

Ю. В. Костюченко, Ю. Г. Білоус, Д. М. Соловійов, І. М. Копачевський

Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук Національної академії наук України», Київ

ВИКОРИСТАННЯ ЗАСОБІВ СУПУТНИКОВОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ В КОМПЛЕКСІ МЕТОДІВ ОЦІНКИ РИЗИКІВ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ І КЛІМАТИЧНИХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ НА УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЯХ

Розглядаються окремі аспекти створення теоретико-методичної бази використання даних супутникового спостереження снігового покриву в задачі оцінки метеорологічних, кліматичних і гідролого-гідрогеологічних ризиків у міських агломераціях. Запропоновано основи методу визначення характеристик снігового покриву на основі комплексного використання супутникової інформації (зокрема продуктів MOD10A1 та SWE, нормалізованого індексу снігового покриву NDSI, локальних метеорологічних спостережень, наземних калібрувальних і завіркових вимірювань). Запропоновано метод інтеграції даних з різних джерел на основі модифікованого методу трансформації ансамблів фільтрацією Кальмана та методу ядерного аналізу головних компонентів розподілів даних. Показано, що запропонований підхід має достатньо високу відносну достовірність порівняно з іншими підходами (окремо використаних продуктів MOD10A1 та SWE) при застосуванні для аналізу міських агломерацій. Для тестування підходу розглянуто екстремальні снігопади 21–23 березня 2013 р. у м. Києві. Запропоновано кількісні оцінки показників ризиків та параметрів вразливості міської інфраструктури відносно негативних впливів надзвичайної ситуації.

ВСТУП

Вивчення ризиків, пов'язаних із надзвичайними ситуаціями (НС) гідрологічного, метеорологічного і кліматичного походження, хоча і є досить відомою задачею, але у випадках аналізу вразливості великих урбанізованих територій, зокрема міських агломерацій, виникають певні методологічні особливості, які необхідно враховувати для успішного розв'язання задач безпеки.

При цьому очевидно, що надзвичайні ситуації, зона розповсюдження яких охоплює місця масового розселення людей та скупчення інфраструктури і промислових об'єктів, зокрема великі міські агломерації, характеризуються найвищими показниками ризиків.

22–24 березня 2013 р. на м. Київ випала рекордна (більше 600 мм) кількість опадів у вигляді

снігу. Середня глибина снігового покриву на території міста протягом другої половини 22 березня кінця доби 23 березня склала близько 50 см, на паркових ділянках — близько 35–45 см, на території забудови 35–55 см, спостерігалися численні замети висотою 65–85 см, під час прибирання нагромаджувалися снігові навали середньою висотою до 1.2–1.4 м, які створювали значні перешкоди пересуванню транспорту та пішоходів. Уже ввечері 22 березня це призвело до зупинок руху наземного громадського транспорту, локального знеструмлення, помітних перебоїв із забезпеченням міських магазинів продовольством, зокрема продукцією хлібозаводів, а 23 березня спричинило фактичний транспортний колапс у місті.

Лише 23 березня на міських шляхах було заблоковано більше 4500 легкових автомобілів (з них 1850 було звільнено за допомогою спецзасобів МНС), близько 1000 вантажівок (506), 149 автобусів та 35 тролейбусів, які звільнено засоба-

ми МНС. Таким чином, лише за перші 20 годин лиха його прямого негативного впливу зазнали, за різними оцінками, від 10 до 14.5 тисяч людей.

Такий розвиток подій призвів до зниження якості харчування населення, підвищення кількості переохолоджень, травмувань, звернень до медичних закладів з симптомами застудних та загостреними хронічних захворювань, спричинених синоптичними стресами, неможливості вивезення і загрозливого накопичення у дворах побутового сміття, неконтрольованого використання реагентів для танення снігу, інтегральний вплив яких на міські екосистеми є невизначеним, і багато іншого, тобто до очевидної ескалації соціально-екологічних загроз.

За комплексом об'єктивних кількісних показників є можливість оцінити як рівень ризиків поточної НС, так і ефективність заходів з управління ризиками на регіональному рівні, тобто рівень ефективності регіональних стратегій управління ризиками НС, готовності регіональних систем управління НС до подолання наслідків НС, надання вчасної допомоги постраждалим тощо.

ЗАГАЛЬНА МЕТОДОЛОГІЯ

Ризики визначаються показниками навантаження на інженерні мережі, системи життєзабезпечення та транспортну інфраструктуру міста, які створюють надлишкові опади. В найпростішому випадку можна порахувати масу снігу і визначити ресурси, потрібні на його прибирання, оцінити масу води, яка може бути утворена при його таненні тощо. Загальна маса снігу є динамічною величиною, що залежить від щільності снігового покриву. Динамічну щільність снігового покриву протягом інтервалу спостережень можна визначити як

$$\rho_{snow} = \frac{\sum_i (\rho_i \Delta z_i + \rho_0 \Delta z_0)}{\Delta z_{snow}},$$

де ρ_i , Δz_i — щільність та потужність снігового покриву, зафіксовані за період спостереження i , ρ_0 , Δz_0 — щільність та потужність снігового покриву на початку періоду спостережень. При цьому динаміка щільності визначається кількома метеорологічними показниками:

$$\rho_i = \rho_i^{\min} + \kappa \frac{1 - Q_p}{f_i^{\max}}.$$

Тут ρ_i^{\min} — початковий рівень опадів, κ — емпіричний коефіцієнт (зазвичай приймається рівним 181), Q_p — тепловий функціонал опадів, що залежить від температури, атмосферного тиску і вологості повітря, f_i^{\max} — максимальний вміст води в опадах (при прогнозах розрахунках приймається $f_i^{\max} = 0.5$).

Сукупність емпіричних коефіцієнтів визначається за комплексом наземних завіркових робіт, зміна локальних метеорологічних показників визначається за даними метеорологічних вимірювань, а розподіли просторових показників можуть бути визначені за даними ДЗЗ.

