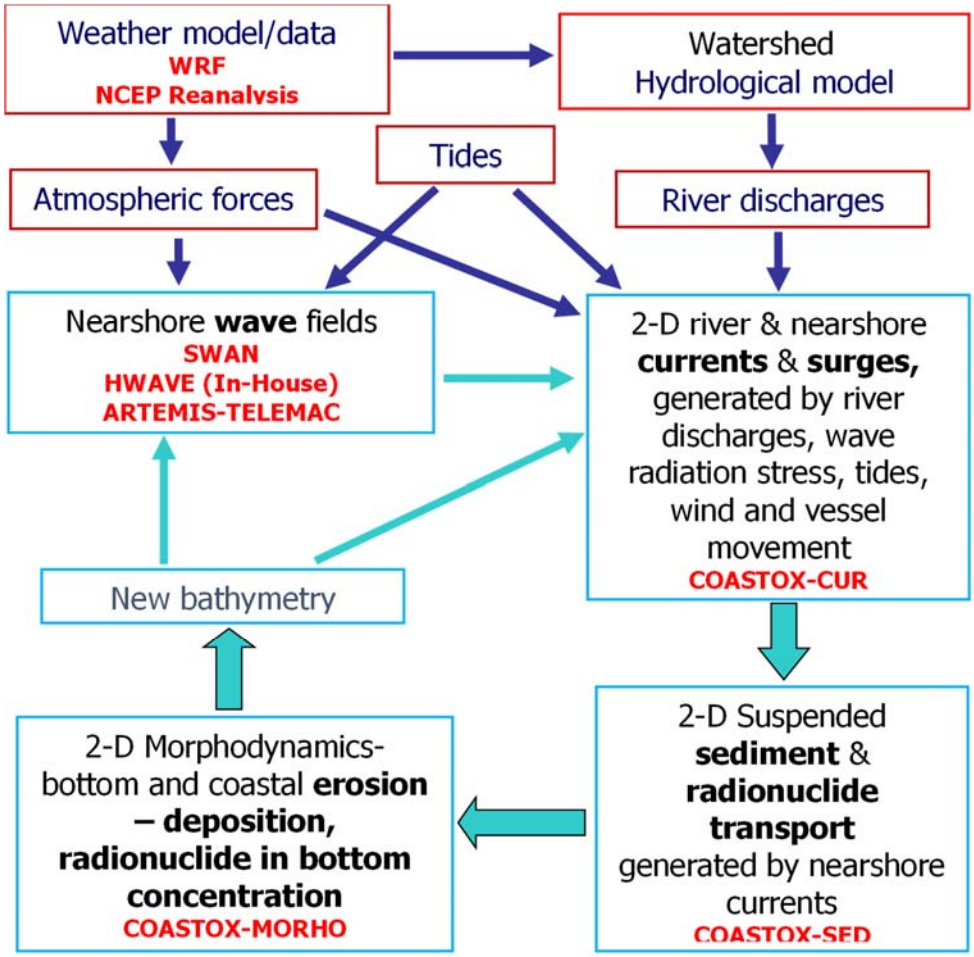

Рис. 1. Структура моделюючої системи COASTOX.

Спрощено схему взаємодії її модулів можна представити наступним чином. Вітер створює хвильові поля, що розраховуються хвильовою моделлю. Хвильові радіаційні напруження, вітер, атмосферний тиск, річковий стік, припливи викликають рух води, що моделюється модулем течій COASTOX-CUR. Транспорт наносів і радіонуклідів моделюється модулем переносу домішок COASTOX-SED. Обмін радіонуклідами між водою та дном, ерозія та відкладання наносів, зміна рельєфу дна моделюються модулем морфодинаміки COASTOX-MORPHO. Змінений донний рельєф передається до хвильової моделі і модуля течій COASTOX-CUR. І так весь цикл повторюється до кінця моделювання.

Модулі моделюючої системи COASTOX було розпаралелено використовуючи гібридний підхід у два етапи. На першому розпаралеленя було проведено для багатопроцесорних систем: багатоядерних робочих станцій та кластерів [16]. На другому – для графічних процесорів: ПК, ноутбуків, робочих станцій, що обладнані потужними дискретними графічними картами та для кластерів, вузли яких містять GPU прискорювачі [17].

