

Б.Н. Лєсков

ФІЗИЧНІ УМОВИ УТВОРЕННЯ ШТУЧНИХ КРИСТАЛІЧНИХ ХМАР ТА ЇХ ЧАСОВА СТАБІЛЬНІСТЬ

Проаналізовано серію експериментів зі штучного утворення кристалічних хмар. Показано, що ймовірність позитивного результату збільшується з ростом перенасичення водяної пари відносно льоду. Стабільні в часі штучні кристалічні хмари утворюються на більших висотах (понад 5 км) за низьких температур ($t < -20^{\circ} \text{C}$).

Ключові слова: активні впливи на атмосферні процеси, штучні кристалічні хмари, твердий CO_2 .

Вступ

Відомо, що кристалики льоду в атмосфері можуть існувати за умови, коли пружність водяної пари відповідає пружності насичення над поверхнею льоду або вище її. В атмосфері можна знайти шар, в якому за від'ємних температур виконується ця вимога, але як крапельні, так і кристалічні хмари там відсутні. Є фізичні підстави для припущення, що вплив на ці шари атмосфери твердим діоксидом вуглецю (CO_2) або йодистим сріблом (AgI) може призвести до утворення кристалів льоду, тобто кристалічних хмар. Це було показано Орром, Фрезером і Петі в канадських експериментах і Шефером у США [1, 2].

Мета цієї роботи – дослідити фізичні умови, за яких в атмосфері можна створювати штучні кристалічні хмари.

Матеріали та методи дослідження

У роботі використано матеріали літакових експериментів, проведених на експериментальному метеорологічному полігоні (ЕМП) Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту (УкрНДГМІ). Впливи на вибрані шари атмосфери здійснювалися з використанням літаків ІЛ-14. Як реагент застосовували діоксид вуглецю, який у вигляді гранул (0,5-1,0 см) скидався в шарах атмосфери, де можна було очікувати утворення штучних кристалічних хмар. Для надійнішого отримання позитивних результатів було застосовано методику впливу, яка полегшувала знаходження таких зон. Вона полягала в тому, що

реагент вводився в атмосферу поблизу (до 10-30 км) хмарних шарів Sc, As, As з висоти верхньої межі цих хмар. В окремих експериментах впливи проводилися в умовах ясної погоди на рівні верхньої межі шару щільного серпанку, який легко знаходився візуально. Дозування твердого CO₂ в усіх експериментах було однаковим і складало 750 г/км.

Перед проведенням впливу здійснювалось вертикальне зондування шару атмосфери, де очікувались умови, сприятливі для утворення штучних кристаликів льоду. Основними фізичними параметрами атмосфери, які визначають результат експерименту, є відносна вологість, розрахована відносно поверхні льоду, та температура повітря.

Після проведення впливу визначався рівень (висота) утворення кристалічних хмар. Фізичні умови їх виникнення можна було з'ясувати після обробки даних зондування.

Температура й відносна вологість на рівні верхньої межі кристалічної хмари ($T_{вг}$, °C; $U_{вг}$, %) визначались інструментально в процесі зондування за допомогою літакового електрметеорографа. Відносна вологість по відношенню до льоду ($U_{л}$, %) розраховувалась за формулою:

$$U_{л} = \frac{e}{E_{л}} \cdot 100\% \quad (1)$$

де e – спостережена за даної температури пружність водяної пари; $E_{л}$ – пружність насичених парів над поверхнею льоду за даної температури.

Експерименти дозволили оцінити метеорологічні умови, за яких можливе утворення штучних кристалічних хмар. Фізичні параметри шарів атмосфери, в яких утворювались штучні кристалічні хмари, наведено в табл. 1.

Всього було проведено 19 експериментів. Аналіз даних табл. 1 показує, що впливи проводилися в широкому діапазоні фізичних умов. Температура повітря в зонах впливу змінювалась у межах від -4,7 °C (найвища температура) до -33,0 °C (найнижча температура), а рівні впливів від 1240 м до 6200 м. Здебільшого виконувалась умова пересичення (від 1 % до 15 %) до льоду (12 експериментів). У двох експериментах пересичення не було (0 %), а в п'яти випадках впливи проведено в зонах, де було недосичення відносно льоду (табл. 1).

Результати експериментів і характеристики штучних кристалічних хмар показано в табл. 2.