У такому випадку маса снігу M_{snow}^i за інтервал i на певній площі S_j буде визначатися простою формою:

$$M_{snow}^i = \sum_{ij} z_{ij} \rho_{ij} S_j.$$

Водний еквівалент накопиченого снігу W_{ij} також має оцінюватися з урахуванням поточних і прогнозованих метеорологічних умов, а також з урахуванням просторової неоднорідності розподілу снігового покриву. У найпростішому випадку його можна представити як:

$$W_{ij} = \frac{\rho_w H_s}{c_s} \sum_{ij} \frac{d_{ij}^{cc}}{(0^\circ C - T_{ij}^s)},$$

де ρ_w — густина води, T_{ij}^s — температура снігового покриву, H_s — латентна теплота снігового покриву (приймається 80 кал/грам), c_s — теплопровідність снігу (в середньому приймається 0.5 кал/грам град), d_{ij}^{cc} — потужність твердої складової покриву.

Для розрахунку водозбору з усієї території можна використати інтегральну форму рівняння для водного еквіваленту. Відповідно до наведених рівнянь, а також по аналогії з [6], можна в загальному випадку для басейнів записати

$$W_{tot} = \left[\frac{1 - A_0}{A_i - A_0} (W_i - W_0) \right] + W_0.$$

У цьому рівнянні W_{tot} — загальний вміст вологи у сніговому покриві (водний еквівалент снігового покриву), W_0 — водний еквівалент снігового по-

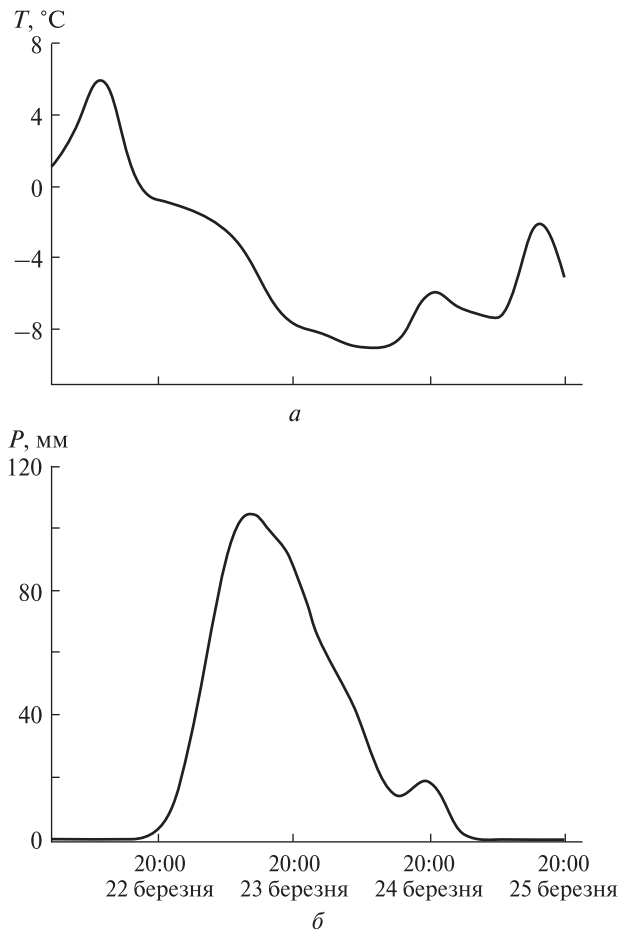


Рис. 1. Розподіл метеорологічних показників протягом 21—25 березня 2013 р.: *a* — варіації температур T повітря, *б* — варіації кількості опадів P

криву на початку процесу танення, W_i — водний еквівалент снігового покриву у момент спостереження i , A_0 — площа снігового покриву на початку сніготанення, A_i — поточна площа снігового покриву (у момент спостереження i). Таким чином, ключовими змінними будуть площа снігового покриву та характеристики, що визначають водний еквівалент снігу у момент спостереження.

У викладеному підході використано чотирикомпонентну модель снігового покриву. В цій моделі сніговий покрив представлено як сукупність фракцій льоду, води, повітря та водяної пари. Ця модель дозволяє отримати точніші прогнози в динамічних просторово-часових сценаріях, на відміну від двоконпонентних (лід та

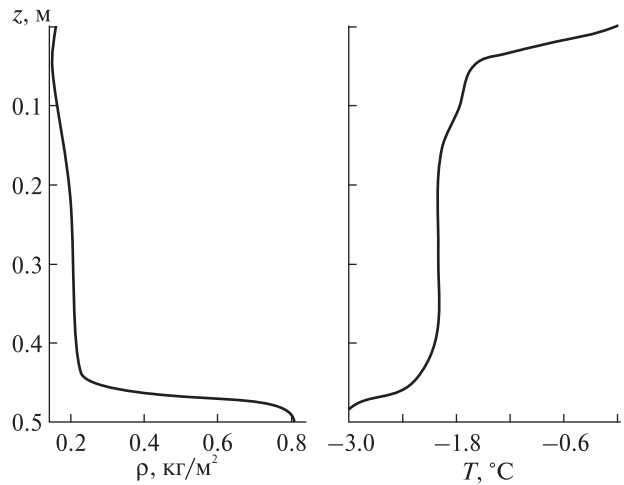


Рис. 2. Усереднені профілі щільності (*a*) і температури (*б*) снігового покриву станом на 14:00 25 березня 2013 р. за даними наземних калібрувальних вимірювань

повітря) та трикомпонентних (лід, вода, повітря) моделей. Дана модель може бути використана при аналізі даних супутникових спостережень, але при цьому вона потребує калібрування за наземними вимірюваннями.

НАЗЕМНЕ КАЛІБРУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ТА ВЕРИФІКАЦІЯ ДАНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Використана модель снігового покриву, як було зазначено, потребує калібрування за наземними вимірюваннями [2]. Протягом 23—26 березня було проведено необхідні вимірювання у межах м. Києва на 14 точках. Було отримано дані щодо потужності снігового покриву, вертикальних розподілів його щільності, температури, грануляції, виміряна шорсткість поверхні та показники відбиття (рис. 1 і 2).

Таким чином було проведено калібрування використаних моделей і завірка супутникових спостережень.

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ СУПУТНИКОВИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Проблема аналізу снігового покриву в межах урбанізованих територій є набагато складнішою, порівняно із загальними оцінками параметрів снігового покриву у межах природних і сільськогосподарських ландшафтів. Зазвичай постають дві ключові проблеми: оперативність і розрізнен-

ність. Інші вимоги до оперативності отримання інформації про динаміку параметрів розподілу снігового покриву постають із постановки задачі про безпеку міських агломерацій щодо загроз гідрометеорологічного походження. Якщо у стандартних випадках можна обмежитися добовими показниками розподілу снігового покриву, то у випадках аналізу снігової обстановки в місті необхідно забезпечити надходження інформації з інтервалом в 5—8 годин. Метеорологічні супутники забезпечують таку частоту зйомок, але не дають сукупності параметрів снігового покриву. Крім того, така частота передбачає вимірювання параметрів снігового покриву безпосередньо під час накопичування снігу, що практично неможливо з використанням сенсорів оптичного діапазону в умовах щільної хмарності.