Для кластерів з розподіленою пам’яттю та багатоядерних робочих станцій з загальною пам’яттю використовувався підхід геометричної декомпозиції, згідно якому розрахункова сітка ділиться на частини за допомогою бібліотеки розділу графів METIS. Далі окремі процесори комп’ютерної системи обробляють свої частини розрахункової сітки та обмінюються з сусідніми процесорами через мережеве з’єднання (кластери) або загальну пам'ять (робочі станції) за допомогою бібліотеки передачі повідомлень MPI (Рис. 2.). Функції Бібліотеки METIS та MPI інтегровано в COASTOX шляхом додавання функцій METIS та MPI в Fortran код відповідних модулів.

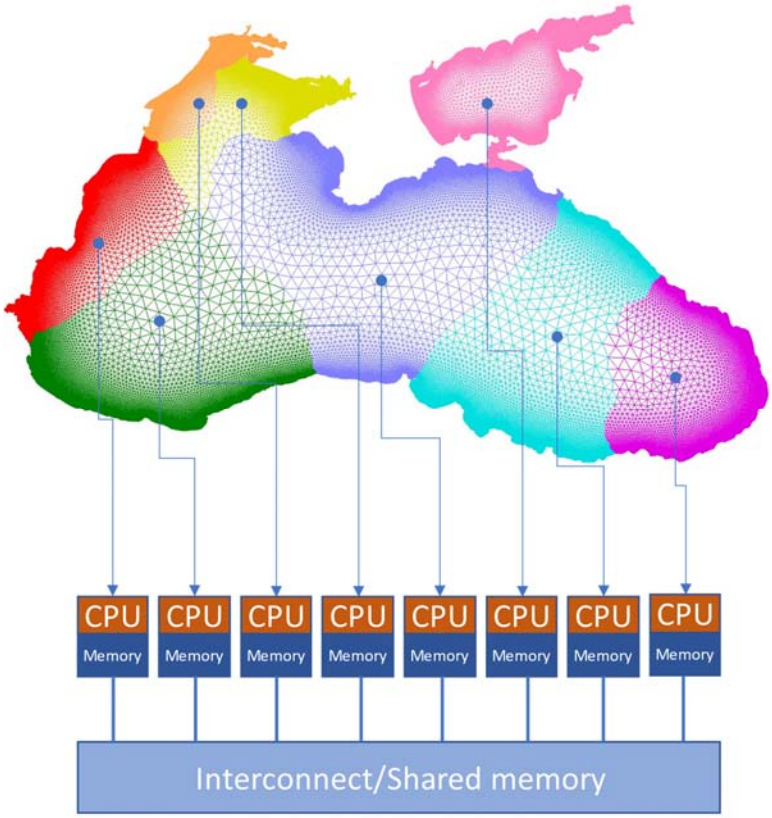

Рис. 2. Приклад розділення розрахункової сітки Чорного моря за допомогою бібліотеки METIS на 8 частин для комп’ютерної системи з вісьмома процесорами.

Для графічних процесорів використовувався багатопотоковий підхід на основі програмного інтерфейсу OpenACC. Директиви OpenACC додавались в програмний код модулів COASTOX, вказуючи, які дані повинні бути передані від host-процесора до глобальної пам’яті GPU та для яких циклів по комірках, вузлах або сторонах комірок компілятору необхідно генерувати потоки, що будуть оброблятися ядрами GPU паралельно (Рис. 3).