Таблиця 1

Фізичні умови утворення штучних кристалічних хмар

№ п/п	Дата	Н _в , м	Н _{вг} , м	ΔН, м	S, км	t _{вг} , °С	U _{вг} , %	U _{вгл} , %	ΔU _л , %	Форма кристалів
1.	16.12.1968	1660	1660	310	4,0	-13,2	85	101	+1	Пластинки, стовпчики
2.	27.02.1969	4270	4270	1250	4,8	-20,0	84	102	+2	Пластинки, стовпчики
3.	04.03.1969	4000	4000	300	4,5	-28,2	71	100	0	Зірочки, пластинки
4.	11.01.1970	3800	3800	400	3,3	-11,5	93	102	+2	Пластинки, іжачки, об. форми
5.	14.01.1970	3870	-	-	-	-9,5	85	94	-6	-
6.	18.01.1970	4990	5150	-	4,0	-20,7	94	115	+15	Пластинки, стовпчики
7.	25.01.1970	4300	4300	1100	5,2	-27,5	80	104	+4	Пластинки, об. форми
8.	26.01.1970	3830	3630	430	4,5	-19,9	88	108	+8	Пластинки, іжачки
9.	27.01.1970	1240	1140	-	2,0	-4,7	87	91	-9	Стовпчики, мало
10.	23.01.1971	4730	4850	-	3,5	-14,6	81	100	0	Пластинки
11.	24.01.1971	5190	-	-	-	-20,1	50	72	-28	-
12.	24.01.1971	5450	-	-	-	-22,5	64	85	-15	-
13.	24.01.1971	5800	5650	200	5,1	-24,7	65	94	-6	Пластинки
14.	03.02.1971	6200	6200 6900	1900	7,2	-33,0	86	112	+12	Пластинки
15.	22.12.1971	6180	6200	700	5,6	-23,3	84	103	+3	Пластинки
16.	23.01.1973	2300 3430	2300 3400	200 300	3,0 4,3	-6,9 -14,2	96 91	101 104	+1 +4	- ; пласт., стовпчики
17.	01.02.1973	4310	4300	400	5,1	-19,8	83	101	+1	Пластинки, зірк., стовп.
18.	03.02.1973	3030	3030	-	25,0	-12,9	94	102	+2	Стовпчики, зірочки
19.	25.02.1973	4730	4630 5250	-	5,5	-23,5	85	106	+6	Пластинки, зірочки

Примітки: Н_в – висота впливу (м); Н_{вг} – висота верхньої межі штучних кристалічних хмар (м); ΔН і S – товщина (м) і ширина (км) штучних кристалічних хмар відповідно; t_{вг} – температура на рівні верхньої межі; U_{вг} – відносна вологість (%) на рівні верхньої межі; U_{вгл} – відносна вологість (%) на рівні верхньої межі, розрахована відносно поверхні льоду; ΔU_л – пересичення відносно льоду (%)

Метеорологічні характеристики штучних кристалічних хмар

№ з/п	Дата	Ситуація на рівні впливу	Видимість через кристалічну хмару		Структура хмари	Час існування, год	Примітки
			землі	сонця			
1.	16.12.1968	Збоку – Sc	Видно	-	Суцільна, яскраве «нижнє» сонце, райдужні стовпи	>1,5	Від Sc довжина зони 12 км, далі кристалічної хмари нема
2.	27.02.1969	Ac trans, 1 бал	Видно слабо	Видно слабо	Суцільна, компактна	>3	Чітке гало
3.	04.03.1969	Ясно, верхня межа серпанку	Видно	Видно добре	Суцільна, але розріджена	1	Добре видно «нижнє» сонце
4.	11.01.1970	До 2-3 б. Ac trans	Не видно	Видно слабо	Суцільна, компактна	>2	
5.	14.01.1970	Під шаром As	-	-	-	-	Хмара не утворилася
6.	18.01.1970	As і безхмарна зона	Не видно	-	Суцільна	>1	У зоні є викиди до 100-150 м вище верхньої межі
7.	25.01.1970	Ясно. Верхня межа серпанку	Не видно	Слабо у вигляді тьмяної плями	Суцільна смуга	>1	Яскраве «нижнє» сонце, райдужні стовпи, гало
8.	26.01.1970	Ясно, поруч поле Ac	Видно	Видно добре	Суцільна	1,5	Яскраве «нижнє» сонце, яскраве гало і два вторинних сонця
9.	27.01.1970	Серпанок	Видно добре	Видно добре	Дискретна, 20-30% лінії впливу	0,3	Кристали хмари швидко випаровувались
10.	23.01.1971	Ясно, верхня межа серпанку	Не видно	-	Суцільна, компактна, рівна	0,8	Верхня межа хмари піднялась на 100 м. На хмарі – «нижнє» сонце

Продовж. табл.2

№ з/п	Дата	Ситуація на рівні впливу	Видимість через кристалічну хмару		Структура хмари	Час існування, год	Примітки
			землі	сонця			
11.	24.01.1971	Ясно. 600 м нижче верхньої межі серпанку	-	-	-	-	Хмара не утворилася
12.	24.01.1971	Ясно. 350 м нижче верхньої межі серпанку	-	-	-	-	Хмара не утворилася
13.	24.01.1971	Ясно, верхня межа серпанку	Видно добре	Видно добре	Дискретна, 30-40% лінії впливу	0,8	Верхня межа хмари за 30 хвилин знизилась на 150 м
14.	03.02.1971	Вплив у шарі слабких Cs trans	Не видно	Слабка тьмяна пляма	Суцільна. Піднялась на 500-700 м – на 200 м вище ВГ Cs	>3	Яскраве «нижнє» сонце, яскраве гало
15.	22.12.1971	На рівні Cs, 1-2 бали	Видно слабо	Видно добре	Суцільна, «нижнє» сонце, райдужні стовпи	>1	Хмара не змінювала свою висоту, під хмарою «virga»
16.	23.01.1973	As trans, 2-4 бали	-	-	-	-	-
	23.01.1973	As trans, 5 б	Місцями не видно	Видно	Суцільна, але на 50 % лінії впливу. Гало, «нижнє» сонце	1	Кристалічна хмара утворилась також на рівні As trans (на 1100 м нижче)
17.	01.02.1973	Кристалічні As trans	Не видно	Не видно	Суцільна, щільніша за навколишні As	>2	Вплив викликав підсилення (регенерацію, ущільнення) As trans
18.	03.02.1973	Рівень As trans, 2-3 бали	Не видно	Видно слабо	Суцільна	>2	Відбулось відновлення шару As. Засіяно 7 ліній
19.	25.02.1973	Рівень As trans, < 1 бала	Не видно	Не видно	Суцільна, «нижнє» сонце	>2	За одну годину смуга піднялась на 520 м

Експерименти, в цілому, за показником надійності утворення штучних кристалічних хмар, можна поділити на чотири групи:

1 – експерименти, в яких утворені кристалічні хмари вздовж лінії впливу були суцільними і настільки щільними, що крізь них не було видно землю (експерименти 4, 6, 7, 10, 14, 16, 17-19), а інколи (знизу) і сонця (експерименти 17, 19);

2 – випадки, коли штучні хмари утворювалися вздовж усієї лінії впливу (тобто були суцільними), але вони були менш щільними і через них (зверху) було видно землю (експерименти 1, 2, 3, 8, 15);

3 – експерименти, коли кристалічні хмари утворювались, але не були суцільними (були дискретними), займаючи 20-40 % лінії впливу (9, 13);

4 – випадки, коли кристалічні хмари не утворились (5, 11, 12).

Треба також відмітити, що рівні верхніх меж утворення кристалічних хмар розподілялись більш менш рівномірно відносно висоти впливу. У шести випадках висота верхніх меж штучних кристалічних хмар збіглася з рівнем польоту літака (1, 2, 3, 4, 7, 18). У п'яти експериментах верхня межа штучних кристалічних хмар була вищою за висоту впливу (6, 10, 14, 15, 19) і в п'яти випадках – нижчою (8, 9, 13, 16, 17).

Товщина кристалічних хмар була в межах від 200 до 1900 м. Кристалічні смуги утворювались зразу ж після засіву і потім розширювались зі швидкістю 1-2 м/с. Через 30-40 хв ширина смуг кристалізації досягала 3-5 км. У деяких експериментах тривалість стадії розширення зони кристалізації досягала 50 хв (2, 7, 13, 17) і навіть дещо перевищувала 60 хв (14, 15). Значення ширини зон були в межах від 2,0 до 7,2 км. На зонах кристалізації завжди спостерігалось «нижнє» сонце, а під час польотів нижче кристалічної хмари – райдужні стовпи, гало. Проби кристалів, взяті в штучних кристалічних хмарах, показали, що основною формою були пластинки (як шестигранні, так і трикутні). Часто спостерігались також стовпчики, зірочки, «їжачки». На рис. 1 показано фото кристалів у експерименті № 8 (26. 01. 1970 р.) через 20 хв після впливу. На світлині видно п'ять пластинчатих кристалів. Чорні цятки – частки атмосферного аерозолі, з яких складався серпанок, на який виконувався вплив.

Проаналізуємо результати експериментів у кожній з виділених вище чотирьох груп. У першій групі (9 експериментів) утворилися найщільніші

кристалічні хмари. Їх товщина була в межах 400-1900 м (середнє значення 790 м), а ширина змінювалась від 3,3 км до 7,2 км (середнє значення 4,8 км). Ці хмари не мали ознак розсіювання і зберігались більш ніж 1-3 год. Повну тривалість збереження цих хмар визначити не вдалось через технічні причини (ліміт пального). Середнє пересичення водяної пари відносно льоду в цих експериментах становило 5,1 % (з коливаннями від 0 до 15 %).

Розглянемо детальніше кожен із експериментів цієї групи. Перший з них було проведено 11 січня 1970 р. на висоті 3800 м з рівня верхньої межі As trans, яких по лінії впливу було близько 2-3 балів. Відносна вологість відносно льоду становила 102 % (пересичення 2 %). Температура повітря на рівні засіву була -11,5 °С. Засіяно одну лінію довжиною 20 км. У результаті впливу утворилася суцільна і щільна зона кристалізації (в шарі товщиною 400 м і шириною до 3,3 км).

Основна форма кристалів – пластинки, спостерігались також об'ємні форми та їжачки. Крізь хмару не було видно землю, а сонце знизу було видно дуже слабо у вигляді тьмяної плями. Таким чином, у результаті впливу утворився, по суті, елемент високо-шаруватих хмар (As), тобто відбулась регенерація шару хмар середнього ярусу. Протягом двох годин ознак розсіювання чи деградації штучної кристалічної смуги не було.

Другий експеримент проведено 18 січня 1970 р. на рівні верхньої межі As. При цьому вплив почався в шарі As (на ділянці довжиною близько 5 км), а далі засів вівся за ясного неба на тому ж рівні (ділянка довжиною 15 км). Утворена штучна кристалічна хмара мала ширину до 4 км. Товщина хмари не визначалась, бо не було можливості змінити висоту. Тоді спостерігалось найбільше пересичення водяної пари відносно льоду – 15 %, а температура на рівні впливу була -20,7° С. Основна форма кристалів – пластинки і стовпчики. Хмара стала підійматись і на 160 м перевищила рівень впливу. Крім того, з її верхньої межі місцями спостерігались викиди до 100-150 м. Крізь хмару землю не було видно. У цьому експерименті ми маємо справу з відновленням шару As. Ознак розсіювання хмари протягом однієї години не було.

Третій експеримент цієї групи проведено 25 січня 1970 р. в абсолютно ясному небі. Засів твердим CO₂ відбувався з рівня верхньої межі серпанку, де температура повітря і відносна вологість щодо поверхні льоду відповідно дорівнювали -27,5° С і 104 % (пересичення 4 %). По всій лінії впливу утворилася суцільна і щільна зона кристалізації – штучна

кристалічна хмара, яка складалась з пластинок і об'ємних форм кристалів. Спостерігались цікаві оптичні явища: яскраве «нижнє» сонце, райдужні стовпи, чітке гало з двома вторинними сонцями. Землю крізь хмару не було видно, а сонце виднілось слабо у вигляді невеликої плями. Товщина хмари становила 1100 м, а ширина – 5,2 км. Рівні верхніх меж серпанку і штучної хмари зійшлися. Протягом однієї години ознак деградації кристалічної смуги не спостерігалось.

Четвертий експеримент (23 січня 1971 р.) також було проведено в ясному небі на рівні верхньої межі серпанку (температура $-14,6^{\circ}\text{C}$, висота 4730 м, відносна вологість відносно поверхні льоду – 100 %, пересичення – 0 %). У результаті впливу утворилась суцільна, рівна штучна кристалічна смуга шириною 3,5 км, товщина не вимірювалась. Форми кристалів – пластинки. Землю крізь смугу не було видно. Ознак розсіювання хмари не спостерігалось протягом 50 хв.



Рис. 1. Фото кристалів в експерименті № 8 (26.01.1970 р.) через 20 хв після впливу

У п'ятому експерименті (3. 02. 1971 р.) засівався суцільний, але не щільний шар пір'ястошаруватих хмар (Cs) на висоті 6200 м ($t = -33,0^{\circ}\text{C}$, $U_{\text{л}} = 112\%$, $\Delta U_{\text{л}} = 12\%$). У результаті впливу в шарі Cs утворилася щільніша смуга з високою концентрацією кристалів. Вона розширялась

близько 1 год 10 хв, досягши ширини 7,2 км. Товщина цієї кристалічної смуги була 1900 м. На хмарі спостерігалось яскраве «нижнє» сонце, а також чітке гало (під час польоту на рівні нижньої межі хмари). Форма кристалів – пластинки (шестигранні і трикутні). Крізь природні Cs землю було видно відносно добре, сонце також, і воно давало чіткі тіні. Через смугу землю зовсім не було видно, а сонце (з рівня нижньої межі) було видно лише у вигляді слабкої тьмяної плями. Верхня межа штучно підсилених Cs була на 200 м вище ніж верхня межа навколишніх природних Cs.

Ще однією цікавою особливістю цієї штучної кристалічної смуги було те, що вона весь час піднімалась і за час спостережень піднялась на 700 м. Рівень її верхньої межі досяг 6900 м. Хмара й далі продовжила свій підйом і «втекла» від експериментаторів, оскільки літак ІЛ-14 вище вже не міг підніматись. Температура в центрі цієї кристалічної хмари була на $0,2 \div 0,4^\circ \text{C}$ вище, ніж на тих же рівнях у навколишніх Cs, під хмарою було видно смуги падіння кристалів («virga»).

Таким чином, у цьому експерименті відбулася регенерація шару Cs. Протягом 3-х годин штучна кристалічна хмара не тільки не виявила ознак розсіювання чи деградації, а навпаки, продовжувала розвиватись та ущільнюватись.

У шостому експерименті (23.01.1973 р.) лінія впливу була проведена в слабких As, яких було до 4-5 балів (висота 3430 м, температура $-14,2^\circ \text{C}$, відносна вологість 104 % щодо льоду, $\Delta U_{\text{д}} = +4 \%$). Цікаво, що було засіяно і нижчерозташований шар As trans (2-4 бали), верхня межа якого була на рівні 2300 м (температура $-6,9^\circ \text{C}$, $U_{\text{д}} = 101 \%$, $\Delta U_{\text{д}} = 1 \%$).

Кристалічна хмара утворилася суцільною, але тільки вздовж половини лінії впливу (видно далі не виконувалась умова пересичення відносно льоду). Кристали у хмарі були у вигляді пластинок і, зрідка, стовпчиків. Товщина хмари становила 300 м, а ширина 4,3 км, верхня межа на 30 м нижче від рівня впливу. На рівні нижніх As trans теж утворилась штучна кристалічна смуга товщиною близько 200 м. Ширина її досягла 3 км. З хмарою були пов'язані оптичні явища: чітке гало, «нижнє» сонце. Протягом однієї години ознак розсіювання хмари не спостерігалось. У цьому експерименті в зоні, де було пересичення відносно льоду, відбулася регенерація шару As.

Сьомий експеримент (01.02.1973 р.) було проведено в шарі As trans (висота 4310 м, температура $-19,8^\circ \text{C}$, відносна вологість щодо поверхні

льоду 101 %, $\Delta U_{\text{л}} = +1$ %). У результаті впливу в шарі кристалічних шарувато-високих хмар (As trans) утворилась смуга з суттєво вищою щільністю. Якщо крізь природні As trans було видно землю, то в зоні штучно ущільнених As землю не було видно зовсім. З-під смуги не було видно й сонця. Товщина і ширина смуги відповідно становили 400 м і 5100 м. Верхня межа смуги була на 10 м нижче від рівня засіву. Протягом більш ніж двох годин ознак деградації смуги не було. У цьому випадку ми маємо всі підстави констатувати, що вплив на розріджені As trans призвів до регенерації природних хмар.

У восьмому експерименті (03.02.1973 р.) суттєво масштабніший вплив (засіяно 7 ліній довжиною 20 км, відстані між лініями 4 км) було виконано на рівні верхньої межі As trans (до 2-3 балів), які практично деградували (висота 3030 м). Температура повітря на рівні впливу дорівнювала $-12,9^{\circ}\text{C}$, відносна вологість відносно льоду становила 102 %, $\Delta U_{\text{л}} = +2$ %. У результаті впливу утворилась суцільна кристалічна зона площею близько 750 км^2 (30 км x 25 км). У цій зоні практично відбулося відновлення As. Щільність їх була такою, що крізь них зовсім не було видно землю, а сонце проглядало, але слабо – тіней не давало. Протягом більш як двох годин цей масив ущільнених і суцільних As зберігався і ознак його розпаду не спостерігалось.

Дев'ятий експеримент (25.02.1973 р.) проведено практично в ясному небі. На рівні впливу (4730 м) були сліди (менш як 1 бал) As trans, які деградували. Температура повітря становила $-23,5^{\circ}\text{C}$ на висоті впливу, відносна вологість щодо льоду 106 %, пересичення 6 %. Висоту впливу – на рівні залишків As trans, що продовжували розсіюватись, було вибрано з тих міркувань, що в цій зоні запаси пароподібної води могли бути достатніми, щоб виконувалась умова пересичення відносно льоду. Ці сподівання цілком виправдались. У результаті впливу утворилась суцільна, винятково щільна кристалічна хмара, шириною до 5,5 км. Крізь неї не було видно ні землі, ні сонця. Кристали здебільшого мали форму пластинок, попадались і маленькі зірочки. Спостереження за штучною кристалічною хмарою проводились протягом 2 год. Хмара зберігала всі свої характеристики і не мала тенденції до розпаду. За ці 2 год хмара піднялась більш як на 500 м, досягши верхньою межею висоти 5250 м.

Розглянемо тепер експерименти другої групи. Середнє пересичення водяної пари відносно льоду в цій групі становило 2,8 % з коливанням від 0 % до 8 %. Перший експеримент було проведено 16. 12. 1968 р. недалеко

від Одеси. Основна мета – перевірити можливість утворення зон кристалізації в ясній атмосфері. Припускалось, що в ближній від хмарного поля Sc зоні рівень відносної вологості може відповідати умові пересичення відносно льоду, оскільки на периферії самої крапельної переохолодженої хмари виконується умова насичення над водою. Тому схема впливу передбачала засів лінії перпендикулярно до межі хмарного масиву.

Вплив на рівні верхньої межі (1660 м) поля шарувато-купчастих хмар (Sc) розпочато на відстані 8 км від його краю і продовжено на відстань до 16 км у безхмарній атмосфері. Температура й відносна вологість відносно льоду відповідно були $-13,2^{\circ}\text{C}$ і 101 % (пересичення 1 %). У результаті впливу утворилася зона кристалізації в хмарному полі Sc і в ближній зоні атмосфери – але тільки протягом 12 км. Далі, скоріш за все, через зниження вологості нижче рівня насичення над льодом, кристалічна хмара не утворилась. Ширина зони кристалізації досягла 4,0 км, а товщина 310 м. Смуга кристалізації була суцільною. Спостерігалось яскраве «нижнє» сонце й райдужні стовпи. У пробах мікроструктури переважали пластинки, попадались і стовпчики. Смуга не мала високої щільності, тому крізь неї було видно землю, але існувала вона більш як півтори години.

Другий експеримент (27. 02. 1969 р.) було проведено майже в ясній атмосфері на рівні деградуючих As trans, яких було не більш як 1 бал (висота 4270 м, температура $-20,0^{\circ}\text{C}$, вологість відносно льоду – 102 % – пересичення 2 %). У результаті впливу утворилася суцільна і компактна штучна кристалічна хмара шириною 4,8 км і товщиною 1250 м. У зоні кристалізації фіксувались пластини і стовпчики. Крізь кристалічну смугу слабо проглядалась земля, сонце також було видно, але у вигляді тьмяної плями. Зона кристалізації зберігалась понад 3 год, являючи, по суті, острів штучних кристалічних As.

Третій експеримент (4. 03. 1969 р.) проведено в ясній атмосфері на рівні верхньої межі серпанку (висота 4000 м, температура $-28,2^{\circ}\text{C}$, вологість відносно льоду становила 100 %, тобто пересичення не було). Після впливу утворилася суцільна зона кристалізації, але вельми розріджена. Ширина зони в фазі максимального розвитку досягала 4,5 км, а товщина – 300 м. Землю і сонце крізь смугу кристалізації було видно добре. «Нижнє» сонце, однак, було досить яскравим. Зона існувала більш як 1 год.

Четвертий експеримент (26.01.1970 р.) проведено в ясній атмосфері, але поруч (за 3 км) з полем Ас (висота 3830 м, температура $-19,9^{\circ}\text{C}$, відносна вологість щодо поверхні льоду – 108 % (відносно льоду пересичення 8 %). Вплив було здійснено по двох взаємно перпендикулярних лініях, які перетинались посередині. Після засіву утворилось дві суцільні, але не дуже щільні зони кристалізації (ширина 4,5 км, товщина 430 м). Відмітимо, що верхня межа штучних кристалічних хмар була на 200 м нижче від рівня польоту літака. Це можна пояснити тим, що на рівні впливу відносна вологість не відповідала умові насичення над льодом, а нижче, де хмара утворилась, рівень вологості був достатнім. У пробах мікроструктури фіксувались їжачки і пластинки. З оптичних явищ фіксувалося яскраве «нижнє» сонце, яскраве гало і на краях його (лівому й правому) два досить яскравих вторинних сонця. Земля і сонце крізь кристалічну смугу проглядалися добре. У процесі розширення зони розсіювались і через 30 хв після засіву повністю зникли.

П'ятий експеримент (22 грудня 1971 р.) було проведено практично в ясній атмосфері на рівні (6180 м), де були сліди високо-купчастих хмар (Сс) у кількості до 1-2 балів (температура $-23,3^{\circ}\text{C}$, відносна вологість відносно льоду – 103 %, пересичення 3 %). Після впливу зразу ж проявилась зона кристалізації, ширина якої досягла 5,6 км, а товщина 700 м. У зоні фіксувались винятково пластинчаті кристали. Верхня межа штучної кристалічної хмари була метрів на 20 вище від рівня впливу. У зоні кристалізації фіксувалось яскраве «нижнє» сонце і райдужні стовпи. Хмара з плином часу зберігала свою висоту, практично не змінюючи своєї геометричної форми, й існувала довше ніж 1 год. Подальші спостереження було перервано через технічні причини.

Таким чином, у цьому експерименті вдалось отримати досить потужну, хоч і не щільну кристалічну хмару. Через її товщу (700 м) земля слабо проглядалася, сонце було видно добре.

У третю групу увійшли лише два експерименти. Пересичення водяної пари відносно льоду в цих експериментах не було. А середнє недонасичення становило $-7,5\%$, з коливаннями від -6% до -9% . Перший експеримент (27.01.1970 р.) було проведено в ясній атмосфері на рівні верхньої межі серпанку (1240 м, температура $-4,7^{\circ}\text{C}$, відносна вологість відносно льоду -91% , пересичення -9%). На відстані 10-30 км від лінії засіву було поле хмар Sc. У результаті впливу було отримано пунктирну

зону кристалізації, уздовж якої чергувались невеликі зони кристалізації й ділянки, де слідів кристалізації не було помічено. Вони розташовувались уздовж лінії польоту більш-менш рівномірно. При цьому сумарна довжина зон кристалізації не перевищувала 20-30 % довжини лінії впливу. У пробах мікроструктури фіксувалась лише невелика кількість стовпчиків. Ширина осередків кристалізації не перевищувала 2 км. Верхня межа самих осередків кристалізації була на 100 м нижче від лінії впливу. Цією різницею, можливо, і пояснюється факт утворення осередків кристалізації. На рівні польоту відносна вологість, розрахована відносно поверхні льоду, становила лише 91 %. А нижче, притому місцями, відносна вологість могла відповідати умові насичення, що й сприяло появі осередків кристалізації.

Однак ці островки кристалізації були нестабільними, зменшувалися в об'ємі і вже через 20 хв практично зникли. Це вказує на те, що за таких умов стабільні кристалічні хмари отримати неможливо.

Другий експеримент (24.01.1971 р.) було проведено в ясному небі на рівні верхньої межі серпанку (висота 5800 м, температура $-24,7^{\circ}\text{C}$, відносна вологість щодо поверхні льоду – 94 %, недонасичення 6 %). У результаті впливу утворилась пунктирна зона кристалізації, але її верхня межа була нижче від лінії польоту літака на 150 м. Це вказує на те, що на цій висоті були сприятливіші умови для утворення кристалів. Осередки кристалізації розташовувались уздовж лінії рівномірно й сумарно становили до 30-40% довжини лінії впливу. У пробах мікроструктури фіксувались лише пластинки. Ширина осередків кристалізації досягала 5100 м, а товщина 200 м. З плином часу фіксувалась деградація хмари і через 50 хв після утворення кристалічні острівці повністю зникли. За перші 30 хв хмара знизилася свій рівень на 150 м. Тобто, фізичні умови для тривалого існування зони кристалізації були відсутні.

До четвертої групи входять 3 експерименти, в яких штучні кристалічні хмари не утворились. У цих випадках теж фіксувалось недосичення водяної пари відносно льоду. Середнє значення недонасичення становило $-16,3\%$ з коливаннями від -6 до -28% . Перший експеримент було проведено 14.01.1970 р. в умовах безхмарної атмосфери. Для засіву було вибрано висоту, яка на 150 м перевищувала рівень, на якому фіксувались окремі кристали, що випадали з розташованого вище (нижня межа близько 4500 м) шару тонких As trans , вище яких були ще й Si . Тобто на висоті польоту в пробах

мікроструктури попадалися кристали різних форм (зірочки, стовпчики). Нижче рівня польоту були Sc з верхньою межею 1350 м.

Засів було здійснено на висоті 3870 м, де температура дорівнювала $-9,5^{\circ}\text{C}$, а відносна вологість щодо поверхні льоду 94 % (недосичення 6 %). Спостереження показали, що зони кристалізації не утворилось. Такі умови не сприяли утворенню зародків кристалів.

Другий і третій експерименти було проведено 24 січня 1971 р. У другому експерименті лінію впливу було вибрано на 600 м нижче верхньої межі серпанку (висота 5190 м, температура $-20,1^{\circ}\text{C}$, відносна вологість щодо поверхні льоду 72 %, недонасичення 28 %). Спостереження показали, що слідів кристалізації після впливу не було.

Третій експеримент проведено в тій же повітряній масі, але на 260 м вище, тобто на 350 м нижче від верхньої межі серпанку (висота 5450 м, температура $-22,5^{\circ}\text{C}$, відносна вологість щодо поверхні льоду 85 %, недонасичення на 15 %). Спостереження показали, що ознак кристалізації не з'явилося. Зауважимо, що в цей же день, але вже на рівні верхньої межі серпанку, було засіяно ще одну лінію, у зоні якої утворилися осередки кристалізації (експеримент цей відносився до третьої групи і його описано вище).

Оцінка фізичних умов, за яких у результаті впливу утворювались штучні кристалічні хмари, показує, що головним чинником успішності експерименту є відносна вологість. Якщо за низьких від'ємних температур в атмосфері є прошарки, де виконується умова пересичення водяної пари відносно льоду, штучні кристалічні хмари утворюються завжди, є стабільними, зберігаються годинами. У міру зниження числових значень пересичення і наближення їх до нуля хмари також утворювались, але їх щільність була суттєво нижчою і за 1-3 години вони могли розсіятись. Якщо від'ємні значення параметра $\Delta U_{\text{л}}$ (%) були в межах від -6 % до -9 %, штучні кристалічні смуги утворювались, але були пунктирними та існували всього 20-40 хв (експерименти № 9 і № 13). Однак сам факт утворення кристалів за таких умов дає підстави для припущення, що вздовж лінії впливу рівень вологості змінювався і ділянки з недосиченням відносно льоду (де хмари не утворювались) чергувались з ділянками, де насичення (а, може й невеличке пересичення) все-таки було і забезпечило появу пунктирної зони кристалізації.

За умови значного недонасичення (експерименти 5, 11, 12) зони кристалізації не утворювались.

Варто також зауважити, що на ймовірність утворення й стабільність штучних кристалічних хмар впливає також температура. У міру зниження її (особливо за умови, коли вона була значно нижчою за -20°C) щільність і час існування цих хмар зростали. Це можна пояснити збільшенням числових значень відносної різниці в тиску насичених парів над водою і льодом. Абсолютна різниця максимальна за температури $-12,6^{\circ}\text{C}$ і становить 0,269 мб. Із подальшим зниженням температури числове значення цієї різниці зменшується, але відносна різниця (в %) зростає. Цим і можна пояснити факт більшої стабільності штучних кристалічних хмар за дуже низьких температур.

Розглянемо тепер результати цих експериментів залежно від особливостей самого об'єкта впливу. Сім експериментів (№ 3, 7, 8, 10-13) було проведено в ясному небі, де в зоні видимості (до 50 км і більше) не було ніяких хмар. При цьому в 5-ти випадках із семи вплив здійснювався з рівня верхньої межі серпанку, а в двох (№ 11 і 12) значно нижче. Тоді, коли твердий CO_2 скидався в зоні верхньої межі серпанку, утворилися штучні кристалічні хмари, які були суцільними й довго зберігались. Є підстави стверджувати, що вплив призвів до появи штучних атмосферних об'єктів, які з фізичного погляду не відрізнялись від природних полів Cs або As.

Ще в двох експериментах (№ 14, 15) вплив виконувався в шарах атмосфери, де були сліди хмарних шарів Cs, Sc (до 1-2 балів), з рівня верхньої межі цих утворень. При цьому утворювались досить щільні кристалічні смуги (хмари), які зберігались більш як 1-3 год, з часом вони розвивались, ущільнювались і мали тенденцію до підняття на вищі рівні.

У семи експериментах (№ 2, 4, 6, 16-19) вплив було здійснено в шарах As, Ac trans. Вплив призвів практично до утворення щільних кристалічних смуг, тобто, практично, до регенерації шару засіяних хмар, які потім могли в процесах опадоутворення відігравати ту ж роль, що й природні As, з яких у розташовані нижче Ns випадають кристалики, стимулюючи облогові опади.

Висновки

Отже, методи створення штучних кристалічних хмар можуть знайти практичне застосування. За наявності фізичних умов такі хмари можна було б утворювати над розташованими нижче полями хмарних систем Ns, As, Ac, Sc. Тоді штучні кристалічні хмари будуть засівати кристалами

ці розташовані нижче хмари, що призведе до утворення або підсилення опадів. Це буде нагадувати генерацію опадів у природних умовах, коли зародкові кристали утворюються у верхніх шарах As-Cs, опускаються в розташовані нижче Ns, де в основному відбувається збільшення їх розмірів і перетворення в частки опадів.

Іноді штучні кристалічні хмари можна використати як екран, який прикриває земну поверхню. За достатньої щільності цих штучних кристалічних хмар можна було б частково змінювати тепловий баланс земної поверхні (підвищення температури вночі чи зниження температури в денні часи).

У приземних умовах превентивний засів пересиченої відносно льоду атмосфери за від'ємних температур ($t \leq -4^{\circ}\text{C}$ – у разі використання твердого CO_2 ; $t \leq -7^{\circ}\text{C}$ – під час застосування AgI) міг би попередити утворення крапельного туману (зона аеродрому або інших об'єктів).

* *

1. Orr J. L. Fraser D., and Pettit K.G. Canadian experiments on artificially inducing precipitation. U.K.Conf on Conservation and Utilisation of Resources, 4 Water Resources, p.27, 1949.
2. Schaefer, V.J. Flight experimente under Project Cirrus. G.E. Res. Lab. Project Cirrus, Final Rep., Pt.1, Ch.4, 1953.

*Український науково-дослідний
гідрометеорологічний інститут, Київ*

Б.Н. Лесков

Физические условия образования искусственных кристаллических облаков и их временная стабильность

Проанализировано серию экспериментов по искусственному образованию кристаллических облаков. Показано, что вероятность положительного результата увеличивается с ростом пресыщения водяного пара относительно льда. Стабильные во времени искусственные кристаллические облака образуются на более высоких уровнях (свыше 5 км) при низких температурах ($t < -20^{\circ}\text{C}$).

Ключевые слова: активные воздействия на атмосферные процессы, искусственные кристаллические облака, твердый CO₂.

B.N. Leskov

Physical conditions of creation of artificial crystal clouds and their temporal stability

Series of experiments on artificial creation of clouds was analyzed. It was shown that probability of successful result increased with growth of water vapor supersaturating relative to ice. Stable in time artificial crystal clouds arise on high altitude and by low temperature ($t < -20^{\circ}\text{C}$).

Keywords: weather modification, artificial crystal clouds, solid CO₂.