

---

---

# ФІЗИКА АТМОСФЕРИ ТА ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ МЕТЕОРОЛОГІЧНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ

В. Шпиг, О. Скриник

---

---

## ДОСЯГНЕННЯ ТА ЗДОБУТКИ 2001–2020 РОКІВ

Відділ фізики атмосфери в УкрГМІ ДСНС України та НАН України було утворено згідно із постановою Ради Міністрів СРСР та УРСР 1958 р. про розвиток досліджень щодо штучного впливу на хмари і тумани.

Нині відділ фізики атмосфери залишається одним із основних наукових підрозділів інституту. Впродовж 2001–2020 рр. його очолювали В.П. Баханов (до 2002 р., 2007–2011 рр.), В.А. Прусов (2003–2007 рр.) та В.М. Шпиг (з 2011 по теперішній час). Перші п'ятнадцять років за відносно достатніх матеріально-технічного та кадрового забезпечення у відділі розв'язувалися питання широкого спектру, пов'язані не лише із теоретичними аспектами, але й зорієнтовані на вирішення завдань національного значення, зокрема:

1. Дослідження закономірностей еволюції систем шаруватоподібних та конвективних хмар і пов'язаних з ними небезпечних явищ.
2. Чисельні дослідження сильних та тривалих опадів.
3. Дослідження та параметризація мікрофізики хмар.
4. Розроблення та вдосконалення супутникових методів оцінки параметрів хмар та опадів.
5. Аналіз даних спостережень за хмарами, опадами і термодинамічним станом атмосфери з метою вдосконалення прогнозів погоди (особливо небезпечних явищ) та вдосконалення чисельних моделей.
6. Дослідження конвективних хмар за допомогою радіолокаційних комплексів АКЗОПРІ та АНТИГРАД (спільно із Кримською воєнізованою протиградовою службою, до 2014 р.).
7. Розроблення та вдосконалення моделі атмосферного переносу домішок.
8. Активні впливи на хмари і тумани.
9. Зміни клімату та їх вплив на хмарний покрив.
10. Моделювання змін клімату, кліматичні проєкції.
11. Адаптація для території України сучасних іноземних чисельних мезомасштабних моделей прогнозу погоди (WRF ARW, WRF NMM, ETA та COSMO).

Наразі відділ має у своєму складі кілька дослідницьких груп, які працюють у наступних напрямках:

1. Моделювання та аналіз фізичних характеристик, процесів та явищ природного та техногенного походження в атмосфері.
2. Мезо- та мікροструктура хмарних систем і пов'язаних із ними опадів.
3. Чисельний прогноз погоди та міждисциплінарні дослідження, орієнтовані на вирішення прикладних задач у галузі гідрології, морської гідрометеорології, екології тощо (спільно із іншими науковими підрозділами УкрГМІ).
4. Мезомасштабні дифузійні процеси в атмосфері та формування забруднення атмосферного повітря промисловими об'єктами.
5. Гомогенізація даних метеорологічних спостережень.

У відділі діють дві наукові школи, засновані доктором фіз.-мат. наук В.М. Волощуком та доктором фіз.-мат. Г.М. Пірнач.

Кожен із перерахованих вище напрямів відзначився отриманням нових наукових та/або прикладних результатів.

Під науковим керівництвом доктора фіз.-мат. наук Пірнач Г.М. було проаналізовано синоптичні умови утворення небезпечно сильних опадів із фронтальних хмарних систем на території України. Побудовано стаціонарні моделі і нестаціонарні чисельні моделі літніх хмарних утворень різних масштабів в їх взаємозв'язку для синоптичних ситуацій, що призводили до небезпечних атмосферних явищ, перш за все небезпечно сильних опадів у літній період, пов'язаних із циклонами, які переміщувалися територією Західної Європи та України. Розроблено методику дослідження сильних та катастрофічних опадів на території України за допомогою чисельних моделей хмарних утворень різних масштабів [1–8]. Проведено комплексне дослідження (чисельне моделювання та аналіз даних спостережень) еволюції систем шаруватоподібних та конвективних хмар і пов'язаних із ними небезпечних явищ на території Криму, яке полягає у побудові діагностичних та прогностичних моделей систем шаруватоподібних та купчастих хмар конкретних атмосферних фронтів та пов'язаних із ними атмосферних явищ, а також експериментальному дослідженні параметрів

конвективних хмарних систем [9–10]. За допомогою чисельних мікрофізичних моделей досліджуються процеси льодоутворення та розробляються нові підходи до їх параметризації [11, 12].

За допомогою архівних даних радіолокаційних спостережень, які проводилися у попередні роки на Експериментальному метеорологічному полігоні, О.Н. Сухінським, М.М. Акімовим та ін. було проведено дослідження фізики мезозон фронтальних хмар і запропоновано комплексну методику кількісного короткострокового прогнозу мезозон сильних опадів для степової частини України.

Під науковим керівництвом Б.Н. Лескова проводилися радіолокаційні дослідження конвективних хмар на Кримському протиградовому полігоні [16]. Отримано нові дані щодо обертання хмар навколо вертикальної осі та динаміки змін об'єму хмар. Б.Н. Лесковим було показано існування і розпочато дослідження конвективних хмар, розвиток яких носить вибуховий характер.

Під науковим керівництвом В.П. Баханова та О.А. Кривобока (зав. лабораторії супутникових досліджень) було розроблено методику моніторингу опадів за даними радіометрів геостационарних супутників та наземних радіолокаторів. Було виконано оцінку точності середньої інтенсивності опадів із літніх конвективних хмар за даними радіометра SEVIRI геостационарного супутника MSG за умови рідкої мережі підтримуючих радарів. Відтворені з використанням розробленої методики інтенсивності опадів мають відносно розходження із радарними, яке не перевищує 18%.

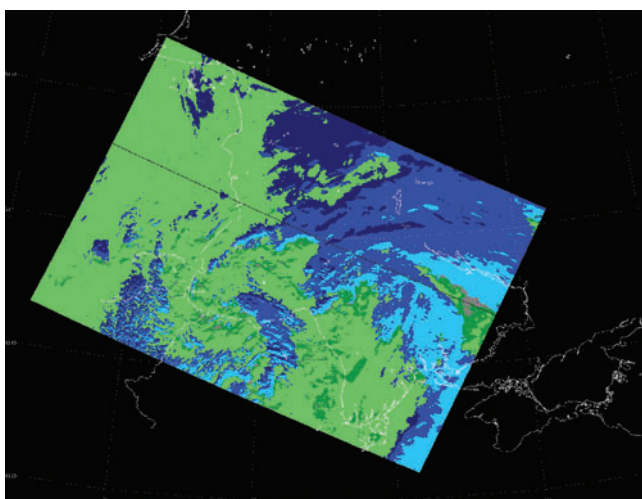
Під науковим керівництвом доктора фіз.-мат. наук В.А. Прусова розроблено низку параметризації процесів підсіткового масштабу, які було включено у вітчизняну регіональну гідродинаміч-

ну модель прогнозу погоди. У 2006 р. рішенням Центральної методичної комісії Державної гідрометеорологічної служби України модель прогнозу погоди для території України була рекомендована до впровадження у підрозділах Гідрометеорологічного центру України.

