

УДК 910

## ИТОГИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО УВЕЛИЧЕНИЮ ДОЖДЯ И СНЕГА ИЗ ОБЛАКОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

<sup>1</sup>Диневи́ч Л.А., <sup>1</sup>Диневи́ч С.Е., <sup>2</sup>Лесков Б.Н.<sup>1</sup>Тель-Авивского университета, Тель-Авив, e-mail: dinevich@barak-online.net;<sup>3</sup>УкрНИГМИ, Киев

Приведены результаты многолетних исследовательских и экспериментальных работ по увеличению осадков из облаков различных типов в летние, зимние и переходные периоды года в Молдове и в Украине. Эксперименты в обоих регионах дополнили друг друга, удлиннили ряды данных и позволили авторам высказать новые соображения, направленные на улучшение технологии воздействия на осадкообразующие процессы.

**Ключевые слова:** осадки, дождь, облака, воздействия на облачные системы

## RESULTS OF EXPERIMENTS IN RAIN AND SNOW ENHANCEMENT FROM CLOUDS OF VARIOUS TYPES

<sup>1</sup>Dinevich L.A., <sup>1</sup>Dinevich S.E., <sup>2</sup>Leskov B.N.<sup>1</sup>Natural Sciences, Tel-Aviv University, Tel-Aviv, e-mail: dinevich@barak-online.net;<sup>2</sup>Institute of Hydrometeorological, Kiev

The paper presents the results of decade-long research and experiments in rain enhancement from clouds of various types in summer, winter and off-season in Moldova and Ukraine. The experiments in both regions complemented one another and yielded new series of data, which enabled the authors to develop certain views on improving the rain-formation modification technology.

**Keywords:** precipitation, rain, clouds, effects on cloud systems

В начале 50-х годов во многих странах были начаты эксперименты по увеличению осадков из облаков различных типов. Одним из важных элементов работ по искусственному увеличению осадков является оценка эффективности воздействия на облака и осадки. Эта проблема не обсуждается в статье, мы ограничимся здесь лишь приведением оценок, содержащихся в авторских публикациях.

Большой размах получили исследования по увеличению осадков в США (Changnon., 1974; Elliott, 1984; Kriege Daniel, 1969; Siliceo at al, 1963; Schaefer Vincent, 1963; Stanley at al., 1994; William, Cotton, 1997). В некоторых американских проектах увеличение осадков достигало по оценке авторов 12–20%. Весьма значительное увеличение осадков отмечалось в Мексике, в бассейне реки Некакса – до 50% и более (Siliceo at al, 1963). В Японии увеличение осадков превышало 20%, достигая в отдельных случаях 150%. При этом, сообщалось, что увеличение осадков здесь фиксировалось на протяжении 50–100 км за линией воздействия (Yoshida Sacumatsu, 1965). Исследования в этой области на протяжении многих лет проводятся также в Австралии, Франции, Италии, Испании, Китае и других странах. В Израиле оценки многолетних экспериментов показали, что, при использовании разработанной ими технологии (статический засев), прибавка осадков в северной части Израиля близка к 17–18%. В то же время в южных районах (Ашдод, Ашкелон) эта технология оказалась не эффективна (Gagin, Neyman, 1974;

Gagin, Neyman, 1981; Gabriel at al, 1990; Rosenfeld. at al., 1994).

В СССР исследовательские работы по увеличению осадков начались в конце 40-х годов в Главной геофизической обсерватории, Ленинград (ГГО) (Никандров, 1959; Шишкин, 1964) и Центральной аэрологической обсерватории, Москва (ЦАО) (Боровиков, Гайворонский и др., 1961). Несколько позже (1959–1963 гг.) такие работы начались в Институте экспериментальной метеорологии (ИЭМ г. Обнинск), Украинском (УкрНИГМИ, г. Киев), Среднеазиатском (САНИГМИ, г.Ташкент) и Закавказском (ЗакНИГМИ, г.Тбилиси) научно-исследовательских гидрометеорологических институтах, а с 1964 г. в Молдовской Службе по активному воздействию на гидрометеорологические процессы. Основные результаты исследований этого периода представлены в ряде монографий по физике облаков и активных воздействий (Сулаквелидзе, 1967; Леонов, Перелёт, 1967; Половина, 1971; Шмистер, 1972; Качурин, 1978).

Авторские оценки некоторых результатов научных и научно производственных экспериментов, выполненных в разные годы в различных физико-географических условиях различными коллективами бывшего СССР приведены в табл. 1, 2 (Chernikov et al., 1994; Курбаткин и др., 1990; Буйков и др., 1990; Диневи́ч и др., 1995, 1998; Лесков, 1991; Беляев и др., 1990; Shipilov et al., 1994; Abbas., 1994; Леонов и др., 1985). Общим для всех экспериментов является полученный устойчивый положительный результат.

Т а б л и ц а 1

Результаты работ по увеличению осадков в Украине, Молдове, России, Грузии, Узбекистане, на Кубе

| Страна         | Вид облаков                                                  | Число экспериментальных единиц              | Число контрольных единиц | Метод контроля                                        | Эффективность в %      |
|----------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------|
| Россия (Пенза) | Cu Cong, Cb<br>$6 \leq H_{top} < 8\text{km}$                 | 106                                         | 87                       | Рандомизация                                          | 100                    |
| Россия (Куба)  | Cu Cong, Cb<br>многоячейков.                                 | 53                                          | 39                       | Рандомизация                                          | 60                     |
|                | Cu Cong, Cb<br>однойчейков.                                  | 37                                          | 41                       | Рандомизация                                          | 87                     |
| Украина        | однойчейков.                                                 | 52                                          | 22                       | Рандомизация                                          | 86                     |
| Украина        | многоячейков.                                                | 58                                          | 31                       | Рандомизация                                          | 55                     |
| Украина        | St, Sc, As, Ns                                               | 156 дней<br>1974–1980                       |                          | Контрольная территория                                | 63                     |
| Украина        | Cu Cong, Cb<br>многоячейков.                                 | 1981–1985                                   |                          | Рандомизация                                          | 40                     |
|                | Cu Cong, Cb<br>однойчейков.                                  | 1981–1985                                   |                          | Рандомизация                                          | 50                     |
| Молдова        | St, Sc, As, Ns (зима,<br>весна, осень)<br>Cu Cong, Cb (лето) | 1985–1990<br>125 дней<br>мишень*<br>мишень* |                          | Метод исторической регрессии и контрольной территории | 15–19<br>(+75...–80)** |
| Узбекистан     | St, Sc, As, Ns<br>(зима)                                     | 1984–1987<br>35 дней<br>мишень*             |                          | Метод исторической регрессии                          | 15                     |
| Грузия         | Cu Cong, Cb, St, Sc,<br>As, Ns (лето)                        | мишень*                                     |                          | Метод гидрологический                                 | 20                     |
| Грузия         | Cu Cong, Cb, St, Sc,<br>As, Ns (лето)                        | мишень*                                     |                          | Метод исторической регрессии                          | 25                     |

П р и м е ч а н и я : мишень\* – постоянная территория; \*\* – знак и величина эффекта воздействия на облачную ячейку – сложная функция её состояния и термодинамических условий развития в момент засева (см. параграф 3 настоящей статьи). При оптимальной схеме засева в условиях Молдовы можно получить 25 % дополнительных осадков.

Т а б л и ц а 2

Результаты работ ЦАО по увеличению осадков в Сирии, Иране, Португалии

| Сезон                                        | Ожидаемое (оценка) количество осадков, мм | Фактическое количество осадков, мм | Эффект воздействия в км <sup>3</sup> дополнительной воды | Эффект воздействия в % |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------|
| <i>Сирия</i>                                 |                                           |                                    |                                                          |                        |
| 1991-92                                      | 29,07                                     | 33,86                              | 4,79                                                     | 16,5                   |
| 1992-93                                      | 24,73                                     | 28,81                              | 4,08                                                     | 16,5                   |
| 1993-94                                      | 27,08                                     | 30,25                              | 3,17                                                     | 11,7                   |
| 1995*                                        | 13,15                                     | 14,06                              | 0,91                                                     | 6,9                    |
| 1995-96                                      | 34,02                                     | 36,61                              | 2,59                                                     | 7,6                    |
| 1996-97                                      | 26,92                                     | 30,63                              | 3,71                                                     | 13,8                   |
| 1997-98                                      | 32,13                                     | 33,68                              | 1,55                                                     | 4,8                    |
| 1998-99                                      | 21,90                                     | 24,01                              | 2,11                                                     | 9,7                    |
| 1999-2000                                    | 21,77                                     | 25,00                              | 3,23                                                     | 14,8                   |
| <i>Иран</i>                                  |                                           |                                    |                                                          |                        |
| 1999                                         | 8,34                                      | 6,48                               | 1,86                                                     | 28,7                   |
| 2000                                         | 2,46                                      | 1,75                               | 0,71                                                     | 40,3                   |
| <i>Португалия</i>                            |                                           |                                    |                                                          |                        |
| 1999<br>8 рабочих дней<br>с 22 по 29 октября |                                           |                                    | 0,37                                                     | 7,4                    |

В настоящей работе обсуждаются результаты научных и производственных экспериментов по увеличению осадков, проводившихся в степной зоне Украины и в Молдове.