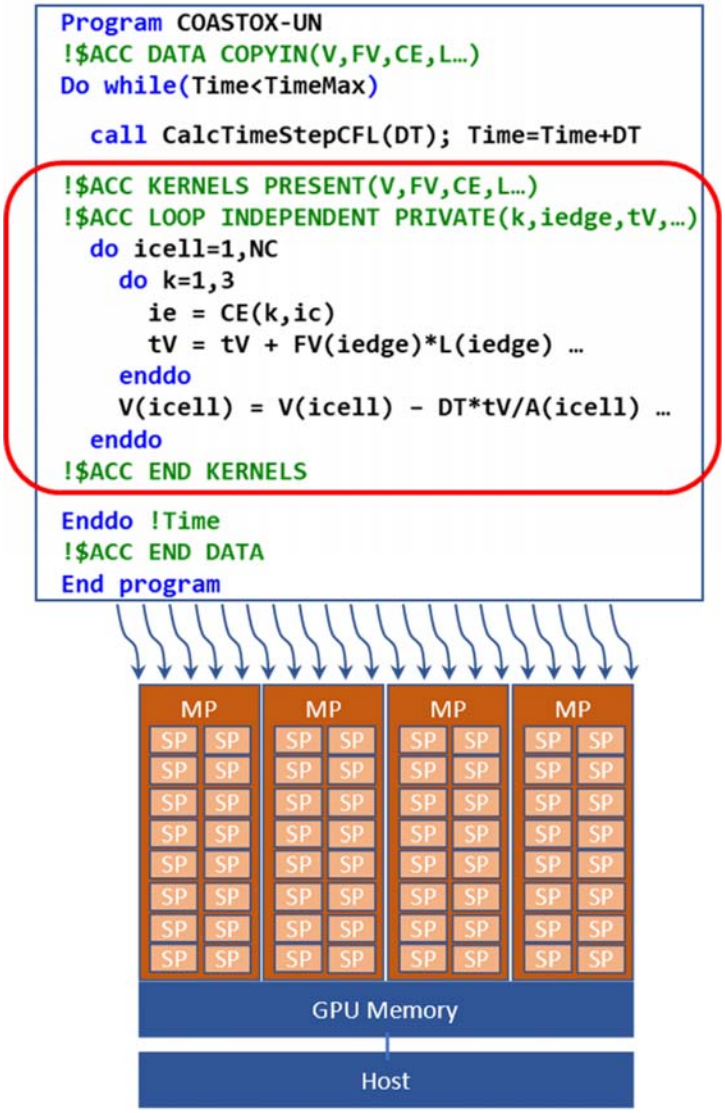

Рис. 3. Псевдокод програми COASTOX з директивами OpenACC, що визначають які дані копіюються до глобальної пам’яті GPU та які цикли обробляються GPU у багатопотоковому режимі.

Отримана паралельна версія моделі COASTOX показує високе прискорення на графічних картах GeForce RTX від компанії NVIDIA серії 20x і 30x, у десятки разів швидше за розрахунок на одному ядрі сучасних багатоядерних процесорів Intel та у декілька разів швидше за розрахунок на робочих станціях з двома такими процесорами [17, 18].

Вона дозволяє моделювати великі водойми з високою деталізацією на розрахункових сітках з декількома мільйонами комірок за прийнятний час так, що розрахунок 1 реального дня на таких сітках займає від десятків хвилин до декількох годин.

Список джерел до Додатку Б:

1. Zheleznyak, M. J., Demchenko, R. I., Khursin, S. L., Kuzmenko, Y. I., Tkalich, P. V., & Vitiuk, N. Y. Mathematical modeling of radionuclide dispersion in the Pripyat-Dnieper aquatic system after the Chernobyl accident. *Science of The Total Environment*, 1992, **112**(1), 89–114. DOI:10.1016/0048-9697(92)90241-j
2. Zheleznyak M. The mathematical modelling of radionuclide transport by surface water flow from the vicinity of the Chernobyl nuclear power plant. *Condensed Matter Physics*. 1997. Vol. 12. P. 37-49. DOI:10.5488/CMP.12.37
3. Zheleznyak M., Shepeleva T., Sizonenko V., Mezhueva I. Simulation of countermeasures to diminish radionuclide fluxes from the Chernobyl zone via aquatic pathways. *Radiation Protection Dosimetry*, 1997, 73(1–4):181–186. **DOI:10.1093/oxfordjournals.rpd.a032129**
4. Zheleznyak, M., Kivva, S., Pylypenko, O., Sorokin, M. (2022). Modeling of Behavior of Fukushima-Derived Radionuclides in Freshwater Systems. In: Nanba, K., Konoplev, A., Wada, T. (eds) Behavior of Radionuclides in the Environment III. Springer, Singapore. 2022, P. 199–252. DOI: 10.1007/978-981-16-6799-2_11.
5. Демченко Р.І., Железняк М.І. Гіперболічна апроксимація трансформації хвиль на течіях прибережної зони. *Прикладна гідромеханіка*, 2002, Том 4 (76), № 2, С. 23-29.
6. Fenical S., Kolomiets P., Kivva S., Zheleznyak M. Numerical Modeling of Passing Vessel Impacts on Berthed Vessels and Shoreline. Coastal Engineering, 2006, 2007, P. 1234-1246.
7. Zheleznyak M., Khomitsky V., Kivva S., Demchenko R., Kolomiets P., Shepeleva T. *Laboratory* and Numerical Studies of Waves, Currents and Sediment Transport at the Deepwater Navigation Channel in the “Bystroe” Arm of the Danube Delta. *ICCE-2006, Book of abstracts*, San Diego, California, USA, 2–8 September 2006, No: 1271, P. 400.
8. Kivva S., Zheleznyak M. Modelling of the Risks of the Sidoarjo Mud Flow, Indonesia. *4th International Congress on Environmental Modelling and Software. Barcelona*, Catalonia, Spain. July 2008. P. 1500-1507.
9. Kolomiets P., Zheleznyak M., Tkalich P. Dynamical Downscaling of Storm Surges in South-China Sea and Singapore Strait. Storm Surges Congress, 13-17 September 2010, University of Hamburg, Germany.
10. Дикий П.В., Железняк М.Й., Коломієць П.С., Ківва С.Л., Сорокін М.В. Моделювання впливу регіональних змін клімату на ерозію берегів Західного Криму. *Тези доповідей Восьмої міжнародної науково-практичної конференції Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2013*, Чернігів-Жукин, 24-28 червня 2013, С. 56-59.

