

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до самостійної роботи студентів та виконання практичних робіт з
дисципліни

ПРИКЛАДНА МЕТЕОРОЛОГІЯ

(блок змістовних модулів «Фізика хмар та опадів»)

Спеціальність 103 «Науки про Землю»

«Затверджено»

на засіданні методичної комісії ГМІ
протокол №__ від «__»____ 2018р.
Директор ГМІ _____ Овчарук В.А.

Затверджено

на засіданні каф. метеорології та
кліматології

Протокол №__ від «__»____ 2018р.

Зав. кафедрою

проф. Івус Г.П. _____

Одеса 2018

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до самостійної роботи студентів та виконання практичних робіт з
дисципліни

ПРИКЛАДНА МЕТЕОРОЛОГІЯ

(блок змістовних модулів «Фізика хмар та опадів»)

Спеціальність 103 «Науки про Землю»

Одеса 2018

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до самостійної роботи студентів та виконання практичних робіт з
дисципліни

ПРИКЛАДНА МЕТЕОРОЛОГІЯ

(блок змістовних модулів «Фізика хмар та опадів»)

Спеціальність 103 «Науки про Землю»

«Затверджено»
на засіданні методичної комісії ГМІ
протокол №___ від «___» _____ 2018р.

Одеса 2018

Методичні вказівки до самостійної роботи студентів та виконання практичних робіт при вивченні дисципліни «Прикладна метеорологія» (блок змістовних модулів «Фізика хмар та опадів») для студентів денної форми навчання, рівень підготовки – бакалавр, спеціальність «Науки про Землю» / Недострелова Л.В. – Одеса, ОДЕКУ, 2018. – 34 с.

ЗМІСТ

1	ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА.....	5
1.1	Передмова.....	5
1.2	Зміст блоку змістовних модулів «Фізика хмар та опадів»	5
1.3	Перелік навчальної літератури.....	6
1.4	Перелік знань та вмінь студента.....	7
2	ОРГАНІЗАЦІЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТА.....	8
2.1	Загальні поради.....	8
2.2	Повчання по вивченню теоретичної частини курсу.....	8
2.2.1	Повчання по вивченню блоку змістовних модулів «Фізика хмар та опадів», лекційний модуль № 1: «Фізика формування рідких та твердих фаз води в атмосфері».....	8
2.2.2	Повчання по вивченню блоку змістовних модулів «Фізика хмар та опадів», лекційний модуль № 2: «Хмари. Атмосферна електрика. Опади.».....	14
2.3	Повчання по вивченню практичної частини курсу.....	24
3	ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ ТА ВМІНЬ СТУДЕНТІВ	31
3.1	Методика оцінки всіх видів підготовки студентів	31
3.2	Перелік базових знань та вмінь.....	33

1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

1.1 Передмова

Блок змістовних модулів «Фізика хмар та опадів» дисципліни «Прикладна метеорологія» присвячено дослідженню закономірностей хмаро- та опадоутворення та фізичних принципів різноманітних методів впливу, оцінки можливості управління атмосферними процесами, яке набуває величезного значення під час глобальних кліматичних змін.

Роль хмар в життєдіяльності людини величезна. Без них не існувало б умов, що забезпечують життя людини на Землі. Хмари покривають дещо більше половини небозводу і впливають не тільки на круговорот води в природі, але і на багато процесів, що протікають в атмосфері і формують погоду: на самоочищення атмосфери, на проходження в атмосфері електромагнітних хвиль, а також – на тепловий баланс системи Земля - атмосфера та ін. Гостра необхідність в відомостях про геометричні, фізичні та географічні характеристики, просторово-часову мінливість параметрів хмар з'явилася у фахівців, які працюють в області прогнозування погоди, вивчення клімату і його моделювання, активних впливів на атмосферні процеси, космічних досліджень, авіаційної та радіолокації техніки, супутникової метеорології і ін.

Блок змістовних модулів «Фізика хмар та опадів» дисципліни «Прикладна метеорологія» належить до професійно-орієнтованого циклу дисциплін підготовки фахівців зі спеціальності 103 «Науки про Землю».

Метою дисципліни є підготовка фахівців, які володіють глибокими теоретичними знаннями в галузі фізики хмар та опадів.

Кількість навчальних годин визначається навчальним планом.

1.2 Зміст блоку змістовних модулів «Фізика хмар та опадів»

Змістовний модуль № 1.

Фізика формування рідких та твердих фаз води в атмосфері.

Тема 1. Вода в атмосфері. Будова молекул водяної пари. Сили, які призводять до об'єднання молекул водяної пари у комплекси. Нестійкі та стійкі комплекси молекул водяної пари.

Тема 2. Конденсація водяної пари в атмосфері. Ймовірність утворення зародків нової фази у гомогенному середовищі. Гетерогенна конденсація. Атмосферні ядра конденсації.

Тема 3. Конденсаційне зростання та випаровування крапель в атмосфері. Рівняння переносу пари та тепла в атмосфері. Роль конвективних потоків тепла і вологості.

Тема 4. Кристалізація переохолоджених крапель. Ймовірність виникнення твердої фази у гомогенному середовищі. Рівняння

швидкості кристалізації для монодисперсної хмари. Імовірність замерзання крапель різних розмірів у полідисперсній хмарі.

Змістовний модуль № 2.

Хмари. Атмосферна електрика. Опади.

Тема 1. Динаміка утворення шаруватоподібних хмар. Фізичні умови утворення хвилеподібних хмар.

Тема 2. Купчасті хмари. Елементи конвекції. Динаміка ненасиченого терміка. Динаміка вологих терміків. Стадії розвитку купчасто-дощових хмар. Класифікація хмар.

Тема 3. Електричне поле тропосфери. Механізм утворення зарядів на хмарних краплях і кристалах.

Тема 4. Електрична структура грозової хмари. Виникнення блискавок у грозових хмарах.

Тема 5. Процеси укрупнення хмарних елементів і утворення опадів. Коефіцієнт захоплення. Гравітаційний, броунівський, електричний, гідродинамічний ефекти коагуляції.

Тема 6. Опади з шаруватоподібних хмар. Механізм утворення зливових опадів. Опади у тропіках.

1.3 Перелік навчальної літератури

Основна

1. Данова Т.Є. Фізичні основи впливу на атмосферні процеси: навчальний посібник. Одеса: ОДЕКУ, 2010. 128 с.
2. Данова Т.Є. Фізичні основи впливу на атмосферні процеси: конспект лекцій. Одеса: ОДЕКУ, 2006. 98 с.
3. Данова Т.Є. Фізика хмар. Конспект лекцій. Одеса: ОДЕКУ, 2006. 131 с.
4. Школьный С.П. Фізика атмосфери: підручник. Одеса: ОГМІ, 1977. 698 с.
5. Роджерс Р.Р. Кратний курс физики облаков/пер. с англ. под ред. И.П. Мазина. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. 231 с.
6. Мазин И.П., Шмелер С.М. Облака, строение и физика образования. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 231 с.
7. Облака и облачная атмосфера/под ред. И.П. Мазина, А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 632с.
8. Бекряев В.И. Практикум по физическим основам воздействия на атмосферные процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 144 с.

Додаткова

1. Шметер С.М. Физика конвективных облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 289 с.
2. Шишкин Н.С. Облака, осадки и грозовое электричество. Изд. 2-е. Л.: Гидрометеиздат, 1954. 401 с.
3. Седунов Ю.С. Физика образования жидкокапельной фазы в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 207 с.
4. Тлисов М.И. Физические характеристики града и механизм его образования. С.-П.: Гидрометеиздат, 2002. 386 с.
5. Сулаквелидзе Г.К., Глушкова Н.И., Федченко Л.М. Прогноз града, гроз и ливневых осадков. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 187 с.

1.4 Перелік знань та вмінь студента

В результаті вивчення блоку змістовних модулів студенти повинні знати:

- фізичні механізми, які приводять до конденсації атмосферної водяної пари;
- кінематику формування, зростання та випаровування крапель і кристалів у хмарах;
- формування опадів та динаміку атмосферних конвективних рухів;
- динаміку формування хмар шаруватих та купчасто-дощових форм;
- структуру полів метеорологічних величин у зоні хмар і туманів;
- основні фізичні закономірності розвитку атмосферних процесів.

В результаті вивчення блоку змістовних модулів студенти повинні вміти:

- моделювати умови створення крапель опадів;
- моделювати умови створення і розвитку хмар;
- розраховувати зростання крапель та граду у потужних купчасто-дощових хмарах.

2 ОРГАНІЗАЦІЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТА

2.1 Загальні поради

Блок змістовних модулів «Фізика хмар та опадів» дисципліни «Прикладна метеорологія» вивчається після того, як студенти опанували такі дисципліни: «Астрономія», «Фізика атмосфери», «Методи обробки та аналізу гідрометеорологічної інформації», «Синоптична метеорологія». Знання, що набули студенти в процесі вивчення цих дисциплін, необхідні їм для розуміння положень, які викладаються у даному курсі.

Метою даних методичних вказівок є допомога студенту при самостійному вивченні дисципліни та підготовці до практичних робіт.

Для самостійного вивчення дисципліни рекомендовано користуватися навчальною літературою, яка є в бібліотеці університету та на кафедрі фізики атмосфери та кліматології. Поточна та підсумкова оцінка рівня знань студентів здійснюється за модульною системою. Теми теоретичної частини методичних вказівок відповідають розділам робочої програми.

2.2 Повчання по вивченню теоретичної частини курсу

2.2.1 Повчання по вивченню блоку змістовних модулів «Фізика хмар та опадів», лекційний модуль № 1: **«Фізика формування рідких та твердих фаз води в атмосфері»**

ЛІТЕРАТУРА [3, С. 9-33]

У результаті засвоєння змістовного лекційного модуля студенти повинні знати:

- фізичні механізми, які приводять до конденсації атмосферної водяної пари;
- кінематику формування, зростання та випаровування крапель і кристалів у хмарах;
- формування опадів та динаміку атмосферних конвективних рухів.

Водяна пара, на відміну від інших газів, при температурах повітря, які спостерігаються в атмосфері, може змінювати свій агрегатний стан, переходячи у рідкий (воду), чи твердий стан (лід). Різні фази води, тобто фізично однорідні частини системи, які здатні переходити з одного стану в інший, представлені на рисунку 2.1. Для кожного газу існує критична температура $T_{кр}$. Якщо $T > T_{кр}$, то газ не може перейти в

інший фазовий стан, незважаючи на те, при якому атмосферному тиску він перебуває. Для водяної пари $T_{кр} = 374\text{ }^{\circ}\text{C}$, звичайно, що в атмосфері $T < T_{кр}$. Ця властивість водяної пари визначає специфічні характеристики різних фаз води.

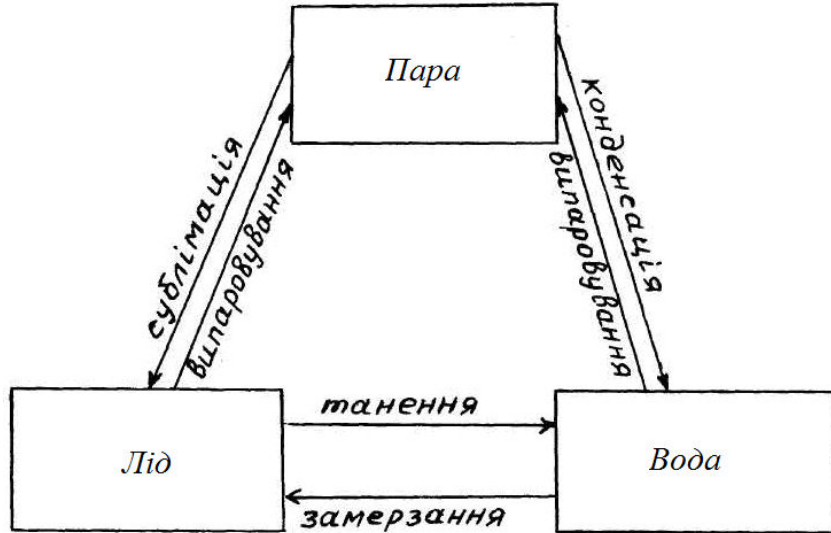


Рисунок 2.1 – Фазові стани води

Однією із характерних властивостей частинок твердої або рідкої фаз є поверхневий натяг. На поверхні розділу, наприклад, води і водяної пари є шар молекул, який значно відрізняється за своїми властивостями від інших шарів молекул у воді. Молекули, що розташовуються у середині води, зазнають рівномірну дію із боку оточуючих молекул. Рівнодіюча цих молекулярних сил дорівнює нулю. Дія молекулярних сил на молекули, які розташовані на межі розділу двох середовищ, суттєво відрізняється, в цьому випадку сили спрямовані у середину поверхні. Тоді на межі двох фаз зосереджується надлишок енергії відносно енергії тих об'ємних частин, які утворюють поверхневий шар [3]. Очевидно,

$$u_c = u_1 + u_2 + u', \quad (2.1)$$

де u_c – енергія (потенціал) усієї системи,
 u_1 – енергія (потенціал) водяної пари (фаза 1),
 u_2 – енергія (потенціал) води (фаза 2),
 u' – надлишок енергії.
 Звідси надлишок енергії дорівнює

$$u' = u_c - (u_1 + u_2). \quad (2.2)$$

Питома поверхнева енергія, яка відповідає роботі утворення одиниці поверхневого шару, визначається як відношення надлишку енергії до площі поверхні розділу F

$$\sigma = \frac{u'}{F} = \frac{u_c - (u_1 + u_2)}{F} \quad (2.3)$$

і називається поверхневим натягом. Він чисельно дорівнює роботі, яка потрібна, щоб розтягнути з води і водяної пари кількість молекул, необхідних для утворення 1 м^2 поверхневого шару води.

Поверхневий натяг залежить від температури. Ця залежність для води має вигляд:

$$\sigma = \sigma_0(1 - 0.002t), \quad (2.4)$$

де $\sigma_0 = 75,64 \frac{\text{мДж}}{\text{м}^2}$ – поверхневий натяг при температурі $t = 0,0^\circ \text{C}$.

Комплекс із п'яти молекул H_2O можна розглядати як сформовану ембріональну краплину, оскільки з молекулою, що знаходиться у середині цього комплексу, не може безпосередньо зв'язуватись жодна інша молекула водяної пари. У ньому всі крайні молекули утримуються силами зчеплення з центральною молекулою, яка ізольована від вільних молекул водяної пари. Але в такому комплексі $(\text{H}_2\text{O})_5$ поверхневі сили ще не можуть буди стійкими, оскільки відрив навіть однієї молекули руйнує зазначену симетрію.

У середовищі водяної пари безперервно відбувається утворення та руйнування комплексів молекул. Деякі з них можуть мати властивості зародкової краплі. Елементарний зародок, або ембріональна краплина, може бути стійким і збільшуватись з часом, або нестійким і руйнуватись.

Фолмер на основі розрахунків показав, що спонтанна конденсація у гомогенному середовищі водяної пари можлива лише при пересиченнях більших ніж чотирикратне. Досліди в адіабатичній камері Вільсона показали, що у пароповітряному середовищі при відсутності сторонніх домішок конденсація водяної пари відбувається при восьмикратному пересиченні [3]. Таким чином, для спонтанного утворення в гомогенному середовищі водяної пари потрібне 4-8 кратне пересичення. Таких пересичень в атмосфері не буває. Навіть усередині купчастої хмари у висхідному потоці пересичення досягають соті частки процента. Але в атмосфері конденсація водяної пари відбувається. Річ у тому, що реальна атмосфера не є гомогенною. Вона

вмістить велику кількість аерозольних часток. Деякі з них виступають у ролі зародків нової фази. Тверді змочуючи частки спонтанно покриваються водяною плівкою, а соляні частки, адсорбуючи молекули водяної пари, перетворюються у краплі розчину солі. В першому та другому випадках молекули водяної пари будуть конденсуватись вже на готовій рідкій поверхні, розміри якої порівняні з великим зародком. При цьому відпадає необхідність витрати енергії на утворення первинної асоціації молекул. Необхідна лише витрата її на зростання краплі від розміру аерозольної частинки до розміру, коли крапля приходить до стану рівноваги з оточуючим пароповітряним середовищем. Аерозольні частинки, на яких відбувається конденсація водяної пари, називаються ядрами конденсації.

Численні спостереження показали, що в атмосфері завжди присутні ядра таких розмірів і в таких кількостях, які достатні для утворення хмар при пересиченнях, характерних для реальної атмосфери. Атмосферні аерозольні частки можна розділити на три групи.

1. Тверді ядра, нерозчинні та не змочуючі (пилинки, частки піщинок, кварцу, вугілля тощо). Конденсація водяної пари на них можлива, але при великих пересиченнях. В атмосферних умовах вони у ролі ядер конденсації не виступають.

2. Тверді частинки нерозчинні, але змочуючі. Такі частинки спонтанно адсорбують вологу і в залежності від існуючої вологості та ступеня змочуваності покриваються одним або більшою кількістю молекулярних шарів води. Якщо частки мають неправильну форму, або крихку структуру, то у поглибленнях і порах відбувається капілярна конденсація або адсорбція навіть при недосиченнях.

3. Краплі розчинів. У вологій атмосфері тверді розчинні гігроскопічні частинки швидко перетворюються у краплі розчинів. Це найбільш важлива група ядер конденсації. Вони надходять в атмосферу при спалюванні вугілля, яке вмістить від 0,3 до 20 % сірки. Із сірки в результаті спалювання виникає двооксид сірки SO_2 , який за допомогою різних окислювачів може перетворитися на сірчаний ангідрид SO_3 і потім на сірчану кислоту H_2SO_4 , розчинну і дуже гігроскопічну.

Гігроскопічні ядра конденсації утворюються також із морських бризків і піни. Випаровування їх приводить до утворення дрібних частинок морської солі. Морська сіль складається із 77,8 % $NaCl$, 10,9 % $MgCl_2$ та невеликої кількості сірчаноокислих магнію, калію й кальцію.

Ядра конденсації утворюються також при вивітрюванні земної поверхні, при лісових пожежах, вулканічній діяльності тощо. Із загальної кількості ядер конденсації припадає: на морські ядра – 20 %, на

продукти спалювання – 40 %, частки ґрунту – 20 %, ядра невідомого походження – 20 %.

Концентрація ядер конденсації в атмосфері коливається у широких границях. Середнє число ядер в 1 см^3 поблизу від земної поверхні дорівнює: близько 150000 – у великих містах, 35000 – у невеликих містах, 9500 – у сільській місцевості, 940 – над океанами і в горах. Більшість із них не є активними і не беруть участі у процесах конденсації.

Як показали спостереження, в атмосфері зустрічаються ядра конденсації, розміри яких змінюються в широких межах – від 10^{-7} до 10^{-3} см. За розмірами ядра конденсації поділяються на три групи: частки радіусом від $5 \cdot 10^{-7}$ до $2 \cdot 10^{-5}$ см, які називають ядрами Айткена; частки радіусом від $2 \cdot 10^{-5}$ до 10^{-4} см, що називаються крупними ядрами; частки радіусом більше 10^{-4} см. Останні мають назву гігантських ядер конденсації. В атмосфері найбільшу концентрацію мають ядра Айткена. У середньому в 1 см^3 їх вмістить 42500, крупних ядер – 132, а гігантських – 2. Незважаючи на те, що кількість крупних і гігантських ядер мала порівняно з кількістю ядер Айткена, внесок їх у загальну масу ядер найбільший.

Помітні концентрації льодяних кристалів починають утворюватися у хмарі, коли температура падає нижче $-15,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для гомогенної кристалізації ці умови не виявляються сприятливими, це означає, що відбувається гетерогенне льодоутворення. Вода у контакті з більшістю речовин буде замерзати при температурах вище $-40,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, і пара буде сублімуватись на більшості речовин при пересиченнях і переохолодженнях більш низьких, ніж потрібно для гомогенного льодоутворення. Отже, зародженню льоду у переохолодженій воді й пересиченому середовищі сприяє присутність сторонніх поверхонь або завислих часток. Дослідження зростання окремих кристалів показує, що воно найбільш легко відбувається на ядрах, які мають слабку розчинність і гексагональну структуру кристалічної ґратки, котра близька до структури природного льоду. Існують три види атмосферних льодяних ядер: ядра сублімації, ядра замерзання й контактні ядра.

Роль атмосферних ядер льодоутворення полягає в тому, що вони полегшують фазовий перехід вода-лід, або водяна пара-лід. З цієї точки зору, можна прийняти таку класифікацію процесів замерзання:

а) Кристалізація при температурі вище $-32,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. У цьому випадку тверді нерозчинні ядра, змочені водою, утворюють зародкові кристали шляхом замерзання їх водяної оболонки. Наявність твердих часток просто полегшує енергетичний перехід вода-лід.

б) Кристалізація в інтервалі температур від $-32,0$ до $-41,0$ °С. У цьому діапазоні відбувається замерзання крапель розчинів солей. Під впливом низьких температур розчин солей стає пересиченим, що приводить до випадання кристаликів солі в осадок. Ці кристалики й відіграють роль ядер замерзання.

в) Кристалізація при $< -41,0$ °С може бути наслідком спонтанного замерзання крапель води або чистих розчинів солей без участі ядер замерзання шляхом випадкового з'єднання молекул переохолодженої води в агрегати льодяної фази.

г) Кристалізація при температурах $-65,0$ °С і нижче відбувається шляхом прямої сублімації водяної пари на твердих незмочуючих ядрах, або спонтанного замерзання дрібних крапель, як у пункті в).

ЛІТЕРАТУРА

[3], с. 9 - 33.

ПИТАННЯ ДО САМОПЕРЕВІРКИ

1. Які фазові переходи відбуваються в атмосфері?
2. Вкажіть сили взаємодії, які виникають між молекулами, та причини, що їх спонукають.
3. Опишіть структуру молекули H_2O .
4. Яким рівнянням описується взаємна потенційна енергія між двома молекулами H_2O ?
5. Як пов'язана ефективна відстань із структурою зародка нової фази?
6. Що собою являє потенційна крива?
7. На якій відстані відбувається взаємодія між молекулами?
8. Що собою являють зародки рідкої та твердої?
9. Що таке поверхневий натяг? Від чого залежить його величина? Коли він виникає?
10. Як залежать умови росту зародка рідкої фази від кривизни поверхні краплі?
11. Яке середовище вважається гомогенною, а яке – гетерогенною?
12. Що таке критичне пересичення?
13. Від чого і як залежить величина критичного радіуса краплі?
14. Які відомі класифікації ядер конденсації?
15. Які існують джерела атмосферних ядер конденсації?
16. Запишіть систему рівняння, що описує перенос водяної пари і тепла при конденсаційному зростанні краплі.
17. Від чого і як залежить величина потоку пари до (від) поверхні краплі у стаціонарних умовах?

18. У чому складається особливість конденсації водяної пари у нестационарних умовах від стаціонарних?

19. Як відрізняється конденсаційне зростання сукупності крапель від конденсаційного зростання окремої краплі?

20. Визначити сенс функції розподілу крапель за розмірами.

21. Які закони описують розподіл крапель за розмірами?

22. Як записується розподіл Хргіана-Мазіна?

23. Як проходить льодоутворення у гомогенному середовищі водяної пари?

24. Від чого і як залежить ймовірність утворення твердої фази у гомогенному середовищі?

25. Як відбувається процес льодоутворення у реальній атмосфері.

26. Що таке ядра сублімації?

27. Від чого і як залежить швидкість кристалізації?

28. Які форми кристалів відомі та як залежить швидкість зростання кристалів від їх форми?

2.2.2 Повчання по вивченню блоку змістовних модулів «Фізика хмар та опадів», лекційний модуль № 2: «Хмари. Атмосферна електрика. Оподи.»

У результаті засвоєння змістовного лекційного модуля студенти повинні знати:

- кінематику формування, зростання та випаровування крапель і кристалів у хмарах;
- формування опадів та динаміку атмосферних конвективних рухів;
- динаміку формування хмар шаруватих та купчасто-дощових форм;
- структуру полів метеорологічних величин у зоні хмар і туманів;
- механізм утворення грози.

У краплинних хмарах реальна концентрація льодяних частинок не перебільшує 1л^{-1} , тобто менша порівняно з концентрацією крапель 10^5 - 10^6 разів. Крім краплинних хмар при від'ємних температурах спостерігаються змішані й кристалічні хмари. Змішанні хмари складаються з крапель із кристалів. Концентрації льодяних частинок у змішаних хмарах можуть бути зіставленими з концентрацією рідких хмарних елементів. При відсутності вертикальних рухів змішані хмари нестійкі: краплі замерзають або випаровуються, а кристали зростають. У активній стадії розвитку хмар, коли присутні висхідні токи, які

забезпечують приплив надлишкової вологи, змішана хмара може існувати необмежений час, якщо стік водяної пари на кристали не перевищує її припливу.

Кристалічними є хмари, які складаються з елементів твердої фази води. Фазова структура хмари не буває нерухомою. У процесі життя хмари кристали зароджуються, ростуть і випадають, краплі утворюються й випаровуються. Таким чином, фазовий стан хмари може бути різним у різних точках хмари і змінюватись за часом. Фазовий стан хмари – одна із найважливіших характеристик при від’ємних температурах, які у великій мірі визначають активність процесів хмароутворення й процесів утворення опадів. Зазначені процеси найбільш активні при змішаній структурі хмари. У цьому сенсі, найпасивнішими є кристалічні хмари.

Фазовий стан хмари залежить від багатьох факторів, але основні з них – це температура й вертикальні рухи. Характеристики цих рухів вимірювати дуже важко навіть тоді, коли вони обумовлюються турбулентністю атмосфери або тепловою конвекцією й мають значні величини.

Статистичні дані про повторюваність різних фазових станів хмар помірних широт при різних температурах дало змогу отримати залежність (рис. 2.2). При цьому хмари були віднесені до краплинних, кристалічних або змішаних у залежності від того, зустрічались або не зустрічались краплі чи кристали в експериментальних пробах хмарного повітря при польоті літака-лабораторії. Повторюваності, що наводяться на рис. 2.2, отримані для всіх досліджених хмар у цілому без поділу їх на форми.



Рисунок 2.2 – Повторюваність (%) різного фазового стану хмар при різній температурі [3]

Відмінності у фазовому стані хмар різних форм визначаються температурним режимом, також на фазовий стан хмар впливають розташовані вище шари хмар та їх товщина. Повторюваність різного

фазового стану хмар різних форм для помірних широт наводиться в табл. 2.1.

Загальною закономірністю даних, які містяться в табл. 2.1, є зменшення повторюваності краплинних хмар і збільшення повторюваності кристалічних хмар при зниженні температури. Але спостерігається суттєва різниця у повторюваності рідкої й твердої фаз у хмарах St , Sc і Ac (перша група) і хмарах Ns і As (друга група).

Як взимку, так і влітку, а також у середньому за рік, у першій групі хмар повторюваність рідкої фази набагато більша, ніж у хмарах другої групи. З іншого боку, у хмарах другої групи значно зростає повторюваність змішаного фазового стану, особливо у шарувато-дощових хмарах, що є однією із основних причин утворення опадів із цих хмар.

Водністю хмар Q_w називають масу води, яка у сконденсованому стані вміститься в одиниці об'єму повітря. Ця характеристика мікроструктури має розмірність г/см³. Питомою водністю δ_w називають масу води, яка вміститься утримується в одиниці маси повітря – г/г. У випадку, коли хмара кристалічна, замість водності використовується характеристика, яку називають льодністю Q_l . Льодність – це маса кристалів льоду, які вмістяться в одиниці об'єму хмарного повітря.

Таблиця 2.1 – Середньорічна повторюваність (%) фазового стану хмар різних для помірних широт (по А.М. Боровикову)

Сезон	Фазовий стан хмар	Форми хмар				
		St	Sc	Ns	Ac	As
Літо	Краплинна	99,5	98,8	29	80	44
	Змішана	0,5	1,2	71	17	40
	Кристалічна	0	0	0	3	16
Зима	Краплинна	85	73	13	44	15
	Змішана	14	24	84	44	36
	Кристалічна	1	3	3	12	49
Рік	Краплинна	89	83	17	62	24
	Змішана	10	16	81	30	36
	Кристалічна	1	1	2	8	40

Хмари є одним з елементів кругообігу води в системі Земля-атмосфера. Утворення та еволюція хмар обумовлюються фізичними процесами, які розвиваються в атмосфері, з якої хмари отримують запаси водяної пари. Але, в свою чергу, хмари дуже впливають на розподіл характеристик атмосфери. По-перше, вони виступають у ролі регулятора радіаційних процесів, по-друге, вносять визначний внесок в

процеси перетворення енергії в атмосфері завдяки фазовим переходам води.

Незважаючи на те, що в атмосфері утримується в стані водяної пари біля 13 000 км³ води, водяна пара у середньому перебуває в стані далекому від стану насичення. Біля земної поверхні відносна вологість повітря найчастіше дорівнює 60-70 % та зменшується в 2-3 рази в області тропопаузи. Тому для виникнення хмар повинен бути локальне зростання відносної вологості, завдяки якому у тій або іншій частині атмосфери водяна пара стала б насиченою. Крім того потрібно, щоб у зоні насичення була достатньою кількість ядер конденсації або при низьких від'ємних температурах ядер льодоутворення. Зростання відносної вологості може обумовлюватись припливом водяної пари чи зниженням температури, або під дією обох факторів разом. Причиною зниження температури можуть бути як адіабатичні, так і неадіабатичні процеси. Близьким до адіабатичного є процес охолодження повітря при вертикальних підйомах частинок повітря. Основними неадіабатичними процесами, які впливають на хмароутворення, є фазові переходи води, процес перетворення радіаційних потоків, турбулентний теплообмін атмосфери з підстильною поверхнею та сусідніми шарами атмосфери. Найбільш значним є внесок неадіабатичних процесів при утворенні низьких хмар шаруватих форм. Хмари шаруватих форм часто мають і внутрішньомасове походження, утворення хмар шаруватих форм може бути обумовлено не тільки упорядкованими висхідними рухами, але й іншими факторами, наприклад, атмосферою турбулентністю.

З точки зору процесів хмароутворення найбільший інтерес являють ті хвильові рухи, що виникають у шарах з інтенсивністю або дуже стійкою температурною стратифікацією, які часто називають затримуючими шарами, а також хвилі, що утворюються при обтіканні потоком гір або височин. Ці хвильові збурення в атмосфері називають внутрішніми гравітаційними хвилями, або хвилями Гельмгольца. Вони утворюються, коли при переході через затримуючий шар повітря відбувається розрив горизонтальної складової швидкості вітру разом із стрибкоподібним змінням густини повітря. Під впливом таких хвильових рухів за визначених умов можуть утворюватися хвильоподібні хмари, які мають вигляд поширеного по горизонталі на десятки і сотні кілометрів шару, який складається з валів, пасм, плит.

Купчасто-дощові хмари утворюються з потужно-купчастих, коли їх вершини проникають у шари атмосфери, де температура набагато нижча за 0 °C, й заледенівають. Зледеніла верхня частина купчасто-дощової хмари (*Cb*) може залишатися куполоподібною – *Cb calv* (лисе), але частіше з неї викидаються пучки перистих хмар у вигляді парасолі або ковадла, так виникають *Cb cap* (волосаті), різновидністю яких є

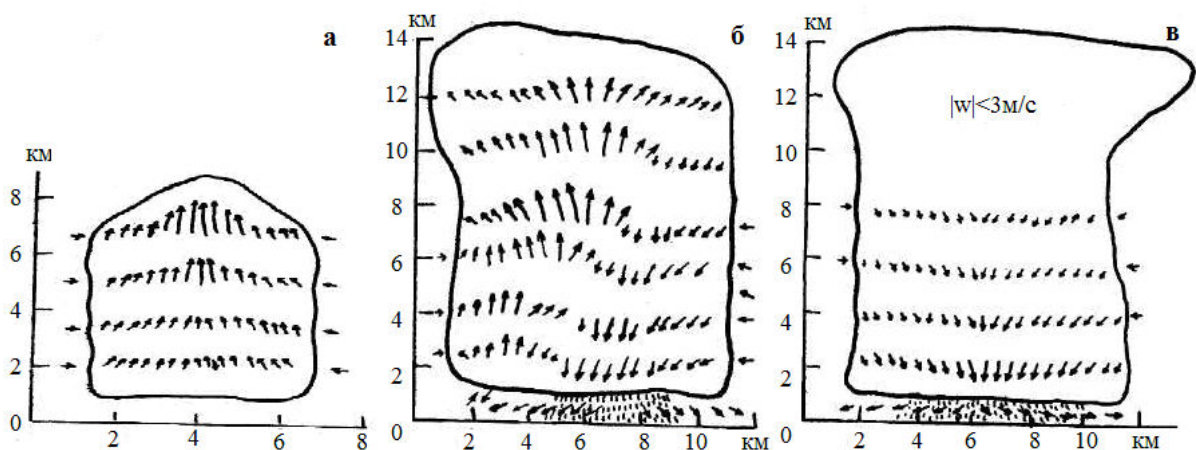
купчасто-дощові з ковадло *Cb inc*. Купчасто-дощові хмари складаються з одного або декількох конвективних осередків. Конвективний осередок включає область висхідного та компенсаційного низхідного потоків. Життєвий цикл осередку поділяють на три стадії в залежності від переважних напрямків вертикального руху повітря та його інтенсивності.

1) стадія купчастої хмари – характеризується висхідними рухами в більшій частині осередку;

2) стадія зрілості – характеризується наявністю як висхідних, так і низхідних рухів;

3) стадія розпаду – характеризується слабкими низхідними рухами у більшій частині осередку.

У стадії купчастої хмари, коли висхідні рухи зумовлюють зростання хмари, через її бокові поверхні затягується повітря та змішується з повітрям у висхідному потоці (рис. 2.3).



а) стадія cumulus (стадія зростання),

б) стадія зрілості,

в) стадія дисипації

Рисунок 2.3 – Еволюція *Cb* за Байєрсом та Брейамом [3]

Оскільки рух вгору триває, відбувається концентрація великої кількості водяної пари й утворення крапель, а вище нульової ізотерми й кристалів. При відповідних умовах починають випадати опади, які стимулюють низхідні рухи, обумовлені в'язким опором повітря й охолодженням останнього при випаровуванні крапель. Це й є початком стадії зрілості хмари. Низхідний потік повітря досягає земної поверхні у виді відносно холодного ядра зони випадання дощу й розтікається над нею, змінюючи приземний напрямок вітру. На нижніх рівнях хмари низхідний потік напливає на висхідний і відтискує останній від області

його зародження. Після цього починається стадія розпаду осередку. Загасання висхідного руху приводить до послаблення й поступового зникнення компенсаційних низхідних рухів.

Електричні процеси і процеси утворення опадів нерозривні. В умовах ясного неба електричне поле нижніх шарів атмосфери направлене вниз, це означає, що земна поверхня має від'ємний заряд, а сумарний заряд в атмосфері – додатний. Напруженість вертикального електричного поля додатна біля земної поверхні. Середнє її значення по земній кулі 120 В/м, над океанами – близько 130 В/м, над промисловими містами набагато більше – 300 В/м. Над сушею іонізація нижніх шарів відбувається за рахунок розпаду радіоактивних речовин повітря і земної кори, над океаном – космічне випромінювання.

Електропровідність повітря забезпечується рухливістю іонів і пропорційна їх концентрації. Провідність додатних іонів більша, ніж від'ємних. Рух додатних іонів вниз, а від'ємних – вгору під дією електричного поля ясного неба складає направлений вниз струм провідності, який прагне нейтралізувати від'ємний заряд землі. Заряд землі майже незмінний, що свідчить про процес його постійного відновлення.

Грозові хмари – це системи із зворотним зв'язком, в яких зміни фізичних параметрів гідрометеорів (концентрація, розмір, фазовий стан) викликають зміни електричних параметрів (зарядів електричного поля) і навпаки. Формування заряджених областей в хмарі відбувається під дією висхідних потоків і гравітаційних сил. Крупні краплі, падаючи, переносять вниз додатний заряд, захоплюючи за собою центр додатного заряду; разом з ним поступово опускається і центр від'ємного заряду (рис. 2.4).

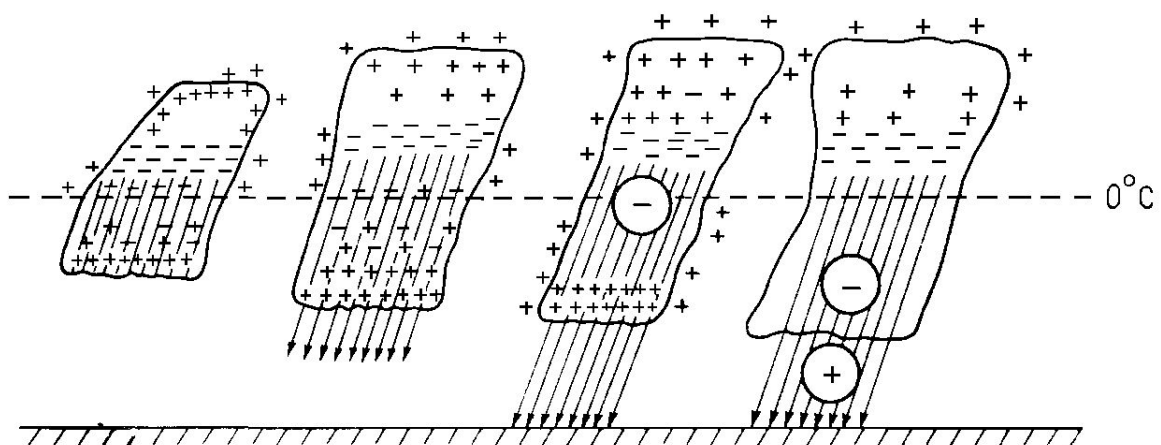


Рисунок 2.4 – Схема розвитку грози І.М. Імянітова [3]

Утворенню заряджених областей в хмарах передують процеси, визначальні до електризації хмарних частинок і гідрометеорів.

Якщо процеси електризації в хмарах протікають достатньо інтенсивно і тривалий час, можливе накопичення зарядів грозової хмари, між якими виникають сильні електричні поля, що приводять до розряду блискавок.

До електризації хмар можуть привести наступні процеси:

1. *Зарядження крапель в середовищі іонів* – захоплення хмарними краплями іонів призводить до заряду краплі, причому за рівної кількості від'ємних і додатних іонів краплі заряджаються від'ємно (через різну рухливість іонів).

2. *Електризація при контакті льодяних частинок* – при контакті відбувається обмін електронами та іонами до настання електричної рівноваги. При швидкому розриві контакту відбувається порушення рівноваги, яка викликає виникнення різниці потенціалів. В природних умовах контакт льодяних частинок здійснюється за наявності тертя. Знак та інтенсивність при цьому залежить від хімічного складу речовини, властивостей поверхні, температури, вологості повітря і т.п. В грозових хмарах процес зіткнення льодяних частинок за відсутності переохолоджених крапель спостерігається тільки у верхній частині хмари.

3. *Електризація при замерзанні води і розчинів* – між рідкою і твердою фазами утворюється різниця потенціалів, залежна від швидкості кристалізації та особливостей речовини. На величину заряду впливає різниця потенціалів між рідкою і твердою фазою розчину і умови відриву краплі.

4. *Електризація при руйнуванні замерзаючих крапель води* – виникають електричні заряди, при вибуху краплі дрібні осколки заряджаються від'ємно, а частина краплі, що залишилася, набуває додатного заряду.

5. *Електризація при зіткненні крупних льодяних частинок з краплями і льодяними переохолодженими кристалами* спостерігається в області як сухого, так і мокрого зростання льодяних частинок. Найінтенсивнішим є механізм електризації при одночасному зіткненні льодяних частинок і переохолоджених крапельок з поверхнею льоду. Механізм комплексний, тому знак та інтенсивність заряду залежать від співвідношення процесів.

6. *Балоелектричний ефект* – електризація при руйнуванні води. Виникає при зіткненні крупних крапель одна з одною, руйнуванні крупних крапель при падінні, таненні градин і відриві від них крапель, викиданні з них бульбашок повітря, зіткненні градин і льодяної крупки з крупними краплями і т.п.

7. *Електризація при спонтанному руйнуванні крапель при падінні* – крупні фрагменти завжди заряджаються додатно, дрібні – від'ємно.

8. *Електризація при руйнуванні крапель, які стикаються з твердими тілами (наприклад, крапель з градинами)* – інтенсивність електризації залежить від розмірів крапель і від швидкості краплі у момент зіткнення.

9. *Електризація при руйнуванні повітряних бульбашок на поверхні води і при таненні льоду* – процес, можливий при підйомі крупних крапель в купчастій хмарі, їх переохолодженні і замерзанні вище рівня $0,0^{\circ}\text{C}$ (повітря виділяється у вигляді бульбашок); при падінні граду або сніжинок нижче $0,0^{\circ}\text{C}$, коли звільнюється повітря, що міститься в льоді. Льодяні частинки при таненні набувають додатного заряду, величина якого велика. Бульбашки повітря, виходячи на поверхню і руйнуючись, відносять з собою від'ємний заряд. Величина заряду залежить від чистоти льоду, чим чистіший лід, тим більший заряд.

В основі всіх механізмів електризації лежать процеси, які призводять до первинного розділення зарядів.

Із-за різної реакції крапель на дію гравітаційних, електричних або аеродинамічних сил можуть відбуватися їхні зіткнення. При цьому краплі можуть зливатися. Зливання крапель при їх падінні називають коагуляцією. Одним з основних ефектів, із перелічених вище, є гравітаційний ефект, який приводить до падіння крапель різних розмірів з різною швидкістю. Відношення числа зливань до числа зіткнень називається коефіцієнтом злиття. Коагуляційне зростання крапель визначається коефіцієнтом захоплення, який дорівнює добутку коефіцієнтів зіткнення і злиття. Крім сили ваги, під дією якої краплі різних розмірів мають різну швидкість падіння, що приводить до гравітаційної коагуляції, існують й інші фізичні механізми, які обумовлюють злиття крапель. В залежності від характеру цих механізмів розглядають броунівську, турбулентну електростатичну та інші види коагуляції. У природі ці ефекти діють одночасно з гравітаційною коагуляцією. Причиною броунівських рухів крапель у хмарі є зіткнення їх з молекулами повітря. Крім броунівських рухів крапель на інтенсивність коагуляції впливають і електричні сили, що діють на краплі. Така коагуляція, як зазначалося вище, носить назву електростатичної. Вона обумовлюється або взаємодією частини крапель, які несуть на собі електричний заряд, або взаємодією крапель з електричним полем, якщо воно відрізняється від нуля.

Краплі води і кристали льоду, які випадають з хмар на земну поверхню, називають опадами. Процес розвитку хмар та утворення опадів з якісної сторони можна розділити на дві стадії.

Опади, що випадають на земну поверхню насамперед можна розділити на тверді, рідкі та змішані.

До твердих опадів відносяться такі основні їхні форми:

1. Сніг – опади у вигляді кристалів (сніжинок) різноманітної форми, найчастіше у формі зірочок, які часто об'єднуються в пластівці великого розміру. Спостерігається велика різноманітність форм сніжинок: голки, стовпчики, пластинки; голчаті зірки; пластинчаті зірки; їжаки, які складаються з декількох стовпчиків; стовпчики з пластинками або зірками на кінцях тощо.

Розміри окремих сніжинок можуть бути дуже різними. Найбільші лінійні розміри мають голчаті зірки. Їхні радіуси можуть досягати 4-5 мм. У змішаних хмарах часто спостерігається обзернення сніжинок. Воно є результатом замерзання переохолоджених крапель при співвударах з сніжинкою. Така частка має матовий відтінок. Пластівці снігу можуть мати різні розміри: від 0,5 мм до 5 см. Спостерігались пластівці з радіусом до 15-20 см.

Пластівці снігу – це часте явище. Вони спостерігаються у 14% випадків при слабких і в 92% випадків при сильних снігопадах. Утворенню снігових пластівців сприяють відносно висока температура повітря, велика густота снігопаду, великі відстані, що проходять сніжинки при падінні, та інші фактори.

2. Мокрий сніг – опади у виді сніжинок і крапель або сніжинок, які тануть. Сніг стає мокрим, коли поблизу від земної поверхні температура близька до 0 °C або ще вищою.

3. Крупа – це опади, які складаються з льодяних часток і дуже обзернених сніжинок. Частинки крупи мають радіус від часток міліметрів до 7,5 мм. Крупа утворюється шляхом замерзання переохолоджених крапель води й обзернення сніжинок.

У залежності від співвідношення між сніговою та льодяною фракціями крупи, цей вид опадів підрозділяють на снігові зерна, снігову й льодяну крупу.

4. Град – частки кулястої форми з льодяними прошарками різної густини. Розміри граду можуть бути дуже різними: його радіус найчастіше буває від 1 до 25 мм. Але інколи випадають частки граду з радіусом до 15 см і навіть більшим. Великі частки граду мають шарувату будову. У центрі розташовується матове біле ядро, яке схоже на снігову крупу. Ядро обтягується шаром прозорого льоду. Далі йдуть поперемінно непрозорі й прозорі шари льоду.

Град утворюється в купчасто-дощових хмарах у результаті злиття переохолоджених крапель води з частками крупи й їх замерзання.

Рідкі опади складаються з таких форм:

1. Дощ – рідкі водяні опади у формі крапель з радіусом більшим 0,25 мм. Як показують спостереження, крапель більших ніж 2,5-3,2 мм, не зустрічається, оскільки великі краплі сплющуються й розбиваються на декілька дрібних. Переважні радіуси бризок дорівнюють 0,75-1 мм.

Швидкість падіння крапель дощу досягає 8-10 м/с. Дощ випадає з шарувато-дощових (Ns) і купчасто-дощових (Cb), а іноді й з високошаруватих (As) хмар.

2. Мряка – однорідні опади, що складаються з дрібних крапель, радіусом, меншим за 0,25 мм. Вони майже не мають спрямованого руху. Створюється враження, що краплі мряки плавають у повітрі. Мряка випадає з шаруватих (St) і шарувато-купчастих (Sc) хмар. Краплі мряки інколи утворюються в густому тумані. Інтенсивність опадів у випадку мряки не перевищує 0,25 мм/ч, швидкість падіння крапель у нерухомому повітрі менша за 0,3 м/с.

Класифікацію за формою називають морфологічною. Існує ще генетична класифікація опадів, тобто класифікація за фізичними умовами утворення. Відповідно до цієї класифікації опади підрозділяються на такі види:

1. Обложні опади – це тривалі й розповсюдженні на великі площі опади середньої інтенсивності, які випадають із хмар системи $As - Ns$ у вигляді дощу або снігу, іноді мокрого.

2. Зливові опади – опади, які випадають з купчасто-дощових хмар у вигляді дощу, снігу, крупи, граду. Вони раптово починаються й закінчуються. Інтенсивність цих опадів різко змінюється за часом. Зливові опади часто супроводжуються грозами та шквалами.

3. Мрячні опади – це опади, які випадають з густих шаруватих і шарувато-купчастих хмар. Вони утворюються у стійко стратифікованих повітряних масах. При від’ємних низьких температурах такі хмари дають опади у формі льодяних кристалів.

ЛІТЕРАТУРА

[1], с. 37-122.

ПИТАННЯ ДО САМОПЕРЕВІРКИ

1. Які процеси сприяють утворенню шарувато-подібних хмар. Як впливає турбулентність на процес утворення?
2. Що таке загальний вологовміст атмосфери?
3. Дайте характеристику фазового стану шаруватоподібних хмар, розмірам хмарних часток, вогності та їх змінювання з висотою.
4. Які умови сприяють утворенню хвильоподібних хмар?
5. Які осередки називаються закритими, які – відкритими?
6. Які процеси приводять до утворення купчастої хмарності?
7. Класифікація купчасто-дощових хмар за даними радіолокаційних вимірювань.
8. Наведіть основні параметри одноосередкових, багатоосередкових та суперосередкових хмар.

9. Електричні процеси у хмарах.
10. Характеристика стану атмосфери “доброї погоди”.
11. Процеси електризації у грозовій хмарі.
12. Умови формування грозової електрики.
13. Дайте визначення коефіцієнтам зіткнення, злиття та захоплення.
14. Аеродинамічні умови зіткнення крапель.
15. Механізм гравітаційної коагуляції.
16. Механізм турбулентної коагуляції.
17. Механізм броунівської коагуляції.
18. Механізм гідродинамічної та градієнтної коагуляції.
19. Механізм електричної коагуляції.
20. Механізм акустичної коагуляції.
21. Від чого залежить швидкість падіння хмарних частинок у повітрі.
22. Основні сили, діючі на хмарну частинку.
23. Генетична класифікація опадів.
24. Морфологічна класифікація опадів.
25. Характеристики опадів у тропіках.

2.3 Повчання по вивченню практичної частини курсу

Наведені нижче практичні змістовні модулі повинні бути виконані студентами під час аудиторних занять. Оцінювання результатів виконання практичних змістовних модулів проводиться за такими критеріями: практичний змістовний модуль (у % від кількості балів, виділених на неї, із заокругленням до цілого числа). Максимальна кількість балів, яку може одержати студент при виконанні програми практичних занять становить 60 балів.

0%	завдання невиконане;
1-59%	завдання виконане частково та містить суттєві помилки методичного або розрахункового характеру;
60-73%	завдання виконане повністю, але містить суттєві помилки у розрахунках або у методиці;
74-89%	завдання виконане повністю і вчасно, проте окремі несуттєві недоліки (розмірності, висновки, оформлення);
90-100%	Завдання виконане правильно, вчасно і без зауважень.

2.3.1 Повчання по виконанню практичного змістовного модулю
блоку змістовних модулів «Фізика хмар та опадів»

Завдання №1

**ТЕМА: Зростання часток у переохолоджених шаруватоподібних
хмарах.**

Короткі теоретичні відомості.

В задачі розглядаються механізми перетворення хмарних часток в частки опадів та їх залежність від параметрів хмари. Для типового розподілу температури і вологості виконуються розрахунки зростання крапель та льодових часток під час падіння крізь хмару. Зростання крапель у хмарі визначається двома механізмами – конденсацією (сублімацією) та коагуляцією:

$$\frac{dr}{d\tau} = \left(\frac{dr}{d\tau} \right)_{\text{конд}} + \left(\frac{dr}{d\tau} \right)_{\text{коаг}}. \quad (1.1)$$

Конденсаційне зростання крапель:

де
$$\left(\frac{dr}{d\tau} \right)_{\text{конд}} = \frac{D}{r_g} \frac{\rho_{\text{вх}}}{\rho_g} \frac{\mu}{M} \frac{E_g}{p} (f-1) \frac{\phi(\text{Re})}{1+\chi_g}, \quad (1.2)$$

$$\phi(\text{Re}) = 1 + 0,24\sqrt{\text{Re}}, \quad (1.3)$$

$$\chi_g = \frac{D\mu^2 L^2 \rho_{\text{вх}} E_g}{k N_A M T^2 \lambda p}, \quad (1.4)$$

r_g – радіус краплі; τ – час; D – коефіцієнт молекулярної дифузії пари; ρ_g , $\rho_{\text{вх}}$, μ , M – густина і молярні маси води та повітря відповідно; E_g – тиск насиченої водяної пари над водою; p – атмосферний тиск; f – відносна вологість у хмарі; k – стала Больцмана; N_A – число Авогадро; $\phi(\text{Re})$ – безрозмірний коефіцієнт вентиляції; Re – число Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{2r_g V(r_g)}{\nu}, \quad (1.5)$$

$V(r_g)$ – швидкість падіння краплі у повітрі; λ, ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості та коефіцієнт теплопровідності повітря.

Швидкість падіння $V(r_g)$ може бути розрахована:

$$V(r_g) = 9,6(1 - \exp(-1200r_g))(1 - \exp(-12000r_g))\phi(z). \quad (1.6)$$

Множник $\phi(z)$ враховує зміни швидкості падіння крапель з висоти, пов'язані зі змінами густини повітря:

$$\phi(z) = \sqrt{\rho_{\text{вх.н}} \rho_{\text{вх}}(z)}, \quad (1.7)$$

ρ – густина повітря при нормальних умовах ($p=1013,6 \text{ гПа}$, $T=293 \text{ К}$).

Коагуляційне зростання крапель:

$$\left(\frac{dr_g}{d\tau}\right)_{\text{коаг}} = \frac{(r_g, r')V(r_g)q}{4\rho_g}, \quad (1.8)$$

де q – водність хмари, $E(r_g, r')$ – коефіцієнт захоплення краплею радіуса r крапель радіусом r' (при $r' < r_g$). Рівняння до зростання крапель:

$$d\tau = \frac{dz}{\omega - V(r_g)}. \quad (1.9)$$

Для шаруватоподібних хмар значенням ω можна знехтувати порівнюючи зі $V(r_g)$, при цьому для краплі, яка падає, $dz < 0$. Водність хмар:

$$\bar{q} = q_0 + B(\bar{T} - 273), \quad (1.10)$$

де $q_0 = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ кг} / \text{м}^3$ – середня водність хмари при $t = 0^\circ \text{C}$;

$B = 0,75 \cdot 10^{-5} \text{ кг} / (\text{м}^3 \cdot \text{К})$ – коефіцієнт пропорційності.

Розглянемо два випадки:

а) Парціальний тиск водяної пари змінюється на de при $T = \text{const}$. Тоді, якщо V_1 – об'єм який займає кожна молекула у фазі пари, то змінення її вільної енергії дорівнює [9]:

$$d\Phi_1 = V_1 de.$$

Для такого ж змінення тиску у рідкій фазі змінення вільної енергії кожної молекули буде

$$d\Phi_2 = V_2 de,$$

де V_2 – об'єм, що займає кожна молекула у рідкій фазі.

Звідси

$$d(\Phi_1 - \Phi_2) = (V_1 - V_2)de \approx V_1 de.$$

Отже,

$$d(\Phi_1 - \Phi_2) = \frac{kT}{e} de, \quad (1.11)$$

де k - стала Больцмана.

Інтеграл диференціального рівняння (1.11) є

$$\Phi_1 - \Phi_2 = kT \ln e + c. \quad (1.12)$$

Довільну сталу c визначимо при такій умові: нехай $e = E$ - тиск насиченої пари над плоскою поверхнею сконденсованої води, тоді $\Phi_1 = \Phi_2$ і $c = -kT \ln E$.

Таким чином,

$$\Phi_1 - \Phi_2 = kT \ln \frac{e}{E} \quad (1.13)$$

і, якщо урахувати рівняння (1.11), маємо

$$r_{kp} = \frac{2\sigma\mu}{\rho_k NkT \ln \frac{e}{E}}. \quad (1.14)$$

Оскільки $Nk = R^*$ - універсальна газова стала, а $\frac{R^*}{\mu} = R_n$ - питома газова стала водяної пари, то

$$r_{kp} = \frac{2\sigma}{\rho_k R_n T \ln \frac{e}{E}}. \quad (1.15)$$

Рівняння (1.15) називається рівнянням Фолмера-Гіббса.

б) Нехай при $e = const$ температура змінюється на dT . Тоді

$$d(\Phi_1 - \Phi_2) = -\frac{L}{T} dT, \quad (1.16)$$

де L - питома теплота конденсації (пароутворення).

Проінтегруємо диференціальне рівняння (1.16) від T_H до T , де T_H - температура насичення. Будемо мати:

$$\Phi_1 - \Phi_2 = L \ln \frac{T_H}{T}. \quad (1.17)$$

Комбінуючи формули (1.11) і (1.17) отримаємо:

$$r_{kp} = \frac{2\sigma\mu}{\rho_k N L \ln \frac{T_H}{T}}. \quad (1.18)$$

Формули (1.15) і (1.18) показують, що для утворення нової фази обов'язково треба перейти метастабільну границю, тобто необхідно або пересичення $e > E$, або переохолодження $T_H > T$.

Порядок виконання роботи

1. Для заданих у табл. 2.1 варіантів розрахувати утворення нової фази за формулою 1.15.
2. Для заданих у табл. 2.1 варіантів розрахувати утворення нової фази за формулою 1.18.
3. Зробити аналіз отриманих результатів.

Таблиця 2.1 – Варіанти вихідних даних

№	t_1	t_2	t_3	$(E_r/E)_1$	$(E_r/E)_2$	$(E_r/E)_3$	t
1	17,0	-2,0	-27,0	3	7	8	22,0
2	6,0	-6,0	-19,0	4	6	9	18,0
3	20,0	-4,0	-24,0	2	4	6	28,0
4	11,0	-9,0	-35,0	4	8	9	14,0
5	14,0	-4,0	-14,0	5	7	9	26,0
6	15,0	7,0	-3,0	2	4	7	18,0
7	9,0	1,3	-7,8	3	5	10	7,0
8	23,0	18,5	10,2	2	6	9	3,0
9	5,0	-2,0	-10,0	4	8	10	20,0
10	11,0	5,4	-12,0	3	5	8	16,5
11	14,0	2,0	-14,0	2	3	7	17,5
12	22,0	11,0	-13,0	3	4	5	22,0
13	7,0	-2,3	-20,0	4	6	8	15,0
14	8,0	-15,0	-30,0	2	7	9	10,0
15	23,0	12,0	-15,0	3	6	10	12,0

Звітність: Практичне завдання оформити відповідно до порядку виконання та здати викладачу.

Завдання №2

ТЕМА: Мікрофізичні характеристики хмар.

Короткі теоретичні відомості.

При від'ємних температурах завжди існує імовірність замерзання переохолоджених крапель у хмарах і появлення кристалів. Якщо ця

імовірність дуже мала, то відповідно малою є концентрація цих кристалів. За таких умов вплив їх на властивості хмар і на характер процесів, що відбуваються у хмарах, нехтовно малий. Існуючими методами вимірювань буває дуже важко навіть виявити наявність кристалів у хмарі. Такі хмари називають краплинними.

У активній стадії розвитку хмар, коли присутні висхідні токи, які забезпечують приплив надлишкової вологи, змішана хмара може існувати необмежений час, якщо стік водяної пари на кристали не перевищує її припливу.

Спектр розмірів крапель хмари може дуже змінюватись у границях однієї й тієї ж хмари. У деяких випадках у хмарах зустрічаються об'єми, у котрих кількість крапель настільки мала, що вони сприймаються спостерігачем як сухі об'єми. Такі об'єми хмари називають хмарними кавернами. У той же час емпіричні спектри, осереднені по великій кількості проб, виявляються досить стійкою характеристикою і її часто у діапазоні $[r_{\min}, r^*]$ описують відповідною функцією, яка називається функцією щільності розподілу крапель за розмірами $f(r)$. Як показали дослідження, середні радіуси крапель залежать від форм хмар. Так, у конвективних хмарах середні значення радіусів більші, ніж у шаруватих. Крім того, в купчастих хмарах велике значення має локалізація об'єму хмари, у якому проводиться вимірювання.

У середньому в континентальних краплинних хмарах концентрація крапель $N(r > r_{\min})$ дорівнює $200 - 600 \text{ см}^{-3}$, а в морських хмарах – у 5-10 разів менша. Але у хмарах концентрація хмарних елементів має велику просторову мінливість: в окремих об'ємах хмари, лінійні розміри яких складають десятки метрів, концентрація крапель може у десятки разів бути меншою або у декілька разів більшою. Концентрації різко збільшуються при підйомі у границях декількох десятків метрів над нижньою основою хмари. Досягнувши максимуму, концентрація трохи зменшується з висотою і стає у 1,5-2 рази менше максимальної біля верхньої границі хмари, поблизу якої різко падає до нуля.

Водність хмар залежить від багатьох факторів й має різне значення навіть у різних частинах однієї хмари. Коливання водності у горизонтальному напрямку визначається відповідними коливаннями розподілу крапель по розмірах й їхніх концентрацій. Але змінювання її у вертикальному напрямку підлягає визначеним закономірностям. Як і розподіл крапель за розмірами та концентрація, водність характеризується значною мінливістю. Коливання її тим більші, чим менший масштаб осереднення. Якщо провести осереднення водності по горизонтальних масштабах 10 м, то довжини однорідних лінійних ділянок, тобто ділянок, на протязі яких водність зменшується не більше

ніж удвічі, коливаються від 0,5...0,7 км до декількох кілометрів. У хмарах St , Sc , Ac і Cs вони досягають 0,5...1,5 км, у хмарах As - Cs - удвічі більші, у хмарах Ns - 1,0...2,0 км.

Порядок виконання роботи

1. За вихідними даними в залежності від варіанта (табл. 2.2) визначити середній арифметичний, середній квадратичний, середній кубічний та модальний радіуси крапель.
2. Зробити аналіз отриманих результатів.

Таблиця 2.2 – Варіанти вихідних даних

1	r, мкм	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
	n, см ⁻³	40	35	20	12	8	6	4	2	2	2
2	r, мкм	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
	n, см ⁻³	36	38	26	20	15	10	8	6	4	2
3	r, мкм	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
	n, см ⁻³	38	34	30	28	26	22	20	17	10	6
4	r, мкм	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
	n, см ⁻³	36	34	30	28	24	20	14	10	6	2
5	r, мкм	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
	n, см ⁻³	35	32	28	26	24	22	20	16	12	8
6	r, мкм	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
	n, см ⁻³	30	28	26	24	20	18	16	12	6	2
7	r, мкм	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
	n, см ⁻³	36	30	26	24	20	16	14	10	6	4
8	r, мкм	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
	n, см ⁻³	35	31	29	26	21	17	12	8	6	1
9	r, мкм	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
	n, см ⁻³	39	35	30	22	18	16	10	7	5	3
10	r, мкм	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
	n, см ⁻³	40	36	32	30	26	22	16	10	6	2
11	r, мкм	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
	n, см ⁻³	30	28	25	23	20	17	15	10	5	1
12	r, мкм	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
	n, см ⁻³	28	25	20	19	13	10	8	6	4	2
13	r, мкм	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
	n, см ⁻³	42	36	34	30	27	25	21	18	10	6
14	r, мкм	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
	n, см ⁻³	32	28	25	20	16	13	11	8	6	4
15	r, мкм	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
	n, см ⁻³	34	31	27	24	22	20	16	10	5	2

Звітність: Практичне завдання оформити відповідно до порядку виконання та здати викладачу.

3 ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ ТА ВМІНЬ СТУДЕНТІВ

3.1 Методика оцінки всіх видів підготовки студентів

Кредитно-модульна система оцінки знань, вмінь та навичок передбачає розподіл програми навчальної дисципліни «Прикладна метеорологія» (блок змістовних модулів «Фізика хмар та опадів») на структурно-логічні завершені змістовні модулі, що оцінюються певною кількістю балів.

Чотири змістових модуля: два з теоретичної частини курсу – ЗМ–Л1, ЗМ–Л2 та два з практичної частини – ЗМ–П1, ЗМ–П2. Види завдань та кількість балів, що нараховані за їх вчасне виконання, додаються у такій таблиці:

№ п/п	Види завдань, за які нараховуються бали	Максимальна кількість балів, яка може бути нарахована змістовні модулі
Теоретичний змістовий модуль №1 блоку змістовних модулів «Фізика хмар та опадів»		
1	Контрольна робота №1: «Фізика формування рідких та твердих фаз води в атмосфері».	20
Теоретичний змістовий модуль №2 блоку змістовних модулів «Фізика хмар та опадів»		
2	Контрольна робота №2: «Хмари. Атмосферна електрика. Опади».	20
	Загальна сума по теоретичним модулям	40
Практичний змістовий модуль №1 блоку змістовних модулів «Фізика хмар та опадів»		
1	Практична робота №1: «Зростання часток опадів в переохолоджених шаруватих хмарах»	30
Практичний змістовий модуль №2 блоку змістовних модулів «Фізика хмар та опадів»		
2	Практична робота №2: «Мікрофізичні характеристики хмар»	30
	Загальна сума по практичним модулям	60
Загальна кількість балів з дисципліни		100

Форма контролю рівня засвоєння змістових модулів (ЗМ):

- опитування під час практичних та лекційних занять;
- розв'язування задач під наглядом викладача в аудиторії;
- письмові контрольні роботи з теоретичної частини.

Сума отриманих балів складається з суми виконаних своєчасно контрольних заходів. Максимальна сума балів, яку може набрати студент, складає 100 балів, з них по теоретичному курсу – 40 балів, по практичній частині – 60 балів. При проведенні атестації студент вважається атестованим, якщо він набрав $\geq 60\%$ від максимальної суми балів за модулями, які затверджені на момент атестації.

Блок змістовних модулів «Фізика хмар та опадів», закінчується заліком і студенти пишуть залікову роботу, а інтегральна оцінка (В) розраховується за формулою:

$$B = 0,75 \times OZ + 0,25 \times OZKP,$$

де ОЗ – кількісна оцінка (у відсотках від максимально можливої) за змістовними модулями;

ОЗКР – кількісна оцінка (у відсотках від максимально можливої) залікової контрольної роботи.

ЗКР проводиться на останньому занятті за тестами відкритого типу оцінки знань базової компоненти навчальної дисципліни і кожний білет складається з 20 запитань. Студент, який не має на початок заліково-екзаменаційної сесії заборгованості, отримує якісну оцінку («зараховано» або «не зараховано»), якщо має на останній день семестру інтегральну суму балів поточного контролю достатню суму (60%) та більше для отримання позитивної оцінки, та не менше 50% від максимально можливої суми балів за залікову контрольну роботу.

Оцінка за шкалою ECTS виставляється відповідно наведеної таблиці:

Сума балів	Оцінка ECTS	Оцінка за національною шкалою	
		екзамен	залік
90-100	A	відмінно	зараховано
82-89	B	добре	
74-81	C		
64-73	D	задовільно	
60-63	E		
35-59	FX	незадовільно	не зараховано
1-34	F	незадовільно	не зараховано

Шкала переходу до якісної 4-бальної системи оцінювання

За шкалою ECTS	За національною системою	Визначення	За системою університету (у відсотках)
A	5 (відмінно)	Відмінне виконання лише з незначною кількістю помилок	90-100
B	4 (добре)	Вище середнього рівня з кількома помилками	82-89,9
C	4 (добре)	В загальному правильна робота з певною кількістю грубих помилок	74-81,9
D	3 (задовільно)	Непогано, але зі значною кількістю помилок	64-73,9
E	3 (задовільно)	Виконання задовольняє мінімальні критерії	60-63,9
FX	2 (незадовільно)	З можливістю перескласти	35-59,9
F	2 (незадовільно)	З обов'язковим повторним курсом навчання	1-34,9

3.2 Перелік базових знань та вмінь

Узагальнюючи інформацію, що викладена в підпунктах 2.1 та 2.2, можна навести повний перелік базових знань та вмінь з дисципліни «Прикладна метеорологія» (блок змістовних модулів «Фізика хмар та опадів»):

1) Змістовний лекційний модуль № 1 «Фізика формування рідких та твердих фаз води в атмосфері»:

- будова молекул водяної пари;
- сили, які призводять до об'єднання молекул водяної пари у комплекси;
- нестійкі та стійкі комплекси молекул водяної пари
- фізичні механізми, які приводять до конденсації атмосферної водяної пари;
- моделювання умови створення крапель опадів.

2) Змістовний лекційний модуль № 2 «Хмари. Атмосферна

електрика. Опади»:

- кінематика формування, зростання та випаровування крапель і кристалів у хмарах;
- формування опадів та динаміку атмосферних конвективних рухів;
- динаміка формування хмар шаруватих та купчасто-дощових форм;
- структура полів метеорологічних величин у зоні хмар і туманів;
- механізм утворення грози;
- розраховувати зростання крапель та граду у потужних купчасто-дощових хмарах.