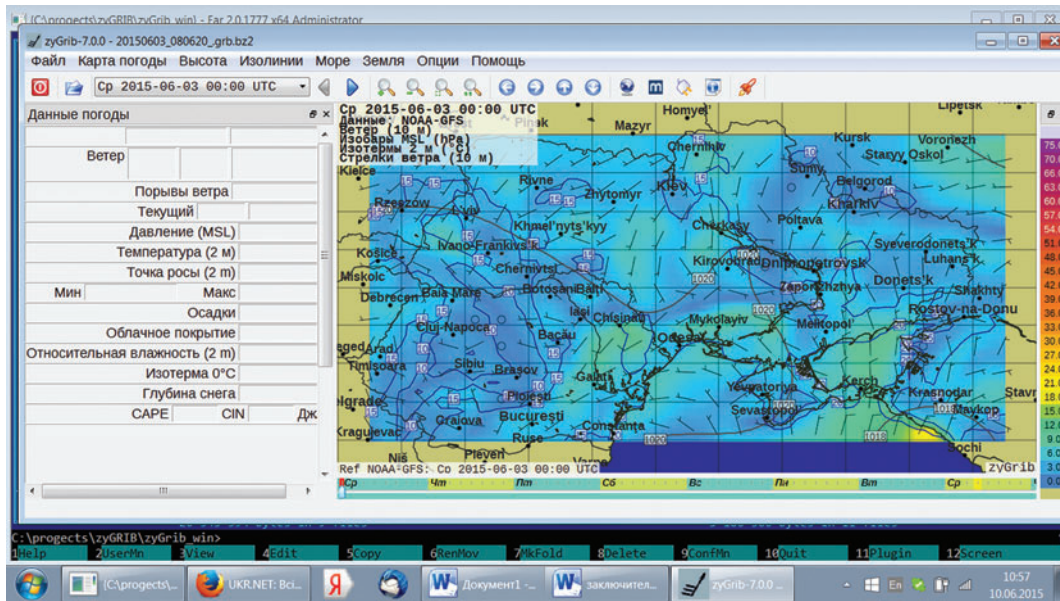
У відділі вдосконалюються існуючі і створюються нові чисельні методи обчислювальної математики. Так, було запропоновано метод розв'язання рівняння конвективної дифузії, що враховує особливості реалізації моделі циркуляції атмосфери, поєднує в собі переваги явних і неявних методів. Суть побудови методу полягає у рознесенні на різні часові шари різниць за і проти потоку в апроксимаціях як першої так і другої просторових похідних. Таким чином, по суті, неявна схема обчислюється послідовно крок за кроком, так званім "явним рахунком". При цьому різниці проти потоку на верхньому часовому шарі не дають паразитним хвилям викривляти чисельний розв'язок. Структурна особливість методу робить його нечутливим до зміни типу рівняння під час розв'язання задачі. Побудовано алгоритм реалізації методу у випадку зміни знаку швидкості конвекції всередині розрахункової області. Проблема нелінійності розв'язується методом лінеаризації рівняння на верхньому шарі, так як параметри конвекції і дифузії беруться на попередньому часовому шарі. Було запропоновано нову схему інтерполяції (на етапі підготовки даних для подальших розрахунків за атмосферою моделлю) із вузлів макромасштабної сітки у вузли регіональної з предісторією у трьох вузлах. В.А. Прусов разом зі своїми учнями канд. фіз.-мат. наук Р.І. Чернишом та канд. фіз.-мат. наук Л.М. Кацаловою (Гук) модифікували адитивно-усереднений метод (МАУМ) для випадку змінних коефіцієнтів багатовимірних рівнянь конвективної дифузії, який призначений для чисельного розв'язання останніх і був реалізований для архітектури відеографічного прискорювача та багатопроекторної системи із спільною пам'яттю засобами CUDA та OpenMP відповідно [17–22].

За архівними даними аерологічних зондувань було уточнено чисельні значення коефіцієнтів, які входять у рівняння напівемпіричних моделей природних процесів підсіткового масштабу з урахуванням рельєфу на основі гідродинамічної моделі вертикального стовпа атмосфери. Показано добру узгодженість розрахованих значень метеорологічних величин із даними радіозондування в пограничному шарі атмосфери.

Проведено ґрунтовне кліматологічне дослідження ресурсів хмар, придатних для штучного збільшення опадів, над територією України. Визначено регіони, які є найбільш перспективні для виробни-



Відтворені значення хмарної відбиваності у каналі 0,6 мкм (29.12.2002, 09:46 GMT)

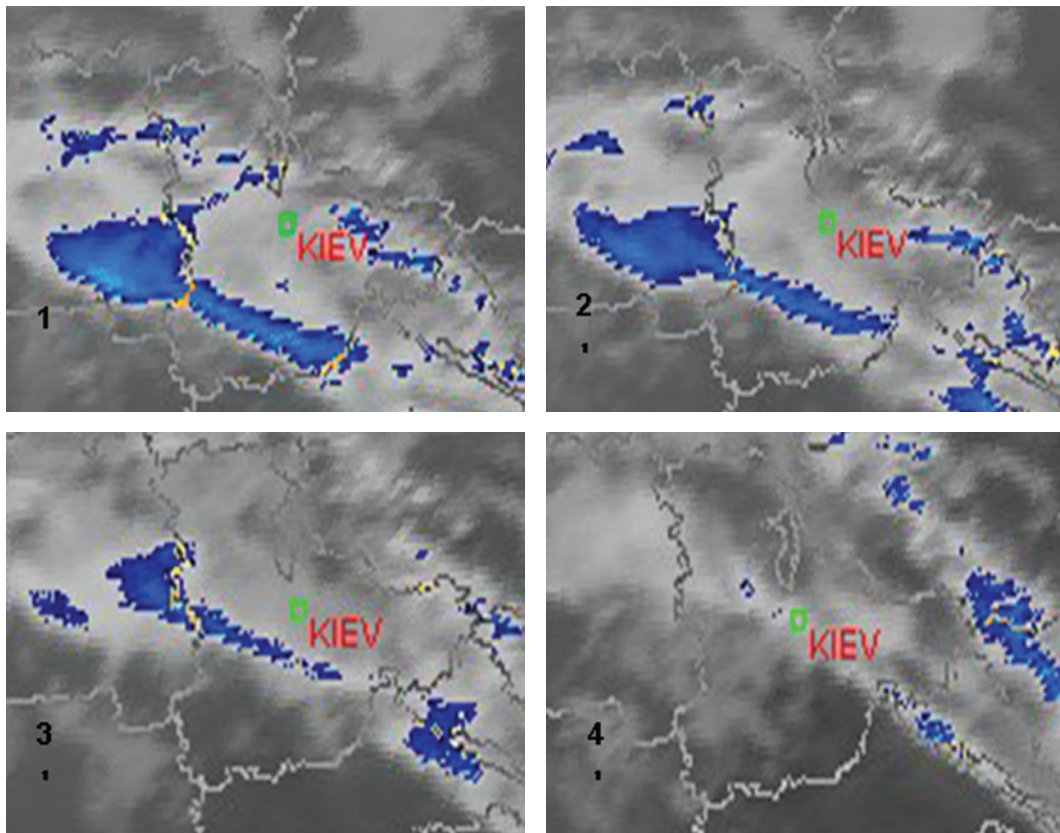


Приземна карти погоди для території України, отримана за чисельною регіональною моделлю прогнозу погоди УкрГМІ

чого збільшення опадів у холодний період року [23]. Виконано дослідження ресурсів хмар холодного періоду року для розрахунку можливої кількості додаткових опадів при активних впливах у трьох

областях України (Одеська, Миколаївська і Херсонська) [24–26].

Після шістнадцятирічної перерви, у травні 2010 р. в Україні було відновлено роботи з регулювання



Дані супутникових спостережень за трансформацією системи хмар, що перемішувались на м. Київ 9 травня 2010 р. і були піддані активному впливу за допомогою спеціально обладнаних літаків. Час спостережень: 1 — 08:05; 2 — 08:35; 3 — 09:50; 4 — 11:05.



Учасники робіт з активних впливів 09.05.2012 після виконання поставленого завдання.

Серед військових льотчиків у другому ряду стоять: провідний науковець Б.Н. Лесков (четвертий зліва), директор УкрГМІ В.І. Осадчий (п'ятий зліва), завідувач відділу фізики атмосфери В.М. Шпиг (перший справа)

опадів. Спільно з військовими льотчиками Повітряних сил Збройних Сил України фахівці відділу брали участь у роботах щодо забезпечення бездошової погоди під час проведення урочистих і святкових заходів впродовж 2010–2017 років.

Протягом останніх років можна відзначити поступовий перехід від теоретичних досліджень, проведення й аналізу лабораторних і натурних експериментів до аналізу різнорідних за способом отримання (безпосереднє та дистанційне) даних спостережень та моделювання із науково-прикладним спрямуванням. Під впливом реалій, що постають перед українською державою, суспільством та вітчизняною наукою, трансформується й фокус досліджень окремих науковців і відділу в цілому. Так, у контексті кліматичних змін на планеті було визначено динаміку, особливості та значимість кліматичних змін кількісних показників хмарного покриття для території України у період глобального потепління [27–33].