Іншою проблемою є недостатня розрізнявальна здатність сенсорів, що зазвичай використовуються для аналізу снігового покриву, як просторова, так і спектральна. Просторова розрізненність в кілька сотень метрів є цілком придатною для аналізу снігу в природних умовах і для цілей сільського господарства, але у міських агломераціях, де характерні масштаби складають 50—150 м, є недостатньою. Спектральна розрізненність має забезпечити робастність алгоритму розпізнавання, тобто можливість визначення вкритих снігом ділянок в умовах, коли внаслідок активної антропогенної діяльності (наприклад, робіт із розчищення снігових заметів) локальні показники відбиття снігу суттєво змінюються.

Наразі жоден з наявних сенсорів не може забезпечити вирішення зазначених проблем на адекватному рівні. У такому випадку рішення полягає в залученні для вирішення задачі даних з багатьох джерел (інтеркаліброваних і коректно взаємоузгоджених по просторових, часових і енергетичних характеристиках), широкому використанні наземних калібрувальних даних і поєднанні результатів спостережень із результатами моделювання процесів, що генерують небезпеку, тобто процесів енергомасообміну у природних системах (в нашому випадку — процесів накопичення і танення снігу).

Основні задачі оцінки снігового покриву дистанційними засобами традиційно лежать в галузях

метеорології і кліматології, гідрології (гідрологічної безпеки територій) і сільського господарства. Таке коло завдань визначає набори сенсорів і алгоритмів, що використовуються для аналізу снігового покриву. Для більшості сучасних застосувань найбільш вдалим є продукти MODIS [14], які дозволяють отримувати параметри снігового покриву щоденно, з 5-денним усередненням, щомісячно, з сіткою 500 м [15] (наприклад продукт MOD10A1), а також визначати водний еквівалент снігового покриву за даними AMSR-E з розрізненням 25 км з 5-денним усередненням [25] (продукт SWE). Ці дані є добре верифіковані, сенсори коректно відкалібровані, а алгоритми дозволяють з високою достовірністю визначати розподіли параметрів снігового покриву. Достовірність обмежується лише просторово-часовими характеристиками прогнозів, які можуть не збігатися з характеристиками розподілів даних.

Перелічені алгоритми є наразі найбільш вживаними в задачах аналізу снігового покриву. Але при цьому вони характеризуються просторовими характеристиками, які значно ускладнюють їхнє використання для аналізу урбанізованих територій. Крім того, алгоритм, за яким розраховуються продукти MOD10A1 та SWE, не є робастним в умовах суттєвих змін радіаційних характеристик снігового покриву, які характерні для міських агломерацій внаслідок антропогенної діяльності. Тому нам потрібні додаткові джерела інформації, які, по-перше, мають достатню геометричне розрізнення (порівняне із характерними просторовими масштабами міських територій) і, по-друге, дають можливість керувати параметрами розпізнавання.

Зважаючи на відомі тенденції зміни радіаційних характеристик снігового покриву на різних стадіях сніготанення [10, 22] і визначені за комплексом наземних вимірювань характеристики різних типів снігового покриву, по аналогії із [28] можна запропонувати нормалізований індекс снігового покриву у формі:

$$NDSI = \frac{R_{[0.55-0.65]} - R_{[0.75-0.85]}}{R_{[0.55-0.65]} + R_{[0.75-0.85]}} \approx \frac{R_{VIS} - R_{NIR}}{R_{VIS} + R_{NIR}},$$

де R — коефіцієнти відбиття у визначеній частині спектру.

Виходячи із аналізу розподілів відбиття снігового покриву, отриманих із серій спостережень, моделей, наземних вимірювань, а також із даних наведених іншими дослідниками [28], можна визначити граничний показник індексу *NDSI*, який відповідає наявності снігового покриву. Для відкритих ділянок він складає 0.32—0.36, а для ділянок вкритих щільною рослинністю 0.28—0.31. Для ділянок, які характеризуються наявністю щільної забудови, цей показник коливатиметься у межах 0.18—0.33, в залежності від щільності забудови, потужності антропогенного впливу (ступеню забрудненості снігового покриву, ущільненості, переробленості тощо) та типу сенсора. Тоді очевидним є правило: якщо піксел x_{ij} характеризується значенням індексу *NDSI*, що перевищує граничне, ми з максимальною достовірністю відносимо його до області A_i , яка вкрита снігом. Співвідношення значення *NDSI* та потужності снігового покриву, необхідне для визначення водного еквіваленту, можна визначити із калібрувальних вимірювань на локальному рівні.

Таким чином, ми вводимо оптичний індекс для визначення проблемно орієнтованих параметрів снігового покриву (що визначають розподіл змінних відповідних моделей енергомасообміну в задачах оцінки гідрологічної безпеки території) до комплексу індикаторів мікрохвильового та інфрачервоного діапазону, що використовуються в задачах інтегральної оцінки снігового покриву методами ДЗЗ. Звичайно, додавання цього індексу не вирішує проблеми отримання інформації протягом накопичення опадів, але використання цього індексу дозволяє залучати дані будь-якої просторової розрізненності і, таким чином, сприяє вирішенню проблеми підвищення спектральної і просторової розрізненності методів аналізу снігового покриву.

ПРИНЦИПИ ІНТЕГРАЦІЇ ДАНИХ

Надалі постає задача інтеграції даних спостережень з різних джерел, результатів моделювання, метеорологічних спостережень і наземних вимірювань в єдину гармонізовану сукупність даних, придатних для аналізу ризиків. Ця задача вирішується в рамках підходу до гармонізації розподілів даних.