11. Nanba K., Zheleznyak M., Kivva S., Konoplev A., Maderich V., Koshebutsky V., Gallego E., Papush L., Mikhalskyi O. Implementation of hydrological dispersion module of JRODOS for the assessment of ^{137}Cs transport and fate in rivers, reservoirs and ponds of the Fukushima Prefecture. *Radioprotection*, 2016, **51**:145–148. DOI:10.1051/radiopro/2016052
12. Zheleznyak M., Kivva S., Ievdin I., Boyko O., Kolomiets P., Sorokin M., Mikhalskyi O., Gheorghiu D. Hydrological dispersion module of JRODOS: renewed chain of the emergency response models of radionuclide dispersion through watersheds and rivers. *Radioprotection*, 2016, 51:129–131. DOI:10.1051/radiopro/2016048
13. Бойко В.М., Євдін Є.О., Железняк М.Й., Коломієць П.С., Іщук О.О. Особливості формування весняного стоку Дніпра та моделювання зон затоплення у межах м. Києва на основі сучасної гідролого-гідравлічної моделі. *Гідрологія, Гідрохімія, Гідроекологія*. 2012. Т. 1(26). С. 55-63.
14. Zheleznyak M., Kolomiets P., Dzjuba N., Ievdin I., Sorokin M., Denisov N., Ischuk O., and Koeppel S. Numerical Modeling for Flood Mapping under Climate Change Impacts: Transboundary Dniester River Study. EGU General Assembly 2015, Geophysical Research Abstracts, Vol. 17, EGU2015-9361.
15. Pylypenko O., Zheleznyak M., Boyko O., Kovalets I., Kivva S., Khalchenkov A., Mikhalsky O., Sorokin M. Flood forecasting and flood inundation mapping system developed for Ukrainian parts of Prut and Siret river basins within EAST AVERT project. *EGU General Assembly 2018, Geophysical Research Abstracts*, Vol. 20, EGU2018-10652-2.
16. Сорокін М.В. Паралельний явний кінцево-різницевий алгоритм розв'язку рівнянь моделі двовимірної гідроморфодинаміки прибережної зони на неструктурованих сітках. *Тези доповідей Шостої науково-практичної конференції з міжнародною участю Математичне та імітаційне моделювання систем, МОДС 2011*, Чернігів, 27-30 червня 2011, С. 103-105.
17. Sorokin, M., Zheleznyak, M., Kivva, S., Kolomiets, P., and Pylypenko, O.: High performance computing of waves, currents and contaminants in rivers and coastal areas of seas on multi-processors systems and GPUs, *EGU General Assembly 2020*, 4–8 May 2020, EGU2020-11372, DOI:10.5194/egusphere-egu2020-11372
18. Zheleznyak M., Kivva S., Sorokin M., Pylypenko O., Konoplev A., Aoyama M., Tsumune D., Igarashi Y., Dykyi P. Parallel Shallow Water Modeling of Radionuclide Transport in Solute and Suspended Sediments in Chernobyl and Fukushima Waters. *AGU Fall Meeting 2019*, 9-13 December, San Francisco, CA, USA.