### НАУКОВА ШКОЛА ДОКТОРА ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНИХ НАУК Г.М. ПІРНАЧ

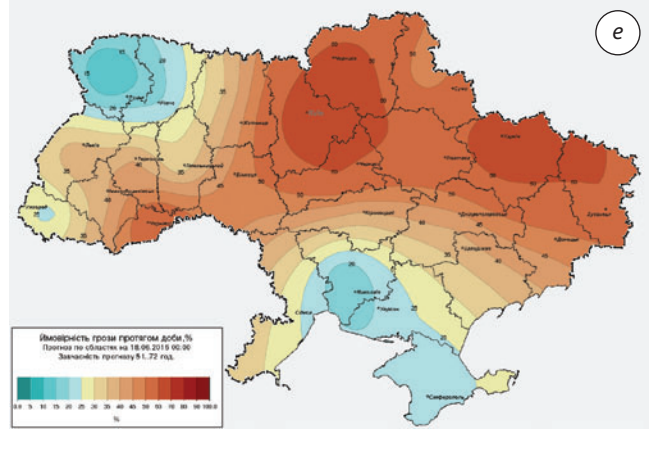
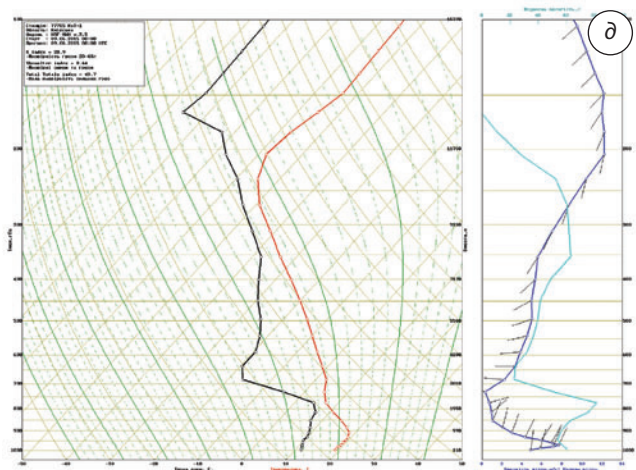
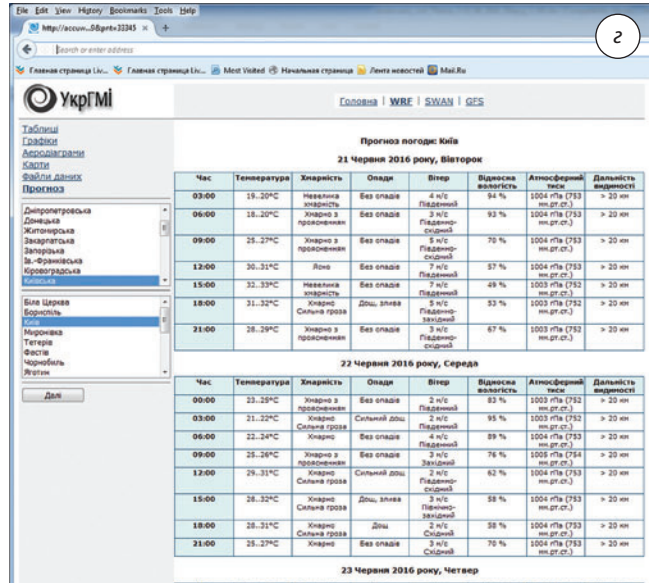
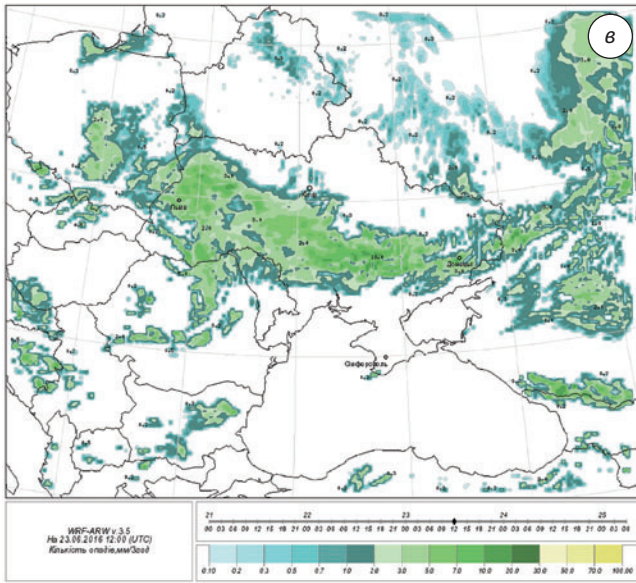
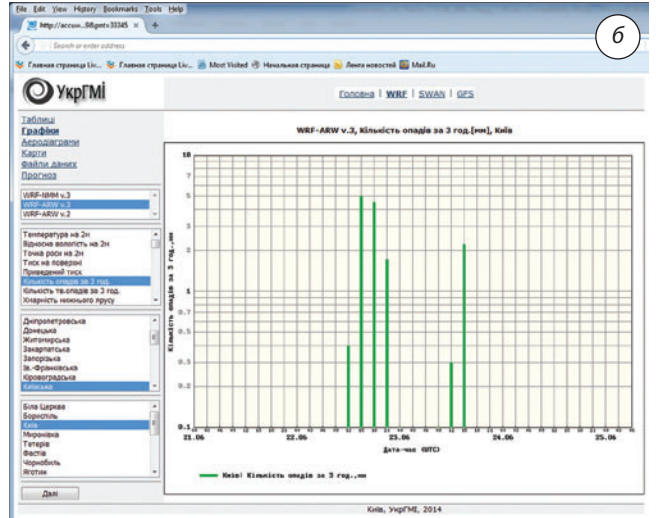
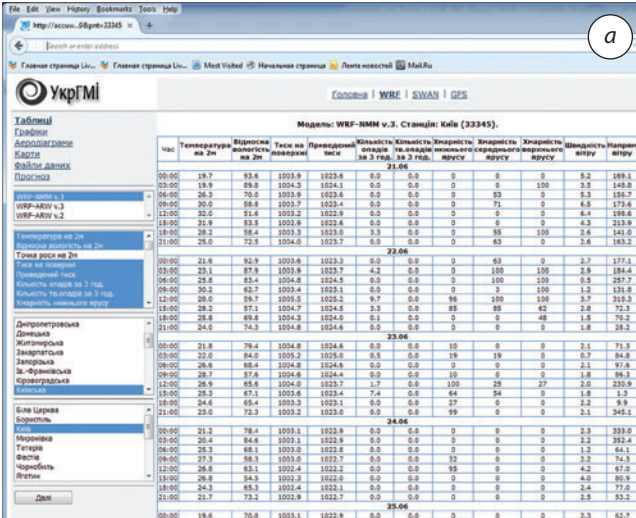
**Ганна Михайлівна ПІРНАЧ** (18.10.1937 — 23.01.2012) — відомий вчений у галузі фізики хмар. За освітою математик. Спочатку працювала шкільним вчителем математики. У 1964 р. Пірнач Г.М. прийшла до УкрГМІ ДСНС України та НАН України (у той час — УкрНДГМІ), де працювала в колективах видатних вчених радянського періоду: спочатку А.І. Ромова, а потім — М.В. Буйкова. Саме в лабораторії М.В. Буйкова розвилися здібності Г.М. Пірнач

не тільки як програміста високої кваліфікації, але й як теоретика, дослідника (за допомогою мікрофізичних моделей) процесів утворення та еволюції рідкокрапельних та змішаних хмар, пов'язаних із атмосферними фронтами, а також формування в них опадів.

Г.М. Пірнач відома на пострадянському просторі та у багатьох європейських країнах, Ізраїлі та США своїми дослідженнями взаємодії динамічних, термодинамічних і мікрофізичних параметрів фронтальних хмар. Вона стала автором та ідеологом низки одно-, дво- та тривимірних чисельних моделей хмарності атмосферних фронтів з детальною мікрофізикою. За їх допомогою було досліджено еволюцію хмарності на фронтах різних типів, вплив різних мікрофізичних механізмів на опадоутворення у фронтальних хмарах, проведено пошук можливостей розширення діапазону придатності хмар до штучного збільшення опадів у холодний період року. С.В. Краковська, Л.В. Паламарчук та В.М. Шпиг — її учні, які нині працюють в УкрГМІ.

Збільшення числа стихійних і небезпечних атмосферних явищ спонукало до розробки впродовж 2001–2015 рр. нестационарних чисельних моделей фронтальної хмарності (у тому числі конвективної) для літнього періоду із врахуванням орографії місцевості та різним ступенем врахування мікрофізичних процесів [5, 34]. У цей період вивчаються смерчі та вплив вертикального електричного поля на ефективність зіткнення заряджених крапель, як одного із механізмів різкого збільшення опадів [9, 10, 34]. У ході цих досліджень було показано наступне: 1) зі збільшенням потужності конвективної хмари, як правило, збільшується його електрична неоднорідність; 2) можливість швидкого утворення зародків опадів внаслідок коагуляційних процесів і взаємодії заряджених крапель в сильних електричних полях в хмарі; 3) врахування електричної коагуляції призводить до перерозподілу хмарних частинок та збільшення значень водності конвективних хмар.

Бурхливий розвиток чисельного прогнозування погоди у світі призвів до необхідності переймання вітчизняними фахівцями найсучаснішого зарубіжного досвіду та якомога швидшого впровадження результатів в практичній площині. Починаючи з 2007 р., в УкрГМІ було створено групу вчених, які розпочали роботи з адаптації чисельної мезомасштабної атмосферної моделі WRF (ARW/NMM) та ETA для території України (від відділу фізики атмосфери до неї увійшли Будак І.В. та Шпиг В.М.). Вже у лютому 2008 р. було введено в експлуатацію модель WRF ARW v. 2.2.1 і створено веб-сайт. Моделі WRF зарекомендували себе надійним джерелом прогностичної метеорологічної інформації високої точності [35–38].



Дизайн та способи представлення чисельних прогнозів погоди на веб-сайті УкрГМІ ДСНС України та НАН України (<http://accuweather.org.ua/>):

а — прогноз метеорологічних елементів по пунктах у вигляді таблиць; б — прогноз метеорологічних елементів по пунктах у вигляді гістограм та графіків (на рисунку приведено прогноз опадів за фрейм [мм/3 год]); в — прогноз метеорологічних елементів по території у вигляді карт; г — семантична інтерпретація прогнозів метеорологічних елементів; д — прогностична аерологічна діаграма (ліворуч) та вертикальні профілі швидкості та напрямку вітру (праворуч) у межах тропосфери/стратосфери; е — імовірність грози по областях

Одним із важливих питань в задачах чисельного прогнозування погоди є коректне представлення обчислених у вузлах сітки атмосферної моделі результатів в наперед заданих точках (метеостанції, населені пункти, важливі інфраструктурні об'єкти тощо). На етапі постмодельної обробки даних прогнозу погоди було запропоновано використання методу крігінг-інтерполяції і розроблено відповідний алгоритм методу. На прикладі європейської регіональної моделі COSMO обґрунтовано доцільність його використання при розв'язанні задач прогнозу погоди [39–42].

Дослідницькою групою Шпиґа В.М. було показано природу помилок прогнозів грози, створених на основі відомого і загальноприйнятого у метеорологічній спільноті індексу нестійкості LI (Lifted Index), доведено, що розподіли цього індексу “з грозою” і “без грози” мало залежать від типу і просторової роздільності чисельної моделі прогнозу погоди. На основі цих досліджень уточнено значення індексів нестійкості для факту наявності/відсутності грози та створено систему прогнозування ймовірності грози (див. рис. 11е) для території України [43–47].

Моделі WRF стали основою для створення низки програмно-моделюючих комплексів короткострокового прогнозування паводків для річкових басейнів (зокрема, р. Дністер, р. Західний Буг, р. Прип'ять, р. Тиса та ін.), а також системи прогнозу морського хвилювання в басейнах Азовського та Чорного морів, у розробці яких від відділу фізики атмосфери брали участь І.В. Будак та В.М. Шпиґ.

Іншим напрямом діяльності і застосування знань представників наукової школи Г.М. Пірнач стало моделювання та тестування схем мікрофізичних процесів у кліматичних моделях, який, зрештою, перейшов у нову якість — кліматичні проєкції та їх аналіз, що в УкрГМІ пов'язано, перш за все, з роботами Краковської С.В. та Паламарчук Л.В.

У рамках комплексних наукових тем, які виконувалися на замовлення НАН України, та гранту INTAS Ref.Nr 04-83-3351 “Detailed spectral parameterization of mixed cloud microphysics in weather forecast models” з партнерами із відділу регіональних моделей клімату Інституту Макса-Планка з метеорології (м. Гамбург) та з лабораторії інструментальних та експериментальних досліджень мікрофізики аерозолів та хмар Національного центру з метеорологічних досліджень (м. Тулуза) Краковською С.В. було проведено серію чисельних експериментів з оцінки параметризацій швидкостей автоконверсій, акреції та седиментації, що використовуються в регіональних моделях, а також розрахунки цих же швидкостей з отриманих спектрів часток хмар та опадів в Комбінованій Моделі Хмарної Тропосфери (КМХТ),

котра була розроблена в Українському гідрометеорологічному інституті. Було запропоновано нові нелінійні формулювання для параметризації швидкостей седиментації хмарних часток, концентрації крапель та водності для застосування в регіональних та інших моделях з узагальненою мікрофізикою. Також у рамках цього гранту було розроблено та випробувано методику спільного використання регіональної кліматичної моделі REMO (МПІ-М, м. Гамбург), КМХТ та 1-вимірної спектральної мікрофізичної моделі хмари (розроблена в УкрГМІ) у дослідженні сильних та тривалих опадів. Вперше ця методика застосована для моделювання випадків катастрофічних опадів, що спричинили повені в Західній Європі в 2002 р. та в Карпатах в 1998 та 2003 рр. При моделюванні за допомогою REMO та КМХТ було отримано близькі до експериментальних спостережень розподіли у просторі опадів та їх максимумів. Спектральна 1-вимірна мікрофізична модель хмари ініційована вихідними даними з REMO продемонструвала здатність коректно відтворювати часовий хід та кількість опадів у пункті [48–50].

Групою дослідників відділу фізики атмосфери під керівництвом Краковської С.В. вперше в Україні кількісно визначено можливі зміни клімату в XXI столітті для території України із застосуванням ансамблю з 10 сучасних моделей загальної циркуляції атмосфери та океанів (МЗЦАО) на основі трьох сценаріїв викидів парникових газів та аерозолів: B1, A1B та A2. Проаналізовано середньорічні, сезонні та щомісячні основні кліматичні характеристики (приземна температура повітря та кількість опадів). У 2009 р. результати цих досліджень увійшли у П'яте Національне Повідомлення України з питань зміни клімату. З метою уточнення проєкцій можливих кліматичних змін в Україні протягом XXI ст. цією ж групою науковців було залучено результати моделювань декількох регіональних кліматичних моделей (PKM) з європейського проєкту ENSEMBLES (Ensembles-Based Predictions of Climate Changes and Their Impacts), котрі були розраховані з різними МЗЦАО. Проведена їх верифікація на минулому та сучасному кліматі для різних регіонів України й отримано, що оптимальною PKM є модель REMO, розрахована з початковими та граничними умовами з ECHAM5/MPI-OM, обидві моделі розроблені в Інституті метеорології Макса-Планка, м. Гамбург [51–55].

**НАУКОВА ШКОЛА  
ДОКТОРА ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНИХ НАУК,  
ПРОФЕСОРА В.М. ВОЛОЩУКА**

**Володимир Михайлович ВОЛОЩУК**  
(02.04.1938–12.04.2021) — вчений геофізик із світо-

вим ім'ям. За освітою — фізик-теоретик (випускник кафедри теоретичної фізики Львівського національного університету імені Івана Франка). Його вирізняли надзвичайна глибина знань з різних розділів фізики, математики, метеорології і кліматології та виняткова інтуїція, яка допомагала знаходити шляхи (часто — не стандартні) до вирішення складних наукових проблем та задач. Професора Волощука вирізняв також і непересічний педагогічний талант, свідченням чого є його учні, послідовники та студенти.

Ранній період наукової діяльності В.М. Волощука був зосереджений на вирішенні фундаментальних проблем фізики атмосферних дисперсних систем — тематики, яка тісно поєднана із фізикою хмар. Основними напрямками цього періоду були гідродинаміка грубо дисперсних аерозолів та кінетика коагуляційних процесів в аеродисперсних системах. У кожному із напрямів було отримано фундаментальні результати, узагальнені у вигляді монографій (Волощук, 1971; Волощук и Седунов, 1975; Волощук, 1984), які пізніше стали класичними для цілого покоління науковців — дослідників атмосферних аерозолів.

Після аварії на Чорнобильській атомній електростанції (ЧАЕС), увага наукової спільноти була прикута до вивчення її наслідків для навколишнього середовища та громадського здоров'я. У цьому контексті, гостро постала проблема щодо коректного фізико-математичного моделювання та прогнозування атмосферного перенесення, дисперсії (турбулентної дифузії), фізико-хімічної трансформації аерозольних частинок (в тому числі і радіоактивних) і їх сухого та вологого вимивання з атмосфери на значних просторово-часових масштабах. Волощуком В.М. було отримано ряд аналітичних розв'язків дифузійних задач, які описували розсіювання газо-аерозольних домішок у граничному шарі атмосфери при реальних профілях метеорологічних величин (напр., Волощук, 1991; Волощук и др., 1992). Ним було сформульовано ряд глибоких фізичних гіпотез, щодо деяких особливостей процесів атмосферної (турбулентної) дифузії та можливості їх адекватного врахування у відповідних математичних моделях та параметризаціях (Voloshchuk and Shkvorets, 1993; Волощук и Скриник, 2002).

З кінця 80-х років минулого століття, метеорологи та кліматологи приділяють все більше уваги сучасним кліматичним змінам, їх фізичному обґрунтуванню, регіональним проявам та можливим наслідкам. Дослідження Волощука В.М. і його учнів у цьому напрямі зосереджені на вивченні фізичних основ теорії клімату та на виявленні та кількісній оцінці трансформації кліматичних умов України, та їх потенційних наслідків (Волощук та ін., 2002).

В Українському гідрометеорологічному інституті основними напрямками досліджень наукової школи професора Волощука залишаються: вивчення, параметризація та моделювання процесів атмосферної (турбулентної) дифузії газо-аерозольних домішок, їх фізико-хімічних перетворень; фізичні основи теорії клімату, включаючи дослідження регіональних особливостей сучасних кліматичних трансформацій в Україні під впливом глобальних змін.

Невід'ємною складовою частиною наукової школи професора Волощука є дослідницька група кандидата фізико-математичних наук, старшого наукового співробітника О.Я. Скриника (О.Я. Скриник, О.А. Скриник, Д.О. Ошурок, В.П. Сіденко, Д.О. Бойчук).

Одним із основних напрямів наукових досліджень, які проводяться групою, є вивчення фізичних механізмів формування просторово неоднорідного (плямистого) забруднення місцевості аерозольними домішками (в тому числі і радіоактивними) на регіональному просторовому масштабі. Початковим стимулом для цих досліджень була необхідність встановлення та наукового обґрунтування причин формування локальних максимумів поверхневого забруднення території України радіоактивними радіонуклідами (такими як  $^{137}\text{Cs}$ ), що потрапили в атмосферу під час Чорнобильської катастрофи. Мова йде про вторинні (віддалені на значні відстані від джерела викиду) максимуми забруднення. Не зважаючи на значний проміжок часу, що минув після аварії на ЧАЕС, дослідження особливостей перенесення, дисперсії та осідання радіоактивних аерозолів на регіональних просторових масштабах залишається актуальною задачею. Це пов'язано із надзвичайною складністю фізичних процесів широкого спектру просторово-часових масштабів, які необхідно враховувати при дослідженні/моделюванні. Крім того, на превеликий жаль, час від часу трапляються інші катастрофи техногенного характеру, як, наприклад, аварія на японській атомній електростанції у місті Фукусіма, які реактивують увагу світової наукової спільноти до зазначеної тематики, та до проблеми адекватного розрахунку та кількісного прогнозування перенесення та дисперсії газо-аерозольних домішок на регіональному та глобальному просторових масштабах.

Для проведення таких досліджень групою використовується широкий спектр методів та підходів: починаючи з аналітичних методів отримання розв'язку спрощених задач атмосферної дифузії в граничному шарі атмосфери (Скриник, 2010; Скриник, 2012), та закінчуючи використанням складних комп'ютерних моделювальних систем атмосферної дисперсії, таких як CALMET/CALPUFF та HYSPLIT

(Giaiotti et al., 2018; Skrynyk et al., 2019). Використання аналітичних методів поряд із сучасними добре апробованими моделювальними системами дозволило глибше проникнути у розуміння фізичних процесів, які були відповідальними за формування регіонального радіоактивного забруднення місцевості під час активної фази Чорнобильської катастрофи (Giaiotti et al., 2018; Skrynyk et al., 2019). Обґрунтовано потенційну можливість формування локальних вторинних максимумів поверхневого забруднення без участі вологого вимивання радіоактивного аерозолу атмосферними опадами, яке вважається основною причиною плямистості. Іншим не тривіальним фізичним механізмом може бути періодична зміна (добовий чи синоптичний хід) інтенсивності вертикального турбулентного перемішування в граничному шарі атмосфери, яка в географічних умовах України найбільш чітко проявляється у весняно-літній період (Волощук та ін., 2007; Скриник та Грицюк, 2007; Skrynyk et al., 2009).

Перспективним напрямом досліджень, пов'язаних із атмосферою дисперсією і які зараз активно здійснюються групою, є також моделювання якості атмосферного повітря в межах великих міст чи індустріальних центрів (таких як Київ, Кривий Ріг та ін.) (Bezyk et al., 2021).

Важливим напрямом наукових досліджень групи є оцінювання вітроенергетичних ресурсів України в умовах сучасного клімату (Осадчий та ін., 2015). Проведення оцінювання було здійснено на основі використання емпіричної інформації (строкових даних метеорологічних вимірів на 204 станціях моніторингової мережі за період з 1981 по 2010 рр.), даних реаналізу ERA-Interim та із залученням мезомасштабної діагностичної метеорологічної моделі CALMET, яка є метеорологічним препроцесором дисперсійної моделі CALPUFF (Осадчий та ін., 2017; Ошурок та Скриник, 2019). Поєднання найбільш повного масиву емпіричної метеорологічної інформації з даними реаналізу та із сучасним спеціалізованим метеорологічним програмним забезпеченням дозволило отримати достатньо точні оцінки просторового розподілу вітроенергетичного потенціалу на території України з горизонтальним кроком розрахункової сітки 2,5 км на висотах у приземному шарі атмосфери, які є найбільш важливими з точки зору вітроенергетики. Вагомим результатом проведених досліджень цього напрямку є створення електронного Атласу сучасного стану вітроенергетичних ресурсів України, який може слугувати основою для розробки кліматичного сервісу відповідного спрямування, що є надзвичайно важливим в епоху активної декарбонізації економіки країни. Продов-

ження досліджень по оцінюванню вітроенергетичних ресурсів, яке планується здійснити у групі, буде включати оновлення отриманих оцінок за рахунок залучення емпіричної метеорологічної інформації за останнє десятиріччя та використання складніших моделювальних систем для розрахунку вітрових потоків в умовах складної орографії (наприклад, прогностичної регіональної метеорологічної моделі WRF ARW).

Сучасні швидкі зміни глобального клімату та їх регіональні прояви, які встановлені в основному на основі аналізу рядів даних інструментальних гідрометеорологічних спостережень, змусили наукову спільноту прискіпливіше подивитись на використання емпіричну метеорологічну інформацію та її якість. Річ у тім, що зазвичай ряди даних спостережень містять не тільки інформацію про клімат, але також і про умови за яких ці дані було отримано (оточуюче середовище, використовувані методики, прилади тощо). У цьому контексті, групою проводяться дослідження щодо виявлення та вилучення кліматологічної неоднорідності (станційних сигналів) у рядах основних метеорологічних/ кліматологічних величин, таких як температура повітря та кількості атмосферних опадів, отриманих на території України. Виявлення можливих точок розриву та розрахунок величини/амплітуди відповідного зсуву здійснюється із використанням сучасних алгоритмів та програмних забезпечень, таких як Homer, MASH, Climatol та ін. (Осадчий та ін., 2017; Osadchyi et al., 2018; Skrynyk et al., 2019; Skrynyk et al., 2021a). Крім того, групою проводиться робота із врятування історичних даних найраніших (XIX ст.) інструментальних строкових метеорологічних спостережень, проведених на території сучасної України, та їх цифровізації з метою подальшого аналізу та використання (наприклад, для створення історичних реаналізів чи реконструкцій) (Skrynyk et al., 2021b).

### КНИЖКОВІ ВИДАННЯ ЗА УЧАСТІ ФАХІВЦІВ ВІДДІЛУ ФІЗИКИ АТМОСФЕРИ

Фахівці відділу виступили авторами та співавторами відомих у своїх напрямках монографій:

- Клімат України / За ред. В.М. Ліпінського, В.А. Дячука, В.М. Бабіченко. Український науково-дослідний гідрометеорологічний інститут. К.: Вид-во Раєвського. 2003. 344 с.
- Силаєв А.В., Баханов В.П., Баханова Р.А. та ін. Проблема фізики хмар і активних впливів на метеорологічні процеси. К.: Наукова Думка. 2004. 352 с.
- Прусов В.А., Дорошенко А.Ю. Фізичні і математичні моделі, чисельні методи аналізу і прогнозу природних та техногенних процесів в атмосфері.



- Український науково-дослідний гідрометеорологічний інститут. Інститут програмних систем НАН України. К.: Наукова думка. 2006. 542 с.
- Стихійні метеорологічні явища на території України за останнє двадцятиріччя (1986–2005 рр.). / За ред. В.М. Ліпінського, В.І. Осадчого, В.М. Бабіченко. Український науково-дослідний гідрометеорологічний інститут. Державна гідрометеорологічна служба. К.: Ніка-Центр. 2006. 312 с.
  - Пірнач Г.М. Чисельне моделювання хмар та опадів у системах атмосферних фронтів. Український науково-дослідний гідрометеорологічний інститут. Київ: Ніка-Центр. 2008. 295 с.
  - Силаєв А.В. Популярна метеорологія. К: Ніка-Центр. 2010. 304 с.
  - Клімат Києва / За ред. В.І. Осадчого, О.О. Косовця, В.М. Бабіченко. Український науково-дослідний гідрометеорологічний інститут. Центральна геофізична обсерваторія. К: Ніка-Центр. 2010. 320 с.
  - Дати переходу температури повітря в Україні за сучасних умов клімату (колективна монографія) / За ред. В.І. Осадчого, В.М. Бабіченко. Київ: Ніка-Центр. 2010. 304 с.
  - Осадчий В.І., Бабіченко В.М., Набиванець Ю.Б., Скриник О.Я. Динаміка температури повітря в Україні. Київ: Ніка-Центр. 2013. 308 с.
  - Prusov V. A., Doroshenko A. Y. Hydrodynamic Modeling of Industrial Pollutants Spreading in Atmosphere. *Mathematical Problems in Meteorological Modelling* / Editors: András Bátkai, Petra Csomós, István Faragó, András Horányi, Gabriella Szépszó. 2016. 87–116 pp.
  - Prusov V., Doroshenko A. *Computational Techniques for Modeling Atmospheric Processes*. Hershey, USA: IGI Global. 2017. 460 p.
  - Прусов В.А., Сніжко С.І. *Методи прикладного системного аналізу в гідрометеорології*. К.: Прінт-Сервіс. 2017. 703 с.
  - Краковська С.В., Паламарчук Л.В. *Регіональні зміни клімату України*. К.: Прінт-Сервіс. 2018. 90 с.
  - Doroshenko A., Shpyg V., Budak I., Huda K. *Numerical atmospheric models and their application in different areas of economics. Ukraine in the context of global and national modern servisation processes and digital economy* / Edited by Kvasniy L. and Tatomyr I. Praha: Oktan Print. 2020. P. 155–171.

### МІЖНАРОДНЕ НАУКОВЕ СПІВРОБІТНИЦТВО

Протягом 2004–2008 рр. фахівці відділу фізики атмосфери брали участь у виконанні міжнародних наукових досліджень у рамках проекту NATO ENVIR. CLG 930449, а також в організації та проведенні спільних EUMETSAT (Європейська організація з та

УкрНДГМІ семінарів-тренінгів для представників гідрометслужб країн СНД у 2003 та 2009 роках, були постійними доповідачами на щорічних конференціях з супутникової метеорології EUMETSAT.

В.П. Баханов, С.В. Краковська та В.М. Шпиг до 2014 р. були членами робочих груп Ради з гідрометеорології країн СНД, які діяли на постійній основі.

Б.А. Дорман та С.В. Краковська отримували гранти наукових установ Європейського Союзу на проведення досліджень в області моделювання мікрофізичних процесів хмарах шаруватих форм.

Впродовж 2012–2015 рр. було підписано дві угоди про співробітництво в області чисельного мезомасштабного моделювання між Німецькою службою погоди (DWD) та УкрГМІ ДСНС України та НАН України. У 2016 р. дію угоди було пролонговано ще на один рік. У межах дії даних угод проводилося тестування різних версій моделі COSMO, виконувалося дослідження щодо точності прогнозу температури та опадів моделлю COSMO у прибережних та гірських районах та постмодельної обробки прогностичних даних. Фінансування робіт не було, проте на період дії договору УкрГМІ ДСНС України та НАН України безкоштовно отримав ліцензію на використання моделі COSMO та вхідних даних німецької глобальної моделі прогнозу погоди GME для обчислення оперативних прогнозів для території України, які проводилися впродовж 2012–2016 рр.

Дослідницька група кандидата фізико-математичних наук, старшого наукового співробітника О.Я. Скриника проводить дослідження у тісній співпраці із провідними вченими та експертами ряду іноземних університетів та наукових центрів: Регіонального центру моделювання оточуючого середовища (Пальманова, Італія) Університет Ровіра і Віргілі (Тарагона, Іспанія), Університет Юстуса Лейбіга (Гіссен, Німеччина), Університет Назарбаєва (Нур-Султан, Казахстан).

О.Я. Скриник виступає рецензентом рукописів статей для журналу "International Journal of Climatology".

В.М. Шпиг з 2013 р. є експертом Комісії з атмосферних наук Всесвітньої метеорологічної організації.

### ЗАХИСТ ДИСЕРТАЦІЙ

Впродовж 2001–2020 років у відділі фізики атмосфери отримали наукові ступені:

1. Чотири кандидати фізико-математичних наук — С.В. Краковська, О.Я. Скриник, Л.М. Кацалова (Гук) та Р.І. Черниш.
2. Три кандидати географічних наук — В.М. Шпиг, Н.В. Гнатюк, Д.О. Ошурок.

## ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ ДІЯЛЬНОСТІ

**Найближча (3–5 років) перспектива.** Протягом останніх десятиліть чисельні моделі прогнозу погоди утвердилися як високоефективний засіб в повсякденній оперативній практиці прогностичних центрів багатьох країн світу. Їх використання значно прискорює та спрощує процес створення різноманітної інформації для широкого кола користувачів, котрий до того ж не залежить від самопочуття прогнозіста (синоптика). Точність таких моделей, як правило, перевищує точність синоптичних прогнозів, особливо, якщо мова йде про їх просторово-часову дискретизацію. Не зважаючи на всі переваги чисельних моделей, їх створення та експлуатація несе в собі і певні труднощі, пов'язані із повнотою фізичних схем, спрощеннями та математичними методами, котрі в них використовуються, потребою в обчислювальних ресурсах та у разі використання емпіричних величин своєрідною територіально-географічною обмеженістю у використанні. Сьогодні удосконалення якості прогнозів відбувається у двох напрямках: поліпшення справджуваності прогнозу і збільшення його завчасності. Все більше уваги приділяється прямому прогнозуванню явищ. Наприклад, у моделі WRF з'явилася можливість безпосереднього обчислення електричних процесів у хмарах. Таким чином, впродовж найближчих п'яти років актуальним є продовження робіт з підвищення ступеня просторо-часової дискретизації чисельного прогнозу для території України та створення на їх основі нових систем прогнозування явищ, а також розроблення нових геосферних (об'єднаних) систем на основі чисельних атмосферних моделей (спільно із іншими науковими підрозділами УкрГМІ ДСНС України та НАН України) орієнтованих на вирішення міждисциплінарних проблем у галузі гідрології, морської гідрометеорології, екології тощо.

Довгі ряди кліматологічних показників зазвичай містять різкі зсуви східчастого характеру та/або плавні тренди, які не є наслідком змін клімату чи його мінливості. Їх виявлення та вилучення, тобто приведення рядів до однорідного стану, чи, іншими словами, гомогенізація, є важким завданням, оскільки в рядах кліматологічних даних завжди наявна інтенсивна шумова компонента, яка добре маскує будь-які регулярні зміни. За наявності детальної інформації про історію станцій та виконання паралельних вимірювань у "старих" і "нових" умовах можна було б точно оцінювати неоднорідності. Проте зазвичай історична інформація є доволі обмеженою та неповною, а паралельні вимірювання взагалі відсутні. Тому для гомогенізації здебільшого застосовують статистичні методи. Очевидно, що першим етапом проведення кліматологічних досліджень має бути перевірка на однорідність/неоднорідність емпіричних даних. Така перевірка є особливо важливою в разі досліджування чи оцінювання змін клімату і в найближчі роки залишається актуальною задачею як в Україні, так і за кордоном.

**Віддалена (10–20 років) перспектива.** В міру проведення реновації вітчизняної гідрометеорологічної системи, в першу чергу оновлення парку інструментальних засобів, та підвищення ступеня автоматизації обміну даними спостережень (безпосередньо від місця їх проведення до обчислювального центру) стане можливим перейти до реалізації асиміляції даних спостережень в чисельних моделях прогнозу погоди, розроблення системи оперативного реагування на аварійні викиди шкідливих домішок в атмосферу, дослідження мезомасштабних збурень та конвективних систем, діагнозу і прогнозу небезпечних та стихійних явищ, пов'язаних із конвективними хмарами, за даними метеорологічних супутників та радіолокаційних комплексів, інших технічних засобів та джерел даних дистанційного вимірювання та спостережень.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Пірнач А.М. Чисельне моделювання фронтальних смуг дощових хмар із затопленою конвекцією за умови різної інтенсивності механізмів утворення хмар та опадів. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 1999. Вип. 247. С. 5–16.
2. Пірнач А.М., Білокобильський А.В. Чисельне моделювання літніх фронтальних хмар. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2000. Вип. 248. С. 5–21.
3. Пірнач Г.М., Заблоцька Т.М., Підгурська В.М., Шпиталь Т.М. Чисельні та експериментальні дослідження фронтальних хмарних систем, які зумовили небезпечні явища в Україні. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2002. Вип. 250. С. 42–60.
4. Пірнач Г.М., Дудар С.М., Шпиг В.М. Чисельне моделювання фронтальних хмарних систем, які супроводжували сильний паводок у Карпатах у листопаді 1998 року. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2006. Вип. 255. С. 5–24.
5. Пірнач Г.М., Шпиг В.М. Моделювання потужних конвективних хмар. *Геоінформатика*. 2007. № 4. С. 86–94.
6. Пірнач Г.М., Шпиг В.М. Чисельне моделювання фронтальних хмарних систем, які супроводжували сильні паводки у Карпатах. *Метеорологія, кліматологія та гідрологія*. 2008. Вип. 50, Ч. 1. С. 81–87. (ISSN 0130-2914).
7. Пірнач А.М., Шпиг В.М. Численные исследования эволюции мезомасштабных образований, сопровождавших опасные явления в Крыму. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2009. № 4. С. 60–66.
8. Pirnach G., Belyi T., Shpyg V., Dudar S. Numerical simulation of heavy precipitation during floods in Carpathian [Електронний ресурс]. 13th Conference on Cloud Physics / 13th Conference on Atmospheric Radiation: 28 June — 02 July. 2010 : Res. Abs. Portland (Oregon, USA) 2010. — Режим

- доступу до журн.: <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/170141.pdf>
9. Лесков Б.Н., Бондаренко Г.В., Кубовський В.Т. та ін. Дослідження смерчів у Криму. *Метеорологія, кліматологія та гідрологія*. 2008. Вип. 50, Ч. 1. С. 196–201. (ISSN 0130-2914)
  10. Лесков Б.Н., Пірнач Г.М., Сирота М.В., Шпиг В.М. Смерчі у Криму 22 липня 2002 року. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2007. Вип. 256. С. 75–91.
  11. Краковська С.В., Пірнач Г.М., Дюкель Г.О. Дослідження процесів льодоутворення у змішаних хмарах холодного півріччя над Україною. *Наук. праці УкрНДГМІ*. Вип. 256. 2007. С.53–75.
  12. Хотяїнцев В.М., Бардаков Р.В., Краковська С.В., Шпиг В.М. Еволюція змішаної хмари: ріст частинок льоду. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2016. Вип. 268. С. 3–15.
  13. Bakhanov V., Kryvobok O., Dorman B. Numerical simulation of frontal mixed cloud systems and cloud microstructure effect on satellite signal. Proceedings of the 2004 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference (Prague, 2004). 2004. P. 301–306.
  14. Дорман Б.А., Баханов В.П., Мажара А.А. Микрофизические и оптические характеристики фронтальных смешанных облаков (результаты численного моделирования). *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2010. Вип. 259. С. 74–90.
  15. Баханов В.П., Дорман Б.А., Кривобок А.А., Манжара А.А. Численное моделирование микрофизических и оптических характеристик тонких слоистых облаков. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2013. Вип. 265. С. 3–7.
  16. Лесков Б.Н., Носар С.В., Сирота М.В. та ін. До питання про потужність градових процесів у літньому сезоні в Криму. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2019. № 1 (52). С. 97–108.
  17. Прусов В.А., Дорошенко А.Е., Черныш Р.И., Гук Л.Н. Эффективная разностная схема численного решения задачи конвективной диффузии. *Кибернетика и системный анализ*. 2007. № 3. С. 64–74.
  18. Прусов В.А., Дорошенко А.Е., Черныш Р.И., Гук Л.Н. Теоретическое исследование одного численного метода решения задачи конвективной диффузии. *Кибернетика и системный анализ*. 2008. № 2. С. 161–170.
  19. Гук Л.М. Стьйкість та збіжність економічного методу розв'язання одновимірної задачі конвективної дифузії. *Вісник Київського університету, серія: фізико-математичні науки*. 2008. № 4. С. 115–118.
  20. Гук Л.М. Експериментальне дослідження методу розв'язання одновимірної задачі конвективної дифузії. *Вісник Київського університету, серія: фізико-математичні науки*. 2009. № 1. С. 98–101.
  21. Гук Л.М. Метод явного рахунку для реалізації моделі циркуляції атмосфери. *Вісник Київського університету: Серія: фізико-математичні науки*. 2011. № 4. С. 102–106.
  22. Прусов В.А., Дорошенко А.Ю., Кацалова Л.М., Бекетов О.Г. Паралельні обчислення двовимірної задачі конвективної дифузії на відеокарті. *Вісник Київського університету: Серія: фізико-математичні науки*. 2013. № 3. С. 118–121.
  23. Заблоцька Т.М., Лесков Б.Н., Підгурська В.М., Шпиталь Т.М. Оцінка можливої кількості штучних опадів з хмар холодного періоду року. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2000. Вип. 248. С. 57–66.
  24. Носар С.В., Степура Є.А. Можливість штучного збільшення зимових опадів у Північно-західному Причорномор'ї (на прикладі Миколаївської області). *Наукові праці УкрНДГМІ*. 2014. Вип. 266. С. 26–38.
  25. Носар С.В., Степура Є.А. Оцінка можливого штучного збільшення опадів у Північному Причорномор'ї в холодну частину року (на прикладі Херсонської області). *Наукові праці УкрНДГМІ*. 2016. Вип. 269. С. 27–40.
  26. Носар С.В., Степура Є.А. Потенціал штучного збільшення опадів холодної частини року в Північному Причорномор'ї (на прикладі Одеської області). *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2017. Вип. 2(45). С. 83–101.
  27. Заблоцька Т.М., Підгурська В.М., Шпиталь Т.М. Просторово-часові зміни кількості хмар над територією України. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2002. Вип. 250. С. 100–106.
  28. Заблоцька Т.М., Шпиг В.М. Кількісні зміни хмарності як показник тривалості періоду глобального потепління. *Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту*. 2015. Вип. 267. С. 23–27.
  29. Заблоцька Т.М., Шпиг В.М., Ціла А.Ю. Зміни показників хмарного покриття над територією України впродовж періоду глобального потепління. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2019. № 4 (55). С. 121–130. DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2019.4.10>
  30. Заблоцька Т.М., Кривобок О.А., Скриник О.Я., Шпиг В.М. Верифікація супутникової інформації щодо мікрофизичних характеристик та верхньої межі хмар. *Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту*. 2016. Вип. 268. С. 24–33.
  31. Заблоцька Т.М., Кривобок О.А., Шпиг В.М. Водоресурси фронтальних хмарних систем за даними супутникових спостережень у теплий період року. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2018. Т. 3 (50). С. 66–72.
  32. Заблоцька Т.М., Кривобок О.А., Шпиг В.М. Водоресурси фронтальних хмарних систем у холодний період року за даними супутникових спостережень. *Фізична географія та геоморфологія*. 2018. Вип. 2 (90). С. 70–75.
  33. Заблоцька Т.М., Кривобок О.А., Шпиг В.М., Ціла А.Ю. Ефективний радіус крапель в хмарах різних форм та фронтальних хмарних системах за даними супутникових спостережень у теплий період року. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2020. № 1 (56). С.71–82. DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2020.1.8>
  34. Белый Т.А., Шпиг В.М. Численное моделирование микрофизических и электрических характеристик конвективных облаков. *Геоінформатика*. 2016. № 3 (59). С. 40–48.
  35. Шпиг В.М., Будає І.В. Особливості прогнозування сильних опадів в умовах гірської місцевості. *Фізична географія та геоморфологія*. 2010. Вип. 3 (60). С. 92–99.
  36. Пишняк Д.В., Ивус Г.П., Шпиг В.М., Будає І.В. Расчет доступной потенциальной энергии на основе данных региональной модели атмосферы WRF-ARW. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2010. № 6. С. 130–137.
  37. Шпиг В.М. Точність прогнозу термодинамічних метеорологічних величин і опадів в умовах гірської місцевості за гідростатичною та негідростатичною чисельними атмосферними мезомасштабними моделями. *Фізична географія та геоморфологія*. 2014. Вип. 4 (76). С. 117–136.
  38. Shpyg V., Budak I., Pishniak D., Poperechnyi P. The Application of Regional NWP Models to Operational Weather Forecasting in Ukraine [Електронний ресурс] // CAS Technical Conference (TECO) on "Responding to the Environmental Stressors of the 21<sup>st</sup> Century": 18–19 November 2013: Conf. Materials. — Antalya, 2013. — Режим доступу до журн. <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/cas/documents/Ukraine-NWPModels.pdf>
  39. Кацалова Л.М., Шпиг В.М. Крігінг-інтерполяція у задачах прогнозу погоди. *Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту*. 2013. Вип. 264. С. 3–9.

40. Кацалова Л.М., Шпиг В.М. Вариографічні моделі розподілу метеовеличин на території України для крігінг-інтерполяції. *Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту*. 2014. Вип. 266. С. 20–26.
41. Кацалова Л.М., Шпиг В.М. Вибір варіографічної моделі для даних прогнозу тиску, температури та опадів. *Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту*. 2016. Вип. 269. С. 17–27.
42. Katsalova L.M., Shpyg V.M. The choice of optimal lag for Kriging interpolation of NWP model forecast. *Meteorology, Hydrology and Water Management*. 2016. Vol. 4, Issue 2. P. 23–28. DOI: <https://doi.org/10.26491/mhwm/64292>
43. Гусейнов Н.Ш., Шпиг В.М., Меліков Б.М. Диагностические параметры условий формирования гроз. *Фізична географія та геоморфологія*. 2013. Вип. 4. С. 117–126.
44. Шпиг В.М., Будак І.В. Сравнительная оценка радиолокационных и наземных данных наблюдений грозы. Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях изменяющегося климата. Сборник научных статей международной научной конференции, г. Минск, 5–8 мая 2015 г. Минск, Издательский центр Белорусского Государственного Университета. 2015. С. 202–203.
45. Шпиг В.М., Будак І.В. Перехресна перевірка радіолокаційних даних та наземних спостережень щодо грози та граду. Перший Всеукраїнський гідрометеорологічний з'їзд: 22–23 березня 2017 р., м. Одеса, Україна. Одеса: ТЕС, 2017. С. 295–296.
46. Shpyg V., Budak I. WRF reflectivity simulation and verification of thunderstorm forecast by radar and surface observation. 16<sup>th</sup> International Radar Symposium : 24–26 June 2015: Symposium Materials. Dresden, 2015. — P. 610–615. DOI: 10.1109/IRS.2015.7226388
47. Shpyg V., Budak I. Estimation of effectiveness of thunderstorms observation and their forecast by the instability indices. 7<sup>th</sup> International Verification Methods Workshop: 03–11 May 2017, Berlin, Germany. *Annalen der Meteorologie*. 2017. Vol. 51. P. 81.
48. Krakovskaia S.V., Palamarchuk L.V., Shpyg V.M. Numerical simulation clouds and precipitation caused catastrophic floods along the Elbe river in August 2002 [Електронний ресурс] // In Proc. of WMO Int. Cloud Modelling Workshop. — Gamburg, 2004. — Режим доступу до журн. : [http://box.mmm.ucar.edu/events/wmo\\_workshop04/presentations/Thursday/ICMW\\_Krakovskaia.ppt](http://box.mmm.ucar.edu/events/wmo_workshop04/presentations/Thursday/ICMW_Krakovskaia.ppt)
49. Palamarchuk L., Shpyg V., Krakovskaia S. Floods in the Carpathians: synoptic analysis and numerical modeling [Електронний ресурс] European Geosc. Union, Gen. Assembly 2005: 24–29 April 2005: Geoph. Res. Abs. Vienna, 2005. Режим доступу до журн.: <http://www.cosis.net/abstracts/EGU05/00967/EGU05-J-00967-1.pdf>
50. Krakovska S., Palamarchuk L., Pirnach A. et al. Floods in the Carpathians: numerical modeling in the study of the extreme precipitation events. II International Conference on Earth System Modeling (ICESM), Hamburg, Germany, 26–31 August 2007 <http://www.cosis.net/abstracts/ICESM2007/00280/ICESM2007-A-00280.pdf>
51. Краковская С.В., Паламарчук Л.В., Дюкель Г.А. Региональная модель (РЕМО) в изучении сильных осадков в Карпатах. *Метеорологія, кліматологія та гідрологія*. 2008. Вип. 50, ч. 1. С. 75–80.
52. Краковська С.В., Паламарчук Л.В., Шедеменко І.П. та ін. Верифікація даних світового кліматичного центру (CRU) та регіональної моделі клімату (РЕМО) щодо прогнозу приземної температури повітря за контрольний період 1961–1990 рр. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2008. Вип. 257. С. 42–60.
53. Паламарчук Л.В., Гнатюк Н.В., Краковська С.В. та ін. Сезонні зміни клімату в Україні в ХХІ столітті. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2010. Вип. 259. С. 104–120.
54. Краковська С.В., Паламарчук Л.В., Шедеменко І.П. та ін. Моделі загальної циркуляції атмосфери та океанів у прогнозуванні змін регіонального клімату України в ХХІ ст. *Геофізический журнал*. 2011. № 6. Т. 33. С. 68–81.
55. Шедеменко І.П., Краковська С.В., Гнатюк Н.В. Верифікація даних Європейської бази E-OBS щодо приземної температури повітря та кількості опадів у адміністративних областях України. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2012. Вип.262. С. 36–48.
56. Волощук В.М. Введение в гидродинамику грубодисперсных аэрозолей. Л.: Гидрометеоиздат. 1971. 270 с.
57. Волощук В.М., Седунов Ю.С. Процессы коагуляции в дисперсных системах. Л.: Гидрометеоиздат. 1975. 320 с.
58. Волощук В.М. Кинетическая теория коагуляции. Л.: Гидрометеоиздат. 1984. 283 с.
59. Волощук В.М. Аналитическое решение диффузионной задачи для атмосферной примеси. *Метеорологія и гидрологія*. 1991. №11. С. 5–15.
60. Волощук В.М., Куприянчук В.И., Лев Т.К. О параметризации вертикального турбулентного обмена в пограничном слое атмосферы. *Метеорологія и гидрологія*. 1992. № 3. С. 5–15.
61. Voloshchuk V.M., Shkvorets O.Y. Possible influence of meteorological conditions and changes aerosol source parameters on the spot structure formation of ground radioactive contamination. *J. Aerosol Sci.* 1993. Vol. 24 (1). P. 531.
62. Волощук В.М., Скриник О.Я. Параметризация турбулентной диффузии газо-аэрозольной примеси в атмосфере на основе уравнения Фоккера-Планка. *Наукові праці УкрНДГМІ*. 2002. Вип. 250. С. 7–18.
63. Волощук В.М., Бойченко С.Г., Степаненко С.М. та ін. Глобальне потепління і клімат України: Регіональні екологічні та соціально-економічні аспекти. Київський національний університет імені Тараса Шевченка. К., 2002. 116 с.
64. Волощук В.М., Скриник О.Я., Грицюк Ю.Я. Механізм формування крупномасштабної "плямовидної" структури забруднення підстилаючої поверхні потужним газо-аерозольним викидом в нижній частині атмосфери. *Доповіді НАНУ*. 2007. № 4. С. 115–120.
65. Скриник О.Я., Грицюк Ю.Я. Механізм формування крупномасштабної "плямовидної" структури забруднення місцевості потужним газо-аерозольним викидом в граничному шарі атмосфери. *Геофізичний журнал*. 2007. Т. 29. № 4. С. 191–198.
66. Скриник О.Я. Дослідження формування плямистості забруднення місцевості потужним висотним фінітним джерелом на основі простих аналітичних моделей атмосферної дифузії. *Геофізичний журнал*. 2010. Т. 32. № 3. С. 86–92.
67. Skrynyk O. Y., Chernysh R. I., Hrytsyuk Y. Y. Formation of a large scale spot-like structure of the total deposition due to a powerful elevated finite source. *Advances in Science and Research*. 2010. V.4. P. 37–41.
68. Скриник О.Я. Особливості формування крупномасштабного плямистого забруднення місцевості точковим миттєвим джерелом. *Наукові праці УкрНДГМІ*. 2012. Вип. 263. С. 8–12.
69. Giajotti D., Oshurok D., Skrynyk O. The Chernobyl nuclear accident Cs-137 cumulative depositions simulated by means of the CALMET/CALPUFF modelling system. *Atmospheric*

- Pollution Research*. 2018. Vol. 9 (3). P. 502–512. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.11.007>
70. Skrynyk O., Voloshchuk V., Budak I., Bubin S. Regional HYSPLIT simulation of atmospheric transport and deposition of the Chernobyl <sup>137</sup>Cs releases. *Atmospheric Pollution Research*. 2019. Vol. 10(6). P. 1953–1963. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.09.001>
71. Bezyk Y., Oshurok D., Dorodnikov M., Sówka I. Evaluation of the CALPUFF model performance for the estimation of the urban ecosystem CO<sub>2</sub> flux. *Atmospheric Pollution Research*. 2021. Vol. 12 (3). P. 260–277. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.12.013>
72. Осадчий В.І., Скриник О.А., Скриник О.Я. Оцінка сучасного стану вітрових ресурсів Українських Карпат та їх зміни відносно базового кліматичного періоду. *Доповіді НАНУ*. 2015. № 8. С. 95–100.
73. Осадчий В.І., Скриник О.А., Ошурок Д.О., Скриник О.А. Оцінка вітроенергетичних ресурсів обмежених територій невеликих просторових масштабів із складним рельєфом. *Доповіді НАНУ*. 2017. № 5. С. 51–58, <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.05.51>
74. Ошурок Д.О., Скриник О.Я. Приведення даних вимірювань швидкості вітру до умов відкритої місцевості. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2019. № 4 (55). С. 131–139.
75. Осадчий В.І., Скриник О.А., Скриник О.Я. Вплив неоднорідності часових рядів температури повітря на оцінку кліматичних змін. *Доповіді НАНУ*. 2017. № 7. С. 43–50, doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.07.043>
76. Osadchyi V., Skrynyk O., Radchenko R., Skrynyk O. Homogenization of Ukrainian air temperature data. *Int. J. Climatol.* 2018. Vol. 38 (1). P. 497–505. <https://doi.org/10.1002/joc.5191>
77. Skrynyk O., Aguilar E., Skrynyk O. et al. Quality control and homogenization of monthly extreme air temperature of Ukraine. *Int. J. Climatol.* 2019. Vol. 39 (4). P. 2071–2079. <https://doi.org/10.1002/joc.5934>
78. Skrynyk O., Aguilar E., Guijarro J. et al. Uncertainty evaluation of Climatol's adjustment algorithm applied to daily air temperature time series. *International Journal of Climatology*. 2021a. Vol. 41 (S1). E2395–E2419. <https://doi.org/10.1002/joc.6854>
79. Skrynyk O.Y., Luterbacher J., Allan R. et al. (2021b). Ukrainian early (pre-1850) historical weather observations. *Geoscience Data Journal*. 2021b. Vol. 8 (1), P. 55–73. <https://doi.org/10.1002/gdj3.108>