За результатами первинної обробки даних спостережень і вимірювань, аналізу даних моделей ми отримуємо сукупність нормалізованих розподілів $\xi_t = \mathbf{A}_t f(x_t) + v_t$, де t — момент часу (що визначається як крок моделювання для множини модельних даних і як міра множини даних для розподілів даних метеорологічних спостережень). Надалі пропонується спільно аналізувати дані моделювання, спостережень та вимірювань в рамках модифікованого методу трансформації ансамблів фільтрацією Кальмана (Ensemble Transform Kalman Filter — ETKF) [27].

Метод фільтрації Кальмана для визначення параметрів небезпеки детально відпрацьований та широко використовується в Інституті космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України. Зокрема, в роботах [3, 4, 17] доведено ефективність цього підходу до визначення параметрів гідрологічної та метеорологічної небезпеки.

В рамках цього підходу будемо вважати, що вектори істинного стану системи \mathbf{x} в момент часу k визначаються загальним законом

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{F}_t \mathbf{x}_{t-1} + \mathbf{B}_t u_t + w_t,$$

де \mathbf{F}_t — матриця еволюції системи, тобто моделюваних впливів на вектор \mathbf{x}_{t-1} у момент $t - 1$; \mathbf{B}_t — матриця вимірних впливів u_t на вектор \mathbf{x} ; w_t — випадковий процес з коваріаційною матрицею \mathbf{Q}_t . Таким чином ми вводимо опис модельних розподілів F_x та даних спостережень B_t .

Визначимо екстраполяційне значення вектора істинного стану системи за оцінкою вектора стану на попередньому кроці:

$$\hat{\mathbf{x}}_{t|t-1} = \mathbf{F}_t \hat{\mathbf{x}}_{t-1|t-1} + \mathbf{B}_t u_{t-1}.$$

Для цього екстраполяційного значення вектора істинного стану можна визначити загальний вигляд коваріаційної матриці:

$$\mathbf{P}_{t|t-1} = \mathbf{F}_t \mathbf{P}_{t-1|t-1} \mathbf{F}_t^T + \mathbf{Q}_{t-1}.$$

Різниця між оцінюваним (екстраполяційним) значенням вектора істинного стану системи та значенням, отриманим на відповідному кроці моделювання, може бути оцінена як

$$\Delta \hat{\mathbf{x}}_t = \xi_t - \mathbf{A}_t \hat{\mathbf{x}}_{t|t-1},$$

а коваріаційна матриця відхилення — як

$$\mathbf{S}_t = \mathbf{A}_t \mathbf{P}_{t|t-1} \mathbf{A}_t^T + \mathbf{R}_t.$$

Далі на основі коваріаційних матриць екстраполяції вектора стану і отриманих вимірів введемо матрицю оптимальних коефіцієнтів кальманівського підсилення:

$$\mathbf{K}_t = \mathbf{P}_{|t-1} \mathbf{A}_t^T \mathbf{S}_t^{-1},$$

використовуючи яку скоригуємо екстраполяційні значення вектора істинного стану системи:

$$\hat{\mathbf{x}}_{|t} = \hat{\mathbf{x}}_{|t-1} + \mathbf{K}_t \Delta \hat{\mathbf{x}}_t.$$

При цьому вводимо геореферований фільтр на розподіл вектору стану \mathbf{x}_{ij} , який залежатиме від географічно прив'язаних координат i, j та не залежатиме в загальному випадку від моменту часу t :

$$(\mathbf{x}_{ij})_t = (\mathbf{x}_{ij})_t^\alpha = (\mathbf{x}_{ij})_t \alpha_{ij}.$$

Тут коефіцієнти α обираються відповідно до введеного алгоритму КРСА [18] за правилом оцінки оптимального балансу функцій взаємної валідації:

$$\mathbf{C}^F \mathbf{v} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \Phi(\mathbf{x}_j) \Phi(\mathbf{x}_j)^T \cdot \sum_{i=1}^N \alpha_i \Phi(\mathbf{x}_i),$$

де нелінійна функція розподілу вхідних даних Φ задовольняє умови [23]:

$$\sum_{k=1}^N \Phi(\mathbf{x}_k) = 0,$$

а \tilde{k}_t — усереднені значення кернел-матриці $\mathbf{K} \in R^N$ (де $[\mathbf{K}]_{ij} = [k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)]$). Ця матриця складається із кернел-векторів, що визначаються як $\mathbf{k}_i \in R^N$; при цьому $[\mathbf{k}_i]_j = [k_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)]$. Кернел-матриця розраховується відповідно до модифікованого правила [7] $k_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_i) = \langle \rho_{j,i}^{x_j} (1 - \rho_{j,i})^{x_j} \rangle$, де ρ — емпіричні параметри, які обираються відповідно до моделі класифікації досліджуваних явищ [26].

Якщо застосувати цей фільтр і пам'ятати про необхідність взаємоузгодження множин даних, можна запропонувати вигляд матриці \mathbf{P}^a для аналізу фактичних похибок, виходячи із вигляду матриці похибок екстрапольованого значення вектору стану системи \mathbf{P}^f та матриці коваріації даних спостережень \mathbf{R} :

$$\mathbf{P}^a = \mathbf{P}^f - \mathbf{P}^f \mathbf{A}^T (\mathbf{A} \mathbf{P}^f \mathbf{A}^T + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{A} \mathbf{P}^f.$$

Таким чином ми отримуємо засіб для оптимізації розрахунку матриці оптимальних коефіцієнтів кальманівського підсилення і корекції екстраполяційних значень вектора істинного стану системи за сукупними даними моделювання і спостережень.

Після закінчення процедури інтеграції даних ми перераховуємо необхідні параметри за алгоритмом

$$x_t^{(ij)} = \sum_{m=1}^n w_{ij}(\hat{x}_t^m) x_t^m,$$

де $w_{ij}(\tilde{x}_t^m)$ — ваговий коефіцієнт, який визначається через пошук мінімуму [9]:

$$\min \left\{ \sum_{m=1}^n \sum_{x_t^m \in R^m} w_{ij}(\tilde{x}_t^m) \left(1 - \frac{x_t^m}{\hat{x}_t^m} \right)^2 \right\}.$$

У цьому рівнянні m — кількість проведених експериментів, n — кількість джерел даних, x_t^m — розподіл результатів спостережень, R^m — множина (загальна сукупність) даних, \hat{x}_t^m — кориговані екстраполяційні значення вектора істинного стану системи за сукупними даними моделювання і спостережень.