**Эксперименты по увеличению осадков  
в зимние периоды года  
в степной зоне Украины**

Воздействия на облака в Украине были начаты в 1959 г. (Леонов., Перелёт, 1967; Половина, 1971) и проводились на экспериментальном метеорологическом полигоне (ЭМП), оснащённом густой осадкомерной сетью (один пост на 10–20 км<sup>2</sup>). Площадь ЭМП достигала 10 тыс. км<sup>2</sup>. На полигоне был развёрнут радиолокационный комплекс, который состоял из радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, «Большой очаг». Позже они были заменены радиолокатором МРЛ-5. Здесь же были диспетчерский радиолокатор сопровождения самолетов «Экран-Д», радиопривод, пункт радиозондирования. Воздействия на облака выполнялись с использованием четырёх самолётов ИЛ-14, которые имели продолжительность полета до 8 часов, высоту подъема до 7 км, диапазон рабочих скоростей от 220 до 350 км/ч. Они были оборудованы средствами измерения скорости полёта, давления, относительной влажности и температуры воздуха. На самолетах были установлены микрофотоустановка, электронный термометр, приборы для регистрации перегрузок и измерения влажности облаков конструкции Зайцева (СИБ-3), счетчик кристаллов и средства для засева облаков. В 80-е годы к этим самолётам прибавились специально оборудованные для засева облаков самолёты АН-26, АН-30 и ЯК-40. В качестве реагента использовался сухой лёд (группа хладореагентов) – CO<sub>2</sub>. Для разбрасывания реагента в облаках служила установка АДГ-1, которая дробила блоки твердого CO<sub>2</sub> на гранулы размером 5–10 мм и обеспечивала дозировку от 50 до 3000 г/мин. Твердый CO<sub>2</sub> транспортировался в двух теплоизоляционных контейнерах суммарной вместимостью до 1,5 т. Решение на вылет принималось после анализа синоптической обстановки и данных радиолокатора. При выходе в расчетный район проводилось зондирование облачной системы. Решение о начале воздействия принималось при обнаружении в облачной системе пригодных для засева слоев. Критерии пригодности облаков к засеву были установлены по результатам экспериментов (Леонов, Перелет, 1967; Галаджий и др., 1990; Лесков, Неробеева, 1971; Лесков, 1977). Заметим, что эти критерии отличались для облаков, дающих естественные осадки (Ns – As), и

облаков, из которых осадки не выпадали (Sc, St, Ac).

Облачные системы, дающие естественные осадки (Ns–As), считались пригодными для засева в тех случаях, если в них имелись капельные или смешанные по фазовому строению слои любой толщины (от 50 м и более) при температуре минус 4°C и ниже. Облака Sc, St, Ac, из которых осадки не выпадали считались пригодными для засевов с целью увеличения осадков тогда, когда они имели капельное строение, температуру не выше минус 4°C, толщину не менее 500 м, а нижнюю границу не выше 1000 м. Для Ac толщина облаков должна была быть более 600 м. Для зимних внутримассовых облаков слоистых (St) и волнистых (Sc, Ac) форм Половина (1971) предложил дополнительный критерий: эти облака должны иметь водозапас более 30 г/м<sup>2</sup> и смещаться (находиться) над мишенью более трех часов.

После принятия решения о воздействии рассчитывалась схема засева, обеспечивающая вывод зоны искусственного увеличения осадков на полигон с густой осадкомерной сетью (Лесков, 1970, 1991). Засев облаков выполнялся при полёте самолета по прямым параллельным линиям длиной около 20 км на уровне верхней границы пригодного для воздействия слоя. Расстояние между линиями засева изменялось в пределах 3–4 км. Длина линии воздействия зависела от скорости ветра, а расстояние между линиями засева выбиралось равным ширине зоны кристаллизации от единичной линии (Лесков, 1990). Ширина зоны кристаллизации увеличивалась с понижением температуры и возрастанием высоты засева. Дозировка реагента (твердого CO<sub>2</sub>) была определена экспериментально и изменялась в пределах 100–700 г/км. Наиболее часто она составляла 400–500 г/км. Продолжительность воздействия соответствовала длительности сохранения пригодных для засева облаков в расчетной зоне. Для оценки эффекта воздействия была предложена методика определения количества дополнительных осадков в каждом отдельном эксперименте (Леонов, Перелет, 1967; Лесков, 1970). В её основе лежал способ нахождения зоны увеличенных осадков на местности. Её местоположение определялось с учетом изменения направления и скорости ветра с высотой, уровня засевавшегося слоя и скорости опускания полосы искусственных осадков. Надежность этой методики подтверждена с помощью радиолокационных наблюдений (Акимов, Лесков, 1971).

Количество дополнительных осадков определялось, как разность между средним слоем осадков в расчётной зоне их выпа-

дения после воздействия и средним слоем осадков на окружающей эту зону контрольной площадке (Леонов, Перелет, 1964; Лесков, 1970, 1991). Продолжительность воздействия в каждом конкретном эксперименте зависела от длительности сохранения пригодных для засевов облаков и изменялась от 45 мин до 4 час 21 мин. Средняя для всех опытов продолжительность засева составила 1 час 51 мин. К 1972 году было оценено 68 экспериментов, проведенных в УкрНИГМИ (Лесков, 1970). В 56 случаях засевались Ns–As и в 12-ти – Sc, St, Ac, As, не дававшие естественных осадков. В 54 опытах первой группы получено увеличение осадков и в двух случаях их уменьшение (соответственно по  $-0,04$  мм и  $-0,11$  мм). Среднее увеличение осадков в 56 экспериментах составило  $0,74$  мм при максимуме  $2,44$  мм. Средняя за время их выпадения (1 час 21 мин) интенсивность искусственных осадков составила  $0,40$  мм/ч, а среднее относительное (%) увеличение осадков составило  $100\%$ . Средняя интенсивность осадков из облаков типа Sc, St, Ac была близка к  $0,1$  мм/ч. На рис. 1 показана зависимость относительного увеличения (прибавки) осадков ( $\Delta R, \%$ ) и средней интенсивности искусственных осадков ( $I_m$ , мм/ч) от интенсивности естественных осадков ( $I_n$ , мм/ч).

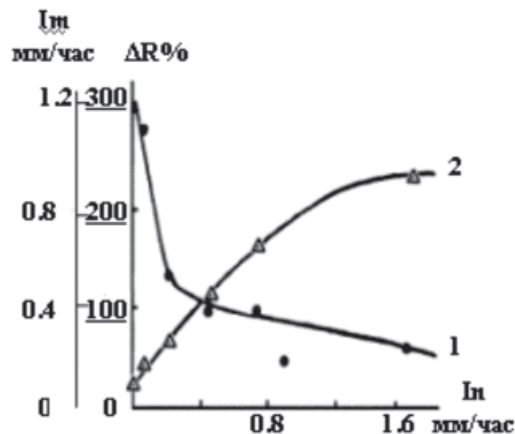


Рис. 1. Зависимость относительного увеличения количества (1) и средней интенсивности искусственных осадков ( $I_m$ ) (2) от средней интенсивности естественных осадков ( $I_n$ )

Из приведенных на рис. 1 кривых следует, что относительное увеличение слабых осадков превышает  $100\%$ . С увеличением интенсивности естественных осадков ( $I_n$ ) величина относительной прибавки искусственных осадков быстро уменьшается, в то время, как абсолютная прибавка с увеличением  $I_n$  увеличивается. При производственных работах столь большого эффекта

достичь было невозможно потому, что пригодные для воздействия слои в облачных системах As–Ns встречались только в  $42\%$  случаев (Лесков, Неробеева, 1971). Подсчитано, что зимой из пригодных к засеву систем Ns–As, которые встречаются в  $42\%$  случаев, выпадает  $35\%$  сезонной суммы естественных осадков (Лесков и др., 1971). С учётом этого обстоятельства и с учётом повторяемости пригодных для воздействия слоёв было рассчитано возможное увеличение осадков при регулярных воздействиях. Расчёты показали, что при засеве всех систем зимних Ns–As, а также Sc, St, Ac увеличение осадков может составить  $33\text{--}35\%$  от нормы зимнего периода (Лесков, 1971). При анализе экспериментов оценивалась также протяженность вдоль ветра зоны усиленных осадков. Оказалось, что усиление осадков отмечается в полосе, соответствующей 2–3-х часовому переносу, т.е.  $60\text{--}100$  км (Лесков, 1970). Проследить изменение осадков на удалении более  $100$  км не позволили ограниченные размеры полигона. При засеве Sc, St, Ac протяженность зоны увеличения осадков соответствовала переносу за 45 мин ( $20\text{--}30$  км). В экспериментах, кроме изменения количества осадков, исследовалась и эволюция некоторых микрофизических параметров облаков. Было обнаружено увеличение на 1–2 порядка концентрации кристаллов в зоне засева смешанных по фазе слоёв облаков Ns–As (Акимов, Лесков, 1971). Полная кристаллизация при этом отмечалась в  $70\%$  случаев. В зоне засева отмечено увеличение температуры на  $0,2\text{--}0,6^\circ\text{C}$ . Максимальное увеличение температуры достигало  $1,5^\circ\text{C}$ .

Важным, для понимания физики воздействия, является сопоставление получаемого количества дополнительных осадков с единовременным капельным водозапасом засеваемого слоя облака. Оказалось, что при воздействии на облака, типа Ns–As, дающие естественные осадки, количество дополнительных осадков в среднем в 10 раз больше, чем единовременный капельный водозапас засеянного слоя облака. Для облаков Sc, St, Ac это отношение получаемого в экспериментах количества дополнительных осадков к капельному водозапасу меньше единицы и в большинстве случаев лежит в пределах  $0,1\text{--}0,5$  (Лесков, 1971). Полученное соотношение показывает, что основным источником дополнительных осадков при воздействиях могут быть системы Ns – As, дающие естественные осадки.

В январе 1974 и 1975 годов был выполнен контрольный эксперимент, в котором облака засевались в течение целого месяца. Целью эксперимента было увеличение

осадков на заранее заданной территории, представляющей собой круг диаметром 20 км. В январе 1974 г. осадки здесь были увеличены на 63 %, а в 1975 г. – на 41 %. Вследствие изменения направления ветра увеличение выпадающих из засеянных *Ns–As* осадков происходило и на окружающей заданный круг территории. Так, на площади 4500 км<sup>2</sup> (более чем на порядок большей заданного круга) в 1974 году увеличение осадков превысило 21 %, а в 1975 г. на площади 3600 км<sup>2</sup> оно составило 18 %. Отметим также, что в этих экспериментах до 90 % общей добавки осадков были получены при засевах *Ns–As* и только около 10 % при засевах *Sc, St, Ac* (Лесков, 1976). Главные особенности разработанной в Украине технологии увеличения зимних осадков следующие.

Ввод реагента производится «прицельно» только на тот объём облака (пригодный для воздействия), физические параметры которого обеспечивают в нём требуемые микрофизические преобразования (кристаллизация капельной воды и резкое, на 1–2 порядка, увеличение концентрации кристаллов). При нарушениях требований технологии эффективность засева облачных слоёв уменьшается до уровня, при котором воздействие становится экономически бессмысленным (Лесков, 1991).

#### **Работы по увеличению осадков из конвективных облаков летнего периода в Молдове**

В Молдове работы по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы с целью защиты сельскохозяйственных культур от градобитий были начаты в 1964 году. К 1970 году здесь был создан большой технологический комплекс, позволивший с помощью наземных и самолётных средств проводить исследования различных типов облаков. Для оценки влияния противогорадового засева на режим осадков большинство молдавских полигонов содержали густую пловииографическую сеть (один пловииограф на 8–10 км<sup>2</sup> на общей площади около 900 тыс. га). Дополнительно к результатам наблюдений на этой сети в эксперименте использовались и осадкомерные данные всех метеорологических станций и осадкомерных постов метеорологической службы, включая густую сеть осадкомеров (один пловииограф на 2 км<sup>2</sup>) стоксовой станции в районе Дубосарской электростанции на Днестре. Это позволяло при засевах облаков сопоставлять временные и пространственные характеристики (гистограммы интенсивности и количества осадков), получаемые с помощью осадкомерной сети с соответствующими данными нескольких

радиолокаторов. Засев облаков осуществлялся по противогорадовой технологии с использованием радиолокаторов и специальных ракет, оснащённых льдообразующими реагентами на основе *AgI* (Dinevich et al., 1998). На первом этапе исследования оценка влияния засева градоопасных облаков на режим осадков проводилась простым сопоставлением изменения слоя осадков (*R*, мм) за те или иные интервалы времени над засеваемой территорией в годы воздействий (1965–1972) и в годы до проведения воздействий (1958–1963). Дополнительно для этих лет проведено сравнение количества осадков, выпадавших в прилегающих к засеваемой территории районах и на специально отобранных четырёх контрольных территориях, расположенных на севере, юге, и востоке, относительно зоны воздействия (Вычужанина, Гайворонский, 1976). Построенные уравнения линейной регрессии, связывающие интегральные суммы осадков на засеваемой территории с соответствующим их значениями на четырёх контрольных территориях и интегральные суммы осадков на засеваемой и окружающей территориях (Вычужанина, Гайворонский, 1976) привели к выводу, что количество осадков увеличилось за счёт противогорадового засева с мая по август в среднем на 9–10 %, а за июнь, июль (период максимального числа засеваемых градоопасных облаков) – на 14–17 %. В то же время была обнаружена существенная разница этих показателей при сравнении данных по засеваемой территории с каждой из четырёх выбранных контрольных территорий. Оценки, полученные другими авторами и на других территориях демонстрируют заметное отличие друг от друга. Так например, при проведении противогорадовой защиты в Ферганской долине Узбекистана (Злотников, Строкань, 1975) засев дал уменьшение осадков на 20 %, а для Северного Кавказа он их не изменил (Абшаев, Климовская, 1976; Сулаквелидзе и др., 1973). Увеличение осадков наблюдалось и в противогорадовых экспериментах, выполненных на западе. Так, в Швейцарии (Grossfersuch 4), увеличение осадков составило 20 %, в Канаде (на юго западе провинции Альберта) было отмечено увеличение на 40 % (Neiburger, Chin Cho Chin, 1969). Согласно выводам одного из исследователей проекта (Colorado River) (Elliot., 1984) противогорадовый засев слабообразованных *Sb* так же ведёт к увеличению осадков (эффект засева мощных *Sb* ими не был определён). Итак, разные авторы для различных регионов, используя в качестве экспериментальной единицы интегральные суммы осадков за сутки, месяц, тёплый сезон (поздняя вес-

на и лето), получили оценки эффективности воздействия, отличающиеся друг от друга не только величиной, но и знаком. Такой разброс в оценках привёл к необходимости проведения дополнительных исследований.

С этой целью в Молдове были проведены дополнительные исследования, в которых за экспериментальную единицу (зе) была принята отдельная ячейка градоопасного облака (см. приложение 1). Наблюдения велись на экспериментальной (засеваемой) территории и специально отобранной контрольной территории. В качестве контрольной была выбрана наиболее репрезентативная по климатическим данным одна из четырёх ранее упомянутых территорий. При этом она располагалась таким образом, чтобы на неё не влиял засев облачных ячеек на засеваемой территории. Схема этого многолетнего эксперимента и полный анализ его результатов приведены в (Dinevich et al., 1995; Dinevich et al., 1998). Здесь мы отметим лишь основные полученные в этих работах результаты. В процессе эксперимента были собраны различные данные о характеристиках (параметрах) облаков и ливней из них, как на контрольной, так и на защищаемой от градобитий (экспериментальной) территории. Засев облаков выполнялся по противоградовой технологии, описанной в (Dinevich et al., 1998). В настоящей статье оценивается влияние противоградового засева лишь на количество выпадающих осадков. За период эксперимента (1978–1984 годы) было получено  $n_3 = 128$  зе с противоградовым засевом и  $n_k = 86$  зе без засева (контрольных). Исходя из необходимости более детального анализа повторяемости различных ливней и их вкладов в суммарный слой осадков за сезон, была принята классификация ливней из семи категорий по величине массы  $Q$  (в млн. т), выпавших из каждого из них осадков (Диневич и др., 1995).

В том числе:

- 1) очень слабые  $Q \leq 1$ ;
- 2) слабые  $1 < Q \leq 2$ ;
- 3) умеренные  $2 < Q \leq 5$ ;
- 4) значительные  $5 < Q \leq 9$ ;
- 5) сильные  $9 < Q \leq 15$ ;
- 6) очень сильные  $15 < Q \leq 25$ ;
- 7) особо опасные  $Q > 25$ .

(Речь идет о полной массе осадков, выпавших из конвективной ячейки. Весь дождь начинался и кончался на полигоне. Большой размер полигона в значительном количестве случаев позволял выдерживать этот принцип эксперимента. В противном случае ливни не включались в число зе).

В соответствии с приведенной классификацией были подсчитаны повторяемости (числа случаев)  $\hat{n}(i)$  различных групп

из категорий ливней и соответствующие им распределения масс осадков для рядов наблюдений контрольных и с засевами за весь период эксперимента. Результаты этих подсчетов представлены в табл. 3. При этом удовлетворительная длина контрольного ряда даёт все основания считать его достаточно репрезентативным по отношению к исследуемым характеристикам осадков, что позволяет использовать этот ряд в качестве естественного фона при изучении особенностей влияния противоградовой защиты на характеристики осадков. Исходя из этого, все значимые различия в повторяемости значений тех или иных параметров облаков и осадков в рядах контрольном и с засевами рассматриваются авторами при анализе, как прямое следствие воздействий. Естественно, что сопоставление сумм осадков  $Q_3$  и  $Q_k$  по принятым грациям возможно лишь при одинаковых длинах рядов. Согласно принятым в климатологии правилам, это обеспечивается путём приведения более короткого ряда к более длинному. В нашем случае такое приведение осуществлено с помощью коэффициента приведения  $a = n_3/n_k = 128/86 = 1,488$ . Представленные в таблице данные для различных категорий ливней иллюстрируют характер и масштабы влияния противоградовой защиты на осадки из градоопасных облаков. Можно видеть, что относительная частота повторения очень слабых и слабых ливней уменьшается под влиянием противоградового засева на 19 и 54% соответственно. В то же время существенно возрастает частота повторения умеренных (на 121%), значительных (на 58%) и сильных (на 25%) ливней. Частота очень сильных ливней остаётся практически неизменной, а частота появления особо опасных ливней под влиянием засева уменьшилась вчетверо. Сходные изменения прослеживаются в этой таблице и для сумм осадков. Естественно, что в экспериментальные ряды данных попала лишь какая-то часть (Диневич и др., 1995) общего числа облаков и ливней на полигоне за время проведения эксперимента. Поэтому при анализе данных основное внимание, прежде всего, привлекают оценки относительных изменений осадков вследствие противоградового засева. Эти оценки (табл. 3) свидетельствуют о небольшом относительном уменьшении (–8%) масс осадков в группе очень слабых ливней, существенном уменьшении (–51%) в группе слабых ливней, заметном увеличении в группах умеренных (75%), значительных (55%) и сильных (52%), и снова об уменьшении в группах очень сильных (–17%) и особо опасных (–80%) ливней.

Таблица 3

Изменение режима осадков при противогололедном засеве кучево-дождевых облаков

| Повторяемости (абсолютные и относительные) ливней и масс осадков             | Категории ливней по массам выпавших осадков $Q \cdot 10^6$ т |                |                 |                    |                  |                         |                           | Всего  |
|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------|-----------------|--------------------|------------------|-------------------------|---------------------------|--------|
|                                                                              | 1                                                            | 2              | 3               | 4                  | 5                | 6                       | 7                         |        |
|                                                                              | Очень слабые $\leq 1$                                        | Слабые 1,1–2,0 | Умеренные 2,1–5 | Значительные 5,1–9 | Сильные 9,1–15,0 | Очень сильные 15,1–25,0 | Особо опасные $\geq 25,1$ |        |
| $\tilde{n}_3(i)$                                                             | 35                                                           | 18             | 42              | 19                 | 10               | 3                       | 1                         | 128    |
| $\tilde{n}_3(i)/n_3 \cdot 100\%$                                             | 27,3                                                         | 14,1           | 32,6            | 14,8               | 7,8              | 2,3                     | 0,8                       | 100    |
| –                                                                            | 41,4                                                         |                | 55,4            |                    |                  | 3,1                     |                           |        |
| $\tilde{n}_k(i)$                                                             | 29                                                           | 26             | 13              | 8                  | 5                | 2                       | 3                         | 86     |
| $a \tilde{n}_k(i)$                                                           | 43                                                           | 39             | 19              | 12                 | 8                | 3                       | 4                         | 128    |
| $a \tilde{n}_k(i)/n_k \cdot 100\%$                                           | 33,6                                                         | 30,5           | 14,8            | 9,4                | 6,3              | 2,3                     | 3,1                       | 100    |
| –                                                                            | 64,1                                                         |                | 30,5            |                    |                  | 5,4                     |                           |        |
| $\tilde{n}_3(i) - a\tilde{n}_k(i)/a\tilde{n}_k(i) \cdot 100\% = \Delta n(i)$ | –19                                                          | –54            | 121             | 58                 | 25               | 0                       | –75                       |        |
| Сумма масс осадков за период исследования                                    |                                                              |                |                 |                    |                  |                         |                           |        |
| $Q_3(i) \cdot 10^3$ т                                                        | 15143                                                        | 28930          | 122789          | 128905             | 120022           | 49324                   | 28591                     | 493704 |
| $Q_k(i) \cdot 10^3$ т                                                        | 11007                                                        | 40244          | 47115           | 55851              | 52918            | 40085                   | 100351                    |        |
| $a \cdot Q_k(i) \cdot 10^3$ т                                                | 16378                                                        | 59883          | 70107           | 83106              | 78742            | 59646                   | 149552                    | 517414 |
| $Q_3(i) - a \cdot Q_k(i) \cdot 10^3$ т                                       | –1235                                                        | –30953         | 52682           | 45799              | 41280            | –10322                  | –120961                   | –23710 |
| $(Q_3(i) - a \cdot Q_k(i)) \cdot 100\% = \delta Q(i)\%$                      | –8                                                           | –51            | 75              | 55                 | 52               | –17                     | –80                       | –4     |

Анализ полученных результатов показывает, что разные облака, развивающиеся, к тому же, в различных условиях, по-разному реагируют на засев. Если в регионе или в конкретном сезоне общая сумма осадков сложилась в результате выпадения ливней 6 и 7 категорий, то засев приводит к уменьшению общей массы осадков этого периода, если же наибольший вклад составляли осадки ливней 1, 2, 3, 4, 5 категории, то итоговая сумма осадков в районе проведения противогололедных работ будет положительной. В этом, по нашему мнению, заключается причина получения различных результатов засева облаков в различных регионах.

В молдавском регионе, имеющем холмистый рельеф, ливни 6 и 7 групп наносят большой вред сельскому хозяйству и поэтому их уменьшение в результате противогололедного засева следует считать положительным эффектом. В итоге можно сделать следующие предположения. Уменьшение повторяемости очень слабых и слабых ливней, как и связанных с этими ливнями сумм осадков, является скорее всего, следствием интенсификации (в результате засева) осадков в этих категориях ливней и связанным с ней переходом их значительной части в последующие, более интенсивные категории. Исключение составляют некоторые облака (первой группы), дающие очень слабые ливни. Интенсификация засева осадкообразующих процессов в этих облаках, сформировавшихся в условиях не способствующих развитию конвекции, может приводить к их разрушению (Dinevich and Dinevich, 1994). Обычно вклад этих облаков в общую сум-

му осадков региона очень мал и поэтому их разрушение засевом не приносит особого вреда. В целом, интенсификация процессов осадкообразования противогололедным засевом происходит во всем наборе категорий ливней от слабых до особо опасных. Можно предположить, что за счёт этого процесса усиление очень сильных и особо опасных ливней приводит к существенному сокращению периода их жизни и соответствующему уменьшению сумм осадков из них (Dinevich and Dinevich, 1994). Интегральная сезонная сумма дополнительных осадков при противогололедном засеве зависит от повторяемости облаков, дающих в естественных условиях осадки той или иной интенсивности. Представленные на рис. 1 и в табл. 3 результаты получены в двух различных независимых экспериментах на различных полигонах и для различных по механизму развития облаков. Так, в первом случае это зимние облака слоистых форм, а во втором случае – летние. Тем не менее, можно думать, что абсолютная прибавка осадков в регионе при засеве облаков различных форм зависит не только от эффективности технологии воздействия, но и от региональных особенностей развития осадкообразующих процессов в конкретных термодинамических условиях соответствующего периода года.

#### Работы по увеличению осадков в Молдове из облаков зимнего и переходных периодов года

##### 1. Схема организации работ

Полёты самолётов для исследования облаков зимнего и переходного периодов

начались в Молдове в 1968 г, научные эксперименты по увеличению осадков из зимних облаков – в 1984 г. В период с 1988 по 1990 годы проводились производственные работы по увеличению осадков из облаков различных типов зимнего и переходного периодов. В них, наряду с самолётами Молдавской службы, принимали участие самолёты ЦАО и УкрНИГМИ. В ряде ситуаций в эксперименте одновременно участвовали до 5 самолётов. На этапе научных экспериментов и оценки потенциала облаков до 1988 года воздействия проводились над большей частью территории полигона, где наземные радиолокационные средства могли проводить контроль за их результатами. С 1988 года засев облаков проводился с целью увеличения осадков на мишени. Площадка для увеличения осадков (мишень) радиусом 30 км была выбрана с центром в 32 км к юго-востоку от Кишинёва в селе Ново Троицкое. Количественная оценка воздействий в производственном эксперименте проводилась по результатам сезонного увеличения осадков на мишени по сравнению с многолетней нормой этого периода для данного региона, а так же в сравнении с количеством осадков, выпавших в исследуемый период на окружающей территории (Лесков, 1991; Заболоцкая и др., 2001).

Пригодность облаков для засева определялась по критериям разработанным в экспериментах в Украине (Лесков, 1977). Технология и технические средства зависели от типов и структуры облаков и от атмосферных условий. При засевах применялись разные реагенты, в том числе хладореагенты (сухой лёд и жидкий азот) и льдообразующие реагенты (AgI). Осадки измерялись с помощью радиолокационного осадкомерного комплекса (МРВК) в г. Котовске (Dinevich et al., 1998) и сетевых осадкомерных приборов гидрометслужбы Молдовы. Полосы искусственных осадков фотографировались с экрана МРЛ–5, установленного в аэропорту г. Кишинева. Здесь на командном

пункте совместного базирования и управления движением самолётов и воздействиями на облачные процессы была вся радиолокационная информация о положении самолётов, их действиях и радиолокационные данные о структуре облаков и осадков. На базе этих данных руководитель выбирал оптимальную схему засева облаков и сообщал об этом на борт самолёта.

## 2. Результаты исследований пригодности облаков к воздействию (оценка потенциала засевов)

Полёты в Молдове планировались при ожидании фронтальных облаков, дающих осадки (Ns–As) или достаточно развитых фронтальных и внутримассовых облаков Sc, St, Ac, не дающих осадки. При подъёме самолета от нижней до верхней границы облачной системы определялись их основные параметры: фазовое состояние, температура, влажность, микрофизическое строение. Всего за период полетов в 1984–1988 гг. было проведено 96 зондирований облачных систем, в которых было исследовано 148 облачных слоев. В большинстве случаев (81,8%) эти исследования были проведены в областях пониженного давления (циклоны, ложбины). В 18,2% полетов облака находились в областях повышенного давления. При этих исследованиях оценивалась пригодность к воздействию каждого из облачных слоев и облачной системы в целом (в которой могло быть от одного до нескольких облачных слоев различных форм). Облачная система считалась пригодной для воздействия с целью увеличения осадков, если хотя бы один слой соответствовал критериям пригодности. Исследования облачных систем Ns–As, показали, что, несмотря на кажущуюся однородность, внутри них часто встречаются невидимые визуально, затопленные конвективные ячейки, области с устойчивыми восходящими и нисходящими движениями. Согласно данным табл. 4, фронтальные системы Ns–As и Ns в исследованной выборке были пригодны к воздействию на них в 80% случаев.

Таблица 4

Данные о пригодности облачных систем к воздействию (по данным зондирования облачной системы в течение одного вылета)

| Форма облаков | Пригодные облака |      | Непригодные облака |      | Всего ситуаций |     |
|---------------|------------------|------|--------------------|------|----------------|-----|
|               | $n_1$            | %    | $n_2$              | %    | $n$            | %   |
| Ns–As, Ns     | 24               | 80,0 | 6                  | 20,0 | 30             | 100 |
| As            | –                | –    | 3                  | 100  | 3              | 100 |
| Ac            | 2                | 25,0 | 6                  | 75,0 | 8              | 100 |
| Sc            | 12               | 35,3 | 22                 | 64,7 | 34             | 100 |
| St            | 7                | 33,3 | 14                 | 66,7 | 21             | 100 |
| Всего         | –                | –    | –                  | –    | 96             | –   |

*Приведенные данные позволяют считать, что работы по увеличению осадков, при засевах слоисто-дождевых облаков, дающих естественные осадки, имеют в Молдове хорошую перспективу.*

Вероятной причиной высокой степени пригодности этих облаков к засеву является географическое положение Молдовы. Западные и, особенно, юго-западные и южные относительно молодые циклоны проходя над этой территорией имеют большие запасы влаги. Южные циклоны над западной частью Чёрного моря часто замедляют своё движение. Смещаясь зимой над относительно теплым и незамерзающим Чёрным морем они получают дополнительную подпитку влагой и их облачные системы увеличивают свои водозапасы. Нередко южные циклоны стационарируют в районе Молдовы и западной половины Украины, что резко увеличивает длительность нахождения их облачных систем над фиксированным районом.

Облачные системы As отдельно наблюдались всего три раза и были непригодны к засевам (кристаллическое строение). Об-

лака, не дающие естественных осадков (Sc, St, Ac), в 33 % случаев были пригодны к засевам. При этом Ac были пригодны в 25 % случаев, Sc – в 35 % случаев и St – в 33 % случаев. В циклонических ситуациях в отдельных случаях наблюдались исключительно редкие сочетания облаков с высоким осадкообразовательным потенциалом. Например, 22.12.1987 г., в тыловой части циклона в зоне действия вторичного холодного фронта сформировалась мощная система облаков, состоящая из Ac (2550–3380 м), Sc (1870–2260 м) и Sc (1130–1280 м). Средняя температура слоя Ac была ниже минус 12,8 °C, а средняя влажность достигала 0,27 г/м<sup>3</sup>. Верхний слой Sc имел температуру минус 7 °C, а влажность 0,21 г/м<sup>3</sup>. Влажность нижнего слоя Sc составила 0,25 г/м<sup>3</sup>. Температура на его верхней и нижней границах соответственно равнялась минус 3 °C и минус 0,4 °C. Суммарный водозапас этой системы облаков превышал 500 г/м<sup>2</sup>. По данным зондирования была оценена также пригодность к воздействию отдельных облачных слоев. Результаты этой оценки представлены в табл. 5.

Таблица 5

Пригодность отдельных слоев облачных систем к воздействию (по данным зондирования отдельного облачного слоя в облачной системе)

| Форма облаков | Пригодные облачные слои |      | Непригодные облачные слои |      | Всего случаев |     |
|---------------|-------------------------|------|---------------------------|------|---------------|-----|
|               | $n_1$                   | %    | $n_2$                     | %    | $n$           | %   |
| Ns–As, Ns     | 32                      | 68,1 | 15                        | 31,9 | 47            | 100 |
| As            | 6                       | 54,5 | 5                         | 45,5 | 11            | 100 |
| Ac            | 2                       | 12,5 | 14                        | 84,5 | 16            | 100 |
| Sc            | 9                       | 18,0 | 41                        | 82,0 | 50            | 100 |
| St            | 7                       | 29,2 | 17                        | 70,8 | 24            | 100 |
| Всего         | –                       | –    | –                         | –    | 148           | –   |

Облачные слои систем Ns–As, Ns, как следует из табл. 5, были пригодны к воздействию в 68 % случаев. По сравнению с данными приведенными в табл. 4 это на 12 % меньше. Несовпадение данных табл. 4 и 5 объясняется тем, что при анализе систем Ns–As, Ns были случаи, когда они состояли из нескольких слоёв, например, двух, один из которых был пригоден к засеву, а второй нет. В этом случае вся система (ситуация) оценивалась, как пригодная к воздействию. Облачные слои As, которые наблюдались совместно с основными системами Ns, оказались пригодными к засеву в 54,5 % случаев. Засев As был целесообразен лишь в тех случаях, когда, образованные в смешанном по фазе слое этих облаков зародышевые кристаллы имели возможность вырастать до размеров частиц осадков в ниже расположенных слоях Ns.

Опыт экспериментальных и производственных работ показал, что пригодность к засеву облачных слоев следует контролировать постоянно, проверяя соответствие параметров облаков критериям пригодности. Для этого необходимо периодически (не реже одного раза в час) зондировать засеваемый слой. Без учета этих требований эффект засева слоистообразных облаков, не дающих осадков, может оказаться нулевым. Например, если есть лишь один слой As без лежащих ниже слоев (Ns; Ac; Sc), то засев его нецелесообразен, поскольку искусственные осадки с высоты 3–5 км до земли не долетят, испарившись в нижележащих безоблачных слоях, где не выполняется условие пересыщения надо льдом. Если же под As, пригодными к засеву, есть один, а еще лучше несколько облачных слоев, например, Ac, Sc, St, то частицы искусствен-

ных осадков из As смогут выпасть на землю. Эти рассуждения критериев не меняют, но в каждом случае, когда можно засеивать As, надо оценивать общую ситуацию. Если есть ниже засеваемого уровня облачные слои – засеивать и будут осадки; нет – засеивать не надо.

Облака As оказались пригодными к засеиву лишь в двух случаях (12,5%). Пригодность к засеиву облачных слоев Sc и St составила соответственно 18 и 29%. Как видим, при переходе к анализу отдельных слоев показатель их пригодности к засеиву снизился: для As и Sc – вдвое, а для St – на 4%. Это объясняется тем, что As, Sc, St часто наблюдаются в различных сочетаниях. Например, два слоя Sc, имеющие одинаковую толщину равную 350 м и разделенную безоблачной прослойкой толщиной 100–200 м в отдельности оцениваются, как непригодные к воздействию (из-за малой толщины). Эти же слои в сочетании представляют систему (ситуацию) пригодную для засеива, так как их суммарная толщина равна 700 м, а тонкая безоблачная прослойка между ними не препятствует их совместному засеиву. Анализ синоптических материалов показал, что пригодные для воздействий облачные системы Ns–As, Ns наиболее часто наблюдаются при прохождении теплых фронтов (58%). Пригодные для засеива As отмечены на теплом и вторичном холодном фронтах, а Sc – чаще всего на холодных фронтах (42%) и в гребнях (25%). Пригодные для засеива St наблюдались только в областях повышенного давления. Верхняя граница пригодных для засеива слоев Ns–As, как основного источ-

ника искусственных осадков, отмечалась в диапазонах высот 1510–3000 м (57%), 1010–1500 м (22%), 3010–4500 м (21% случаев). Толщина облачных слоев со смешанной фазой в системах Ns–As и Ns колебалась в диапазоне значений от 100 до 2000 м, а в двух случаях – превышала 2000 м. В большинстве случаев (26%), толщина этих слоев была в пределах 1010–1500 м. В 18% случаев она составляла 210–300 м.

Смешанные слои облачных систем As в двух случаях имели толщину 1010–1500 м (33%) и в одном случае толщина их превысила 2000 м. По одному случаю пришлось на диапазоны 110–200 м, 310–400 м, 410–500 м. Толщины As были в диапазонах 610–900 м, а Sc – в пределах 510–900 м. Толщина пригодных для засеива St была в пределах 410–800 м. Данные о температурном режиме на уровне верхней границы пригодных для воздействия слоев приведены в табл. 6. Температура на уровне верхней границы пригодных для воздействия слоев Ns–As колебалась в диапазонах от минус 4°C до минус 7,5°C (44,1% случаев), от минус 7,5°C до минус 10,0°C (20,6% случаев), от минус 10,0°C до минус 20,0°C (32,3% случаев). Температура ниже минус 30,0°C отмечена в одном случае. На уровне верхней границы пригодных слоев As температура была в пределах от минус 10,0°C до минус 25,0°C. Температура на уровне верхних слоев As, Sc, St была не ниже минус 12,5°C. Данные о водности исследованных слоев Ns–As немногочисленны, так как ее измерения велись только при использовании самолетов типа ИЛ-14.

Таблица 6

Повторяемость (в %) значений температуры на верхней границе пригодных для воздействия облачных слоев

| Форма облаков |      | Диапазон температур, град. С |              |               |               |               |               |               |          | Всего, % |
|---------------|------|------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------|----------|
|               |      | –4,0...–7,5                  | –7,6...–10,0 | –10,1...–12,5 | –12,6...–15,0 | –15,1...–20,0 | –20,1...–25,0 | –25,1...–30,0 | < –30,0  |          |
| Ns–As, Ns     | N, % | 15<br>44,1                   | 7<br>20,6    | 5<br>14,7     | 4<br>11,8     | 2<br>5,8      | –//–          | –//–          | 1<br>2,9 | 34 100   |
| As            | N, % | –//–                         | –//–         | 2<br>33,3     | –//–          | 2<br>33,4     | 2<br>33,3     | –//–          | –//–     | 6 100    |
| Ac            | N, % | 1<br>50,0                    | –//–         | 1<br>50,0     | –//–          | –//–          | –//–          | –//–          | –//–     | 2 100    |
| Sc            | N, % | 4<br>40,0                    | 4<br>40,0    | 2<br>20,0     | –//–          | –//–          | –//–          | –//–          | –//–     | 10 100   |
| St            | N, % | 4 100                        | –//–         | –//–          | –//–          | –//–          | –//–          | –//–          | –//–     | 4 100    |

В 12 случаях измерения средняя капельная водность пригодных для воздействия слоев Ns–As не превышала  $0,05 \text{ г/м}^3$ , в пяти случаях была в пределах  $0,06\text{--}0,10 \text{ г/м}^3$ , в одном случае составляла  $0,11\text{--}0,15 \text{ г/м}^3$ . Большое значение водности ( $0,41\text{--}0,45 \text{ г/м}^3$ ) зафиксировано в Ns–As из 19 измерений только один раз.

Измеренные значения водности в As и в As были соответственно менее  $0,10 \text{ г/м}^3$  (два измерения) и  $0,26\text{--}0,3 \text{ г/м}^3$  (одно измерение). В Sc в двух случаях водность не превышала  $0,05 \text{ г/м}^3$ , а в трех – была в диапазоне  $0,26\text{--}0,30 \text{ г/м}^3$ . В St водность была измерена один раз и оказалась в диапазоне  $0,26\text{--}0,30 \text{ г/м}^3$ . В отдельных экспериментах в различных типах облаков был рассчитан водозапас  $q$ ,  $\text{г/м}^2$  ( $q = W \Delta H$ , где  $W$  – водность,  $\text{г/м}^3$ , а  $\Delta H$  – толщина облачного слоя, м). Для Ns–As он оказался в пределах  $6\text{--}10 \text{ г/м}^2$  (четыре измерения),  $11\text{--}40 \text{ г/м}^2$  (четыре измерения) и  $41\text{--}100 \text{ г/м}^2$  (четыре измерения). Большой водозапас в системе Ns–As ( $301\text{--}350 \text{ г/м}^2$ ) отмечен лишь однажды (из 13 случаев измерения). В As капельный водозапас измерен дважды. В одном случае он был меньше  $5 \text{ г/м}^2$  и в одном – оказался в диапазоне  $31\text{--}40 \text{ г/м}^2$ . В As (одно измерение) водозапас оказался весьма значительным ( $201\text{--}250 \text{ г/м}^2$ ). В слоисто-кучевых облаках, пригодных для воздействия, в двух случаях водозапас был малым ( $11\text{--}30 \text{ г/м}^2$ ), а в трех – весьма значительным (от  $101$  до  $250 \text{ г/м}^2$ ). В St водозапас определен однажды и оказался в диапазоне  $101\text{--}150 \text{ г/м}^2$ .

*Проанализированная для зимнего и переходного периодов года выборка, вследствие эпизодичности полетов и случайности их реализации, неадекватна климатологическому ряду. Тем не менее, мы полагаем, что полученные результаты все же позволяют считать, что искусственное увеличение осадков в Молдове имеет большую перспективу.*

### *3. Результаты первой серии экспериментов (1984–1988 годы)*

Воздействия проводились при наличии в зоне экспериментального полигона пригодных для засева облаков. В качестве реагентов на начальном этапе применялся сухой лёд. Как и в экспериментах в Украине, большие брикеты углекислоты в самолётах Ил-14 и Ан-30 дробились на мелкие куски, сбрасываемые в облака с помощью специального дозатора. Диапазон дозировок был в пределах  $300\text{--}700 \text{ г/км}$ . В ряде экспериментов вдоль отдельных линий воздействия засев производился жидким азотом, которым были пропитаны пористые гранулы “аэросила”, сбрасываемые с самолета спе-

циальным контейнером – дозатором. Дозировки жидкого азота менялись в пределах  $50\text{--}650 \text{ г/км}$ . В отдельных экспериментах применялось также йодистое серебро ( $\text{AgI}$ ), которое вводилось в облака с помощью пиропатронов ПВ-26, содержащих по  $1,5 \text{ г}$   $\text{AgI}$ . Дозировка зависела от температуры воздуха и менялась в пределах  $2\text{--}6 \text{ г/км}$ .

Рассмотрим результаты тех экспериментов, в которых засеивалось пять или более линий и продолжительность воздействия в которых превышала 30 минут. Поскольку из облаков Ns – As выпадают естественные осадки, то об интенсификации осадкообразующего процесса в облачной системе можно судить по их увеличению. При засеивании облаков не дающих осадки (As, Sc, St) можно ожидать в них активацию искусственного осадкообразующего процесса.

Рассмотрим вначале эксперименты, в которых засеивались облачные системы Ns–As. Метеорологические характеристики этих облаков представлены в табл. 7. Из представленных данных следует, что метеорологические параметры засеянных облаков менялись в больших пределах. Уровни верхней границы засеянных облаков менялись от  $990$  до  $3250 \text{ м}$ , а толщина их – от  $140$  до  $2050 \text{ м}$ . Температура на уровне верхней границы этих слоев была в диапазоне от  $-3,2$  до  $-10,3^\circ\text{C}$ . Значения капельной водности облаков находились в диапазоне (от  $0,01$  до  $0,07 \text{ г/м}^3$ ), а водозапасы не превышали  $84 \text{ г/м}^2$ . Такие физические параметры слоисто-дождевых облаков свидетельствуют о невысокой интенсивности естественного осадкообразующего процесса в них. Однако, значительная протяженность по вертикали смешанных по фазе слоев указывает на большие перспективы воздействий на них с целью увеличения выпадающих осадков. Параметры и результаты засевов этих облаков представлены в табл. 8, а описание опытов и рис. 2 – в приложении 2.

Воздействия на слоисто-дождевые облака в Молдове, как и в Украине, показали, что радиолокатор часто не может объективно в количественном выражении оценить эффект воздействия на фоне радиоэхо от интенсивных естественных осадков. В то же время осадкомерная сеть регистрирует, при правильно выполненных засевах, значительное относительное увеличение осадков (до  $30\text{--}100\%$  и более).

Остановимся теперь на анализе результатов воздействия на облака, не дававших естественных осадков. Таких опытов, в которых было засеяно 5 или более линий, имеется пять. Метеорологические параметры облаков представлены в табл. 9. А информация о воздействиях на них, описание

опытов, рис. 3–7 и табл. 10 даны в приложении 3. В экспериментах по засеву облаков, не дающих естественных осадков, были использованы три реагента: твердый  $\text{CO}_2$ , жидкий  $\text{N}_2$  и  $\text{AgJ}$ . Результаты экспериментов показали, что при температуре облаков

не выше порога эффективного действия реагента (для  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$  – это минус  $4,0^\circ\text{C}$ , а для  $\text{AgJ}$  – минус  $7,0^\circ\text{C}$ ), воздействие всегда результативно, если достаточны толщина облачного слоя, его водозапас и соблюдают-ся критерии пригодности.

Таблица 7  
Метеорологические характеристики облаков, дающих естественные осадки

| Дата       | Синоп-<br>тическая<br>ситуация | Форма<br>обла-<br>ков | $H_{\text{ВГ}}$ ,<br>м | $\Delta H$ , м | Температу-<br>ра, $^\circ\text{C}$ |                 | $\bar{W}$ ,<br>г/м <sup>3</sup> | $\bar{q}$ ,<br>г/м <sup>2</sup> | Фазов.<br>строение   | Скорость<br>ветра, м/с | Примечания                                                                                           |
|------------|--------------------------------|-----------------------|------------------------|----------------|------------------------------------|-----------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|            |                                |                       |                        |                | $H_{\text{ВГ}}$                    | $H_{\text{НГ}}$ |                                 |                                 |                      |                        |                                                                                                      |
| 26.01.1984 | ТС, Ю Зп                       | Ns                    | 1940                   | 140            | -5,3                               | -4,0            | –                               | –                               | Смешан.<br>Смешан.   | 8                      | Слой с $t \leq -4^\circ\text{C}$<br>1810–1940 м                                                      |
|            |                                | Ns                    | 1660                   | 310            | -3,2                               | -2,1            | –                               | –                               |                      |                        |                                                                                                      |
|            |                                | Ns                    | 1260                   | –              | –                                  | -1,8            | –                               | –                               |                      |                        |                                                                                                      |
| 10.02.1984 | ТФ, Ю Зп                       | Ns                    | 990                    | –              | -4,1                               | –               | –                               | –                               | Смешан               | 15                     | Сильное обледенение                                                                                  |
| 25.01.1988 | Система ТФ                     | Ns                    | 1440                   | 1200           | -9,1                               | -8,5            | 0,07                            | 84                              | Смешан               | –                      | Сильное обледенение                                                                                  |
| 26.01.1988 | ТФ с<br>волнами                | Ns–As                 | 1770                   | > 610          | -8,4                               | -5,5            | 0,01                            | 6                               | Смешан               | –                      | Ns–As выше 1770 м<br>кристаллические                                                                 |
| 27.01.1988 | Ст Ф                           | Ns–As                 | 2260                   | >2050          | -10,2                              | -12,5           | –                               | –                               | Кристал-<br>лическое | 7                      | Выше 2260 м слой<br>Ns–As кристалличе-<br>ский. Зондирование<br>14.41–15.15                          |
| 27.01.1988 |                                | Ns–As                 | 1440                   | > 1100         | -8,3                               | -12,4           | 0,02                            | 22                              |                      |                        |                                                                                                      |
| 30.01.1988 | Система<br>ТФ                  | Ns–As                 | 3250                   | 880            | -9,9                               | -5,9            | 0,06                            | 53                              | Смешан.              | 6                      | Ниже засеянного<br>слоя еще один<br>слой Ns с ВГ около<br>2300 м. Ниже 2370 м<br>самолет не снижался |
| 31.01.1988 | ТФ                             | Ns–As                 | 2850                   | –              | -6,5                               | –               | 0,01                            | –                               | Смешан.              | –                      | Вся система Ns–As<br>–Cs была в диапа-<br>зоне высот<br>300 – 7000 м                                 |
| 18.03.1988 | ХФ                             | Ns–As                 | 3150                   | 300            | -10,3                              | -9,5            | 0,02                            | 6                               | Смешан               | –                      | Ниже 820 м –<br>3–5 баллов Frnb,<br>уровень их ВГ 190 м                                              |
|            |                                | Ns                    | 2630                   | 1810           | -7,1                               | -2,9            | 0,04                            | 72                              | Смешан.              |                        |                                                                                                      |

Примечание. В табл. 7 приняты следующие обозначения: Зп – циклон; Ю Зп – южный циклон; Az – антициклон; ТС – теплый сектор; ТФ и ХФ – теплый и холодный фронты; СтФ – стационарный фронт;  $H_{\text{ВГ}}$  – высота верхней границы;  $\Delta H$  – толщина слоя облаков;  $\bar{W}$  и  $\bar{q}$  – средние водность и водозапас.

Таблица 8  
Физические характеристики экспериментов при воздействии на облака, дававших естественные осадки

| Дата тип<br>самолета | Форма<br>обла-<br>ков | $H_{\text{ВГ}}$ , м | Время<br>воздействия,<br>ч, мин | $\Delta t$ ,<br>ч,<br>мин | Реа-<br>гент  | $P$ ,<br>г/км | N      | $L$ ,<br>км | $l$ ,<br>км | Результат воз-<br>действия                                     | Примечания                                                            |
|----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------------|---------------|---------------|--------|-------------|-------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 1                    | 2                     | 3                   | 4                               | 5                         | 6             | 7             | 8      | 9           | 10          | 11                                                             | 12                                                                    |
| 26.01.1984<br>ИЛ-14  | Ns                    | 1660                | 17.32–18.21                     | 0,49                      | $\text{CO}_2$ | 600–2600      | 6      | 24          | 3,0         | МРЛ видел 2 по-<br>лосы кристалли-<br>зации                    |                                                                       |
| 10.02.1984<br>ИЛ-14  | Ns                    | 990                 | 12.33–14.02                     | 1,29                      | $\text{CO}_2$ | 600           | 15     | 20          | 3,0         | Отмечалось су-<br>щественное уси-<br>ление радиозхо<br>осадков | Засев в слое Ns<br>по ВГ смешанно-<br>го слоя, сильное<br>обледенение |
| 25.01.1988<br>ИЛ-14  | Ns–As                 | 1440                | 17.25–18.24                     | 0,59                      | $\text{CO}_2$ | 400           | 10     | 20          | 3,6         | Отмечалось су-<br>щественное уси-<br>ление радиозхо<br>осадков | Бортаэролог от-<br>мечал уплотне-<br>ние облака в зоне<br>засева      |
| 26.01.1988<br>ИЛ-14  | Ns–As                 | 1770                | 13.11–13.54<br>13.56–14.22      | 0,43<br>0,26              | $\text{CO}_2$ | 150<br>600    | 7<br>5 | 20<br>20    | 3,6<br>3,6  | Отмечалось су-<br>щественное уси-<br>ление радиозхо<br>осадков | Бортаэролог от-<br>мечал уплотне-<br>ние облака в зоне<br>засева      |

Окончание табл. 8

| 1                   | 2     | 3                           | 4                                                        | 5                            | 6                                                                        | 7                         | 8                | 9                    | 10                       | 11                                                                                                                                 | 12                                                                                                                            |
|---------------------|-------|-----------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------------|----------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 27.01.1988          | Ns-As | 1150<br>(уровень<br>засева) | 12.21–12.48<br>12.50–13.20                               | 0,27<br>0,30                 | CO <sub>2</sub><br>CO <sub>2</sub>                                       | 300<br>120                | 4<br>3           | 24<br>24             | 3,0<br>3,0               | Отмечалось существенное усиление радиоэхо от осадков.                                                                              | Бортаэролог отмечал уплотнение облака в зоне засева.                                                                          |
| 27.01.1988          | Ns-As | 1440                        | 15.08–15.27<br>15.29–16.13                               | 0,19<br>0,44                 | CO <sub>2</sub><br>CO <sub>2</sub>                                       | 300<br>100                | 3<br>7           | 20<br>20             | 3,0<br>3,0               | Отмечалось существенное усиление радиоэхо от осадков.                                                                              | Бортаэролог отмечал уплотнение облака в зоне засева.                                                                          |
| 30.01.1988          | Ns-As | 3250                        | 12.21–12.28<br>12.32–13.49                               | 0,07<br>1,17                 | CO <sub>2</sub><br>CO <sub>2</sub>                                       | 5000<br>500               | 1<br>9           | 30<br>30             | 12<br>3,5                | МРЛ видел полосы радиоэхо от искусственных осадков, доходящих до земли (на фоне естественных осадков с $I_{\epsilon} \sim 1$ мм/ч) | Между линиями 1 и 2L = 12 км. До 80–90 % времени засев вёлся внутри смешанного слоя                                           |
| 31.01.1988<br>ИЛ-14 | Ns-As | 2850                        | 13.57–14.00<br>14.05–14.14<br>14.17–14.22<br>14.24–14.44 | 0,03<br>0,09<br>0,05<br>0,20 | CO <sub>2</sub><br>CO <sub>2</sub><br>CO <sub>2</sub><br>CO <sub>2</sub> | 1250<br>600<br>400<br>100 | 1<br>1<br>1<br>4 | 20<br>20<br>20<br>20 | 8,0<br>5,0<br>5,0<br>4,0 | Бортаэролог отмечал уплотнение облака в зоне засева                                                                                | Ручной сброс CO <sub>2</sub> . Дозатор – гранулятор АДГ-1                                                                     |
| 18.03.1988          | Ns-As | 2630                        | 14.39–15.11<br><br>15.19–15.39                           | 0,32<br><br>0,20             | N <sub>2</sub><br><br>CO <sub>2</sub>                                    | 560<br><br>300            | 5<br><br>3       | 20<br><br>20         | 3,6<br><br>3,6           | Бортаэролог отмечал уплотнение облака в зоне засева.<br>Бортаэролог отмечал уплотнение облака в зоне засева.                       | Засев внутри смешанного слоя. Хорошие условия для воздействия сохранялись. Метеоролог отмечал уплотнение облака в зоне засева |

Примечание. В табл. 8 приняты следующие обозначения:  $H_{\text{вг}}$  – высота верхней границы;  $\Delta t$  – продолжительность засева; Р – дозировка реагента;  $n$  – число линий засева;  $L$  – длина линии засева;  $l$  – расстояние между линиями.

Таблица 9

Метеорологические характеристики облаков, не дававших естественные осадки

| Дата       | Синоптическая ситуация | Форма облаков        | $H_{\text{вг}}$<br>м | $\Delta H$<br>м   | Температура, °С        |                      | Влагозапас<br>$q$ , г/м <sup>2</sup> | Ветер             |               |
|------------|------------------------|----------------------|----------------------|-------------------|------------------------|----------------------|--------------------------------------|-------------------|---------------|
|            |                        |                      |                      |                   | $H_{\text{вг}}$        | $H_{\text{нг}}$      |                                      | Направление, град | Скорость, м/с |
| 25.02.1984 | Гребень Az             | St op                | 1050                 | 700               | –4,2                   | –                    | –                                    | 140               | 7             |
| 22.12.1984 | ЮВ периферия Az        | St                   | 920                  | 370               | –9,3                   | –8,6                 | –                                    | 120               | 5             |
| 01.03.1987 | ХФ                     | Ac op<br>Sc op       | 2550<br>1250         | 450<br>570        | –10,5<br>–9,5          | –10,5<br>–6,5        | –                                    | 280               | 17            |
| 22.12.1987 | Тыл Zn Вторичный ХФ    | Ac op<br>Sc<br>Sc op | 3380<br>2260<br>1280 | 830<br>390<br>850 | –12,8<br>–7,0<br>–3,0  | –9,5<br>–5,7<br>–0,4 | 224<br>82<br>212                     | 350               | 12            |
| 22.12.1987 | Тыл Zn Вторичный ХФ    | Ac<br>Ac<br>Sc op    | 3480<br>2920<br>910  | 180<br>300<br>400 | –14,1<br>–10,2<br>–1,6 | –13,1<br>–9,1<br>1,4 | –<br>54<br>144                       | 360               | 12            |

Примечание. Обозначения в табл. 9 соответствуют обозначениям в табл. 7.

Проведенные опыты показывают, что, для достижения эффекта вообще и максимального, тем более, засев облаков и зон в них с целью увеличения осадков следует проводить избирательно, всякий раз соблюдая критерии и проверяя соответствие этим критериям физических параметров облаков. Без учёта этих требований эффект засева облачных слоёв может оказаться нулевым.

#### 4. Результаты второй серии экспериментов (1988–1990 годы)

В 1988–1990 годах в Молдове был проведен производственный эксперимент по увеличению осадков на закреплённой ми-

шени. Отличие данного эксперимента от предыдущих заключалось в следующем:

– более высокая, чем в исследовательском эксперименте, частота использования рабочих ситуаций;

– преимущественный засев тех облаков, осадки из которых, с учётом условий переноса, должны выпасть на мишень;

– использование (вместо брикетов) гранул сухого льда строго определённых параметров. Эти гранулы готовились с помощью специального гранулятора из жидкой углекислоты. Длина и диаметр гранул позволяли им до полного их испарения пролетать

в свободном падении более 500 м, засевая весь нижележащий слой облаков.

– применение жидкого азота непосредственно в переохлаждённой зоне облака. В отличие от ранее применявшихся насыщенных жидким азотом пористых шариков, в этих экспериментах жидкий азот вводился в переохлаждённую капельную зону облаков непосредственно из сосудов Дюара через специальные заборные форсунки;

– комплексное использование (исходя из рабочей ситуации) различных типов реагентов, в том числе гранул сухого льда, жидкого азота, пиропатронов с AgI.

– оценка результатов засева путём сравнения (за экспериментальный период) количества осадков, выпавших на мишени с соответствующей средней годовой нормой этого периода, а так же с количеством осадков на окружающей территории.