Таким чином ми отримуємо регулярний просторовий розподіл вимірюваних характеристик по локальній території дослідження як за даними дистанційних спостережень та результатами модельних розрахунків, так і з урахуванням регіональних метеорологічних та наземних калібрувальних вимірювань по сітці, яка відповідає розподілу даних вимірювань, тобто має значно краще розрізнення, ніж первинна сітка.

ОЦІНКИ ПОКАЗНИКІВ РИЗИКУ ЗА КОМПЛЕКСОМ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Показники просторового розподілу маси накопиченого у межах міської території снігу і льоду, їхнього водного еквіваленту, показники навантаження на транспортну інфраструктуру та їхня часова динаміка можуть розглядатися як міри ризику відповідного типу НС, які можуть бути кількісно оцінені за допомогою комплексу засобів ДЗЗ.

В рамках запропонованого підходу навантаження на інфраструктуру, наприклад на транспортну інфраструктуру L_i^{tran} , можна визначити як відношення маси снігу M_{snow}^{ij} зафіксованої на певній площі протягом окремого інтервалу часу до щільності транспортної мережі на даній площі (км/км²) R_j , за простим правилом:

$$L_i^{tran} = \frac{M_{ij}}{R_j}.$$

Таким чином, ми зводимо показники навантаження до просторово-часових розподілів параметрів, які можна визначити за даними ДЗЗ з наземною завіркою та у комплексі із даними метеорологічних вимірювань.

Просторовий розподіл снігового покриву, його інтегральна щільність і потужність можуть бути оцінені за даними супутникових спостережень. Так само за даними ДЗЗ можна суттєво уточнити розподіл міської інфраструктури, зокрема просторовий розподіл показника R_j , що визначає щільність транспортної мережі на даній площі.

Отже, відповідно до наведених алгоритмів було проведено розрахунки визначених показників, які дозволили визначити, що загальна кількість снігу, яка створила перешкоди для функціонування інфраструктури м. Києва, може бути оцінена на рівні 61.7 млн тонн. Навантаження на транспортну інфраструктуру міста розраховане виходячи із її загальної довжини 1675 км (без урахування дворових проїздів та пішохідних зон), яка розташована на площі 868 км² із суттєвими гетерогенностями. У залежності від району щільність транспортної інфраструктури складає від 1.43 до 2.76 км/км² (в середньому 1.85 км/км²). Як видно з рис. 3 навантаження в максимумі опадів склало 2742100 тонн, або 1700 тонн снігу на 1 км дороги (тобто приблизно 9.6 м³ снігу в середньому на погонний метр вулиці з урахуванням узбіч, тротуарів тощо). Таким чином, ми маємо справу із однією із найбільш потужних метеорологічних і кліматичних надзвичайних ситуацій в Києві в цей період за всю історію спостережень.

До другої половини доби 24 березня (тобто протягом 48 годин з початку НС і через 4–6 годин після закінчення активної фази негативного впливу) було редуковано приблизно 45–50 % навантаження на транспортну інфраструктуру міста, що загалом є непоганим показником. Але й протягом трьох діб наслідки не було ліквідовано до прийнятного рівня (<12–15 % від пікових навантажень) [19, 20], і таким чином не було створено належних умов до забезпечення відновлення рівня і якості життя городян. Наприклад, протягом чотирьох діб — до початку процесів активного танення — не було вжито достатніх заходів для вивезення снігової маси за межі міста

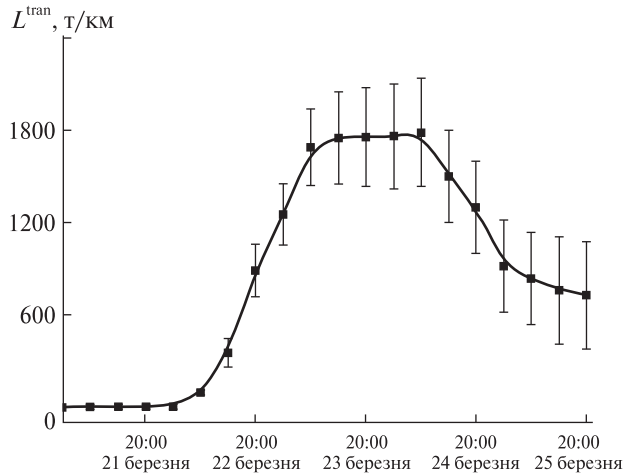


Рис. 3. Динаміка навантаження на транспортну інфраструктуру (L^{tran})

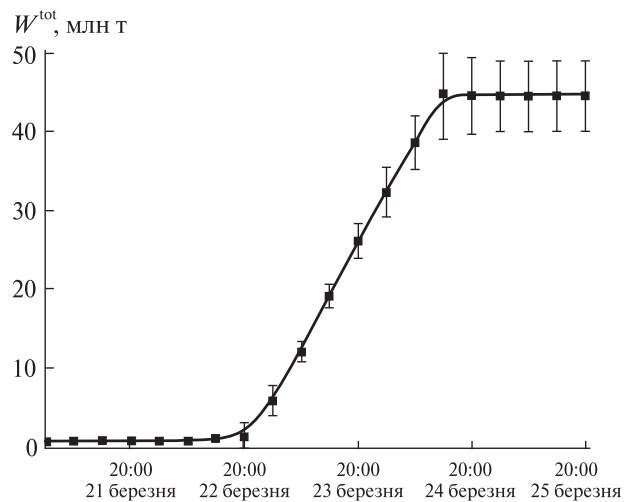


Рис. 4. Розподіл водного еквіваленту снігу (W_{tot}), накопиченого під час снігопадів 22–24 березня.

у місця, де танення снігу не створить додаткової загрози підтоплення та перевантаження міських систем водовідведення. Це свідчить про відсутність адекватних та/або недосконалість наявних стратегій зменшення впливів НС такого типу.

Також необхідно зазначити, що після снігопадів 22–24 березня було накопичено станом на 25 березня кількість снігу, водний еквівалент якого дорівнює приблизно 44.5 млн м³, або 51.5 тис. тонн води на км² загальної міської площі (рис. 4). Це створює значну загрозу як системам водовідведення, так і повеневій безпеці в разі виник-

нення відповідних метеорологічних умов під час танення. Перші проблеми в системах міського водовідведення було зафіксовано вже 28 березня, тобто на п'яту добу після НС та на другий день з початку активного денного танення снігової маси, яка не була вивезена за межі міста.

Наведені дані загалом збігаються із даними щоденних спостережень сенсора AMSR-E/Aqua (Daily L3 Global Snow Water Equivalent) [25], які дають показник на 24—25 березня на рівні 42.5 млн тонн, а також з усередненими значеннями 5-денних розподілів AMSR-E/Aqua (5-Day L3 Global Snow Water Equivalent) [25], які показують 36.5 млн тонн (з урахуванням стоку, танення і випаровування) на території, що аналізується. Тобто, відхилення середнього значення нашої оцінки складає 4—6 % від щоденних вимірювань AMSR-E та 18—20 % від середніх 5-денних значень. Це дещо відрізняється від оцінок середніх похибок та розбіжностей при використанні нормалізованого індексу снігового покриву *NDSI* та продуктів MOD10A1 та SWE, наведених в роботі [29]. Згідно з даними [29] середня розбіжність оцінок для території Китаю складає від 2.5 до 15 % в залежності від усереднення. Беручи до уваги те, що ці дані стосуються переважно для природних ландшафтів та сільськогосподарських угідь, а наші оцінки робилися для міських агломерацій, розбіжність у півтора раза (2.5 % і 4—6 %) можна вважати зрозумілою. При багатоденному усередненні розбіжності, зумовлені відмінностями земних покривів, редукуються, але загальна розбіжність відносно спостережень низького розрізнення залишається значною. Таким чином, метод визначення характеристик снігового покриву на основі комплексного використання супутникової інформації, зокрема продуктів MOD10A1 та SWE, нормалізованого індексу снігового покриву *NDSI*, локальних метеорологічних спостережень, наземних калібрувальних і завіркових вимірювань має достатньо високу відносну достовірність порівняно з іншими методами, алгоритмами та продуктами (окремо використаними продуктами MOD10A1 та SWE) при застосуванні для аналізу міських агломерацій.

Окремо слід розглянути методологію оцінки загальної міри ризику досліджуваної події. Для

оцінки ймовірності настання надзвичайної ситуації такого роду розглянемо показники частоти подій в залежності не лише від зафіксованої повторюваності, але і від просторово-часових неоднорідностей процесів, які породжують загрози, а також від рівнів оцінюваних небезпечних впливів. Звичайний підхід передбачає оцінку ймовірності події відповідно до середньої частоти її настання μ , визначеною за сукупністю всіх доступних спостережень i :

$$\mu = \sum_i^n \frac{\lambda_i}{n} \rightarrow p.$$

У такому випадку середня оцінювана ймовірність такої події складе від 0.007 до 0.01 (тобто повторюваність події знаходиться у межах інтервалу один раз на 100—140 років). Ми пропонуємо використати складніший підхід, що базується на модифікованому рівнянні Оморі [21], який дозволяє враховувати складні взаємозалежності в просторово-часових розподілах досліджуваних явищ:

$$\lambda(t, x, y) = \mu + \sum_{j,t} \left(\frac{F_j^0(x, y)}{(t - t_j)^p} + \frac{(x - x_j; y - y_j) \cdot S_j(x - x_j; y - y_j)}{\exp(\alpha L_j)} + d \right)^q \rightarrow p.$$

Тут p, q, α — емпіричні коефіцієнти; L — впливи від події (наприклад, екстремальні рівні опадів у будь-якій формі, спричинені непередбачуваними, нехарактерними для даного сезону метеорологічними умовами, що викликають пікові навантаження на інфраструктуру) в точці, що належить елементарній площі S_j з координатами x, y в момент часу t ; $F_j^0(x, y)$ — стаціонарний розподіл стресових навантажень за багаторічними спостереженнями; d — фактор масштабування, що визначається для процесів, що генерують небезпеку (наприклад для циклонів). При використанні цього підходу оцінювана ймовірність події складає від 0.039 до 0.052 (тобто повторюваність події знаходиться в межах інтервалу один раз на 19—25 років). При цьому слід додатково зауважити наявність кліматичних змін, які тут не було враховано.

Доцільність врахування впливу кліматичних змін підтверджує інший приклад надзвичай-

ної ситуації, яку можна було спостерігати цього року у м. Києві. У період 18—23 січня на території міста спостерігалось екстремальне зледеніння дорожнього покриття, що призвело до значних ризиків травмувань та ушкоджень городян. Тоді кількість травмованих внаслідок ожеледиці склала близько 2300 людей [5]. Тільки за один день 22 січня до травмпунктів звернулося 579 людей, включаючи 35 дітей, 60 постраждалих потребували термінової госпіталізації. Узагальнений розподіл ризиків як міри відносної кількості постраждалих, що зазнали ушкоджень внаслідок екстремального зледеніння дорожнього покриття, наведено на рис. 5.

Практика боротьби з цим стихійним явищем і подолання наслідків негоди показала недостатню готовність комунальних служб до такого роду НС, а державні служби з надзвичайних ситуацій взагалі відмовилися брати участь в ліквідаційних роботах, незважаючи на велику кількість постраждалих. Спираючись на світовий досвід [8, 19, 24], маємо стверджувати, що перевищення середнього рівня постраждалих як міри небезпечного впливу надзвичайної ситуації в 5.4 рази, а також загальна кількість 2300 постраждалих за п'ять діб має вважатися достатнім індикатором надзвичайної ситуації і, таким чином, достатнім мотивом залучення відповідних агенцій до участі в заходах зменшення збитків.

Розрахована за традиційними методами повторюваність ожеледиці з такими впливами (тобто з такою кількістю постраждалих) складає приблизно 15—18 років. Застосування запропонованого підходу визначає ймовірність такої події у межах від 0.28 до 0.52 (повторюваність події знаходиться у межах інтервалу один раз на 2—4 роки). Спостереження протягом одного сезону двох надзвичайно рідкісних подій призводить до висновку, що регіональні ризики НС та показники вразливості населення та локальної інфраструктури по відношенню до відповідних загроз є суттєво недооціненими.

Розглянуті приклади яскраво підкреслюють, що використання методів оцінювання ймовірностей настання екстремальних подій і відповідних методів аналізу ризиків, що базуються тільки на розподілах середніх значень, використанні

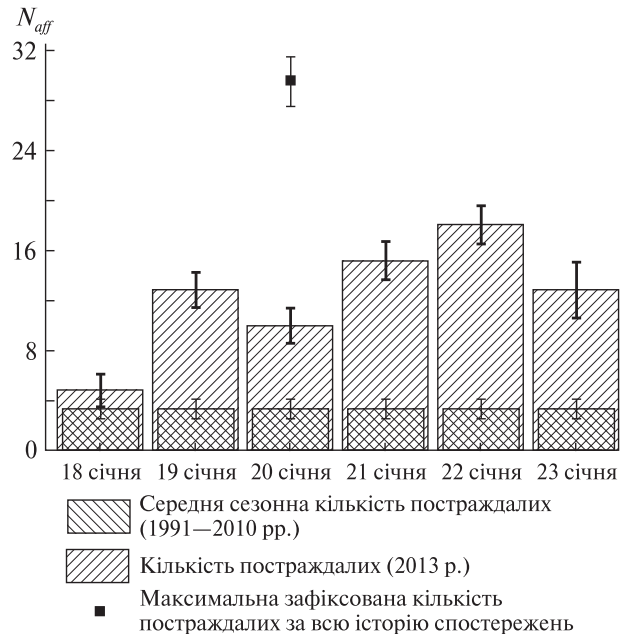


Рис. 5. Розподіл кількості постраждалих від ожеледиці в м. Києві 19—23 січня 2013 р., віднесена на 100 000 населення (N_{aff}) у порівнянні із середнім багаторічним сезонним рівнем та зазначенням абсолютного максимуму.

простих методів аналізу (таких як метод найменших квадратів, аналіз коваріаційних матриць тощо), як правило, не приводить до розробки сталих робастних стратегій управління ризиками надзвичайних ситуацій [11].

ВИСНОВКИ

Особливості міських агломерацій зумовлюють необхідність розробки алгоритмів коректного злиття даних спостережень з різних джерел, модельних розрахунків, наземних вимірювань та метеорологічних спостережень з метою отримання оперативних достовірних ситуативних і прогностичних розрахунків показників ризиків з відповідними показниками просторової і часової розрізненості.

Дані ДЗЗ в задачах контролю та моніторингу НС у міських агломераціях можуть і повинні використовувати для підвищення ефективності управління безпекою. Дані ДЗЗ, отримані з різних джерел в рамках відомих методик, оброблені із застосуванням проблемно-орієнтованих алгоритмів та у поєднанні із даними метеороло-

гічних спостережень, моделювання енергома-сообміну в наземних системах та з наземними калібрувальними вимірюваннями, мають високу достовірність. Ця достовірність в задачах оцінки відповідних ризиків, наприклад вразливості міської інфраструктури, оцінки навантажень на штучні ландшафти, оцінки вологозапасів тощо, може перевищувати достовірність традиційних підходів [1].

Ризики НС (зокрема гідрологічних, метеорологічних і кліматичних надзвичайних ситуацій) та показники вразливості міської інфраструктури по відношенню до відповідних загроз є наразі суттєво недооціненими. Це призводить до відсутності адекватних та/або недосконалої наявних стратегій зменшення впливів НС такого типу як на національному так і регіональному рівнях. Невідповідність підготовчих заходів, мір з управління ризиками та заходів з подолання наслідків НС реальним рівням існуючих комплексних загроз може призвести до виникнення «мережових» катастроф [16], які зумовлені системним характером ризиків [12].

Розглянуті приклади НС показують, що спроби рішень, що приймаються, виходячи із простих балансових припущень, не є ефективними в умовах, коли і вхідні дані, і очікувані результати розподіляються за законами, які можуть суттєво відрізнятись від нормальних (що ми зазвичай і спостерігаємо в екстремальних випадках). З точки зору розробки найбільш ефективних стратегій управління ризиками слід зазначити, що лише інтегроване моделювання всієї сукупності детермінованих і стохастичних взаємозв'язків явищ і процесів, що генерують небезпеку, а також спільний розгляд стратегічних «*ex-ante*» рішень (наприклад, різноманітних інженерних, структурних заходів) та адаптивних «*ex-post*» рішень (наприклад, страхові та фінансові механізми) дозволяє отримати гнучкі робастні рішення в галузі безпеки [13].

1. *Изменения земных систем в Восточной Европе* / Отв. ред В. И. Лялька. — Киев, 2010. — 582 с.
2. *Костюченко Ю. В.* Завіркові дані для вирішення задач прогнозування паводкової небезпеки // Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / За ред. В. І. Лялька,

- М. О. Попова. — Київ: Наук. думка, 2006. — С. 282—284.
3. *Кравченко А. Н.* Каскад гидрометеорологических моделей для прогнозирования паводков // Кибернетика и вычислительная техника. — 2007. — № 2. — С. 35—42.
4. *Кравченко А. Н., Куссуль Н. Н., Лулян Е. А. та ін.* Мониторинг водных ресурсов на основе интеграции разнородных данных и высокопроизводительных вычислений // Кибернетика и системный анализ. — 2008. — № 6. — С. 117—126.
5. *Петравчук Л. В., Марухно Т. В., Першина Н. Г. та ін.* Основні показники здоров'я та медичної допомоги населенню м. Києва. — Київ: Міський науковий інформаційно-аналітичний центр медичної статистики, Департамент охорони здоров'я Київської міської державної адміністрації. 2013. — 170 с.
6. *Anderson E. A.* A point energy and mass balance model of a snow cover // NOAA Technical Report NWS. — 1976. — 19. — 150 p.
7. *Christianini N., Shawe-Taylor J.* An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods. — Cambridge: Univ. Press, 2000. — 212 p.
8. *Comprehensive Preparedness guide: Developing and maintaining emergency operations plans.* — U.S. FEMA, 2011. — 124 p.
9. *Cowpertwait P. S. P.* A generalized spatial-temporal model of rainfall based on a clustered point process // Proc. Roy. Soc. London A. — 1995. — 450. — P. 163—175.
10. *Dozier J.* Remote sensing of snow in visible and near-infrared wavelengths // Theory and applications of optical remote sensing / Ed. G. Asrar. — New York: John Wiley & Sons, 1989. — P. 527—547.
11. *Ermoliev Yu., von Winterfeldt D.* Risk, security and robust solutions // IIASA Interim Report. — 2010. — IR-10-013, IIASA. — 41 p.
12. *Ermoliev Yu., von Winterfeldt D.* Systemic risk and security management // Managing Safety of Heterogeneous Systems, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. — Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. — P. 19—49.
13. *Ermoliev Y. M., Ermolieva T. Y., Amendola A., et al.* A system approach to management of catastrophic risks // Eur. J. Operational Res. — 2000. — 122. — P. 452—460.
14. *Hall D. K., Salomonson V. V., Riggs G. A.* MODIS/Terra snow cover monthly L3 global 0.05deg CMG. Version 5. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center, 2006.
15. *Hall D. K., Salomonson V. V., Riggs G. A.* MODIS/Terra snow cover daily L3 global 500 m grid. Version 5. [indicate subset used]. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center, 2006.
16. *Kostyuchenko Yu. V., Zlateva P., Stoyka Yu., et al.* Role of systemic risk in regional ecological long-term threats

- analysis // Sustainable Civil Infrastructures — Hazards, Risk, Uncertainty / Phoon K. K., Beer M., Quek S. T., Pang S. D. (editors), (Proc. of Fifth Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications (APSSRA), 23—25 May, 2012), Research Publishing, Singapore, 2012. — P. 551—556, ISBN: 978-981-07-2219-7:: doi:10.3850/978-981-07-2219-7 P226.
17. Kussul N., Shelestov A., Skakun S. Grid system for flood extent extraction from satellite images // Earth Sci. Inform. — 2008. — 1, N 3. — P. 105—117.
 18. Lee J.-M., Yoo C. K., Choi S. W., et al. Nonlinear process monitoring using kernel principal component analysis // Chem. Eng. Sci. — 2004. — 59. — P. 223—234.
 19. National Disaster recovery framework: strengthening disaster recovery for the nation. U.S.FEMA, 2011. — 116 p.
 20. National Infrastructure Protection Plan. IS-860.a. U.S. FEMA, 2009. — 29 p.
 21. Ogata Y. Estimation of the parameters in the modified Omori formula for aftershock frequencies by the maximum likelihood procedure // J. Phys. Earth. — 1983. — 31. — P. 115—124.
 22. Ramsay B. The interactive multisensor snow and ice mapping system // Hydrol. Processes. — 1998. — 12. — P. 1537—1546.
 23. Scheolkopf B., Smola A. J., Muller K. Nonlinear component analysis as a kernel eigenvalue problem // Neural Computation. — 1998. — 10, N 5. — P. 1299—1399.
 24. Strategic National risk assessment. The strategic national risk assessment in support of PPD 8: A comprehensive risk-based approach toward a secure and resilient nation. U.S.FEMA, 2011. — 7 p.
 25. Tedesco M., Kelly R., Foster J. L., Chang A. T. C. AMSR-E/Aqua 5-day L3 global snow water equivalent EASE-grids. Version 2. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center, 2004.
 26. Villez K., Ruiz M., Sin G., et al. Combining multiway principal component analysis (MPCA) and clustering for efficient data mining of historical data sets of SBR processes // Water Sci. and Technology. — 2008. — 57, N 10. — P. 1659—1666.
 27. Wang X., Bishop C. H. A Comparison of breeding and ensemble transform Kalman filter ensemble forecast schemes // J. Atmos. Sci. — 2003. — 60. — P. 1140—1158.
 28. Zhang Y. Z., Jin C., Yan S., Chiu L. S. Seasonal snow monitoring in Northeast China using space-borne sensors: preliminary results // Ann. Geogr. Inf. Sci. — 2008. — 14. — P. 113—119.
 29. Zhang Yu., Yan S., Lu Y. Snow cover monitoring using MODIS data in Liaoning province, Northeastern China // Remote Sens. Environ. — 2010. — 2. — P. 777—793; doi:10.3390/rs2030777.

Стаття надійшла до редакції 24.10.13

Ю. В. Костюченко, Ю. Г. Белоус,
Д. М. Соловьев, И. М. Копачевский

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДСТВ СПУТНИКОВОГО НАБЛЮДЕНИЯ В КОМПЛЕКСЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ РИСКОВ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Рассматриваются отдельные аспекты создания теоретико-методической базы использования данных спутниковых наблюдений снежного покрова в задаче оценки метеорологических, климатических и гидролого-гидрогеологических рисков городских агломераций. Предложено метод определения характеристик снежного покрова на основе комплексного использования спутниковой информации (а именно, продуктов *MOD10A1* и *SWE*, нормализованного индекса снежного покрова *NDSI*, локальных метеорологических наблюдений, наземных калибровочных и заверочных измерений). Предложено метод интеграции данных с разных источников, который базируется на модифицированном методе трансформации ансамблей фильтрацией Кальмана и методе ядрель-анализа главных компонент распределений данных. Применимо к анализу городских агломераций, предложенный подход имеет относительно высокую достоверность по отношению к существующим методам, алгоритмам и продуктам (отдельно использованных продуктов *MOD10A1* и *SWE*). В качестве апробации метода рассмотрено случай экстремальных снегопадов 21—23 марта 2013 г. в г. Киев. Предложено количественные оценки показателей рисков и параметров уязвимости городской инфраструктуры по отношению к негативным влияниям чрезвычайной ситуации.

Yu. V. Kostyuchenko, Yu. H. Bilous,
D. M. Solovyov, I. M. Kopachevsky

UTILIZATION OF SATELLITE OBSERVATIONS IN THE RISK ASSESSMENT METHODS OF METEOROLOGICAL AND CLIMATIC DISASTERS IN URBAN AREAS

We consider some aspects of the theoretical and methodological basis for utilization of satellite observations of snow cover in the task of climatic, meteorological, hydrological and hydrogeological risk assessment in urban areas. We propose fundamentals of a procedure for the determination of the snow cover characteristics by integrating usage of satellite information (especially, *MOD10A1* and *SWE* products, snow depth normalized index *NDSI*, local meteorological observations, ground calibration and verification measurements). On the basis of the modified method of Ensemble Transform Kalman Filter (ETKF) and Kernel Principal Component Analysis of data distributions (KPCA), a method of data integration from various sources is proposed. It is shown that in application of urban agglomeration analysis the proposed approach has sufficiently high relative accuracy with respect to existing approaches (separately used *MOD10A1* and *SWE* products). As an example of approach approbation, a case of extreme snowfall in Kyiv during 21—23 of March 2013 is used. A quantitative assessment of risk indicators and parameters of municipal infrastructure vulnerability toward adverse effects of a disaster is presented.