Таблица 10

Физические характеристики экспериментов при воздействии на облака, не дававшие естественные осадки

| Дата       | Форма облаков           | $H_{вг}$ , м         | Время воздействия, ч, мин                                | Реагент                            | $P$ , г/км<br>г/км            | $L$ , км             | $l$ , км                 | Результат воздействия<br>Данные МРЛ                                                                                                           |
|------------|-------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1          | 2                       | 3                    | 4                                                        | 6                                  | 7                             | 9                    | 10                       | 11                                                                                                                                            |
| 25.02.1984 | St op                   | 1050                 | 14.52-14.55<br>15.03-15.08<br>15.16-15.20<br>15.22-15.45 | $N_2$<br>$CO_2$<br>$N_2$<br>$CO_2$ | 50<br>600<br>100<br>350       | 12<br>20<br>16<br>20 | 3,0<br>3,0<br>3,0<br>3,0 | МРЛ видел все линии воздействия.<br>Интенсивные осадки на большой территории                                                                  |
| 22.12.1984 | St                      | 920                  | 13.23-13.50                                              | AgI                                | 6,0; 3,0;<br>1,5; 6,0<br>0,75 | 20                   | 3,6                      | МРЛ видел первые 4 линии.<br>Радиоэхо осадков до земли                                                                                        |
| 01.03.1987 | Ac op                   | 2550                 | 07.54-08.23                                              | $CO_2$                             | 600                           | 20                   | 4,5                      | МРЛ видел 4 линии и осадки доходящие до земли. Существенное увеличение осадков                                                                |
| 22.12.1987 | Ac op<br>Sc op<br>Sc op | 3380<br>2260<br>1280 | 09.59-11.10                                              | $CO_2$                             | 350                           | 20                   | 3,2                      | МРЛ видел зоны радиоэхо от интенсивных осадков, доходящих до земли. (27 дБZ на удалении 25 км)                                                |
| 22.12.1987 | Ac                      | 3480                 | 13.55-14.07<br><br>14.09-14.22                           | $CO_2$<br><br>$N_2$                | 350<br><br>600                | 16<br><br>16         | 3,0<br><br>3,0           | МРЛ видел 3 полосы.<br>Осадки до земли не доходят.<br>МРЛ видел первые 2 линии.<br>3-я линия засеяна по краю поля тонких Ac и не отмечена МРЛ |

Примечания. Обозначения в табл. 10 соответствуют обозначениям табл. 8.

Измерение осадков проводилось с помощью радиолокационного измерительного комплекса и метеорологических приборов гидрометслужбы. К сожалению, на эти годы, когда проводился производственный эксперимент, пришёлся период начала экономической нестабильности Молдовы. Вследствие частых перебоев с топливом для самолётов рабочие ситуации для засева использовались за экспериментальный период лишь на 30%.

Число дней с осадками в периоды ноябрь 1988 – апрель 1989, ноябрь 1989 – апрель 1990 годов составило 214, из которых воздействия проводилось 127 раз. В этот период время, пригодное для засева облаков, составило 2374 часов. Засев проводился лишь 750 часов. Средний слой осадков, выпавших на мишени, за этот период составил 375 мм, в том числе в 1988 году 189 мм, в

1989 году – 116 мм, в 1990 году – 70 мм. Средняя прибавка осадков, по сравнению с многолетней нормой рассматриваемых периодов для района, составила, соответственно, 16,8; 13,8; и 15,3%, а, по сравнению с количеством осадков, выпавших за этот период в нескольких административных районах окружающей контрольной территории – 15,2; 17,3 и 22%.

На рис. 2 представлены изолинии сумм дополнительных осадков в процентах по отношению к средней многолетней норме рассматриваемых периодов (ноябрь – апрель 1988–1989 годов и ноябрь – апрель 1989–1990 годов). (Здесь берётся норма за указанные периоды). Обращает на себя внимание то, что на мишени имеется, расположенное в её относительном центре, «ядро» максимальной прибавки осадков. Образование такого «ядра» в заранее заданном рай-

оне при естественном выпадении осадков маловероятно. Такая организованная структура изолиний количества осадков на мишени может быть объяснена лишь влияни-

ем засевов. Следует подчеркнуть и то, что полученный результат мог быть большим, если бы процент использования рабочих ситуаций для засева был выше.

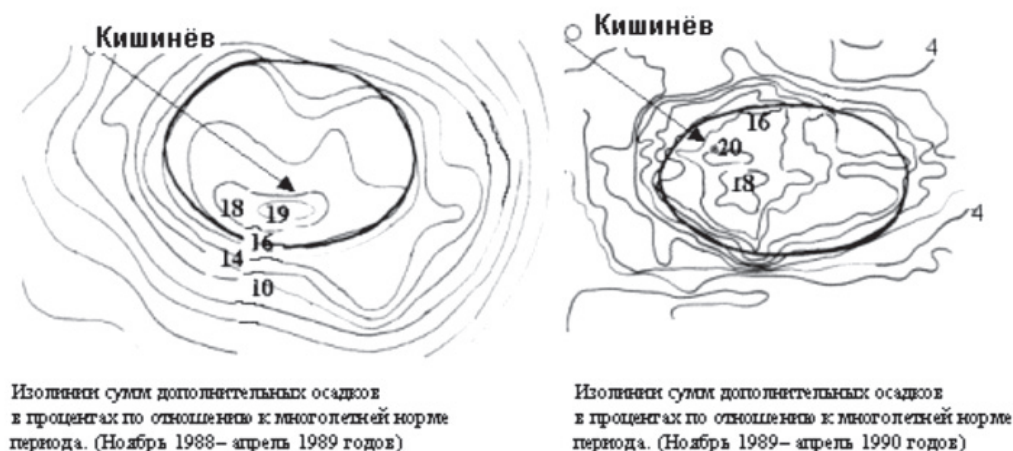


Рис. 2. Изолинии сумм дополнительных осадков в процентах по отношению к среднегодовой норме рассматриваемых периодов (ноябрь – апрель 1988–1989 годов и ноябрь – апрель 1989–1990 годов)

### Заклучение

Проведенные в Украине и Молдове многолетние экспериментальные и опытно-производственные работы по воздействию на облачные системы различных типов с целью увеличения осадков приводят нас к следующим выводам.

– В облачных системах Ns–As, часто встречаются, невидимые визуально, затопленные конвективные ячейки – области с устойчивыми восходящими и нисходящими движениями. Ячейки с восходящими движениями наиболее эффективно реагируют на засев;

– Технология засева всех видов облаков с целью увеличения осадков, независимо от региональных особенностей местности, должна учитывать физические параметры облачного образования в момент воздействия. Ввод реагента должен производиться «прицельно» только в тот объем облака, параметры которого соответствуют выбранному критерию и, как мы полагаем, обеспечивают в нём требуемые микрофизические преобразования (кристаллизацию капельной воды и резкое, на 1–2 порядка, увеличение концентрации кристаллов). При нарушениях требований технологии эффективность засева облачных слоёв уменьшается до уровня, при котором воздействие становится экономически бессмысленным;

– При воздействии на облачные системы Ns–As, дающие естественные осадки, количество дополнительных осадков в среднем в 10 раз больше, чем единовременный капельный водозапас засеянного слоя облака. Для облаков Sc, St, Ac это отношение

получаемого в экспериментах количества дополнительных осадков к капельному водозапасу меньше единицы и в большинстве случаев лежит в пределах 0,1–0,5. Этот результат позволяет сделать вывод, что засев облачной системы Ns–As интенсифицирует осадкообразующие процессы и увеличивает (ускоряет) механизм переработки в осадки подоблачной влаги. Засев облачных полей Sc, St, Ac, не дающих естественных осадков, приводит к образованию и росту (а также коагуляции) ледяных кристаллов до размеров частиц осадков только за счёт некоторой части облачного капельного водозапаса. После выпадения искусственных осадков эти облака рассеиваются.

Полученные числовые значения отношений количества дополнительных осадков к капельным водозапасам засеваемых слоёв облаков, а также результаты специальных экспериментов приводят к однозначному выводу, что основным объектом воздействия с целью получения дополнительных осадков из облаков неконвективной природы могут быть только облачные системы Ns–As (около 90% общей добавки осадков). Засеянные облачные поля Sc, St, Ac могут представлять лишь вспомогательный источник дополнительных осадков (до 10% общей добавки).

Засев таких облаков целесообразен только при значительных их толщинах (более 500–700 м) и водозапасах (более 100 г/м<sup>2</sup>), а также при решении специальных задач. Например, при необходимости получения хотя бы небольшого снежного покрова перед сильным похолоданием, что

позволило бы избежать вымерзания озимых культур.

– Засев облачной ячейки по противогорадовой технологии (большим количеством льдообразующих реагентов) в ряде случаев может приводить к увеличению количества осадков, а в ряде случаев к их уменьшению. В выполненном в Молдавии многолетнем эксперименте относительная частота повторения очень слабых и слабых ливней уменьшилась под влиянием противоголового засева на 19 и 54% соответственно. В то же время существенно возросла частота повторения умеренных (на 121%), значительных (на 58%) и сильных (на 25%) ливней. Частота очень сильных ливней осталась практически неизменной, а частота появления особо опасных ливней под влиянием засева уменьшилась вчетверо. Соответственно изменился и режим осадков. Масса осадков уменьшилась в группе очень слабых ливней на 8%, в группе слабых ливней на 51% и увеличилась в группах умеренных (на 75%), значительных (на 55%) и сильных (на 52%) ливней. В группах очень сильных и особо опасных ливней вновь отмечено уменьшение массы осадков на 17 и 80% соответственно.

– Увеличение осадков при засеве отмечается только в том случае, если он совпадает с периодом развития облачной ячейки и, наоборот, приводит к обратному эффекту, если он совпадает с периодом её диссипации. Исключение, по данным экспериментов, составляют очень слабые облачные ячейки, развивающиеся в условиях слабой конвекции. Засев большим количеством реагента таких ячеек в ряде случаев приводит к их разрушению. Интенсификация осадкообразующего процесса в облаках, дающих очень сильные и опасные ливни приводит к их ускоренному разрушению и соответственно к уменьшению осадков из них. Для получения максимального количества осадков из конвективных облаков за сезон воздействия не следует засевать облачные ячейки дающие при естественном развитии очень слабые, очень сильные и особо опасные ливни (распределение ливней по категориям см. в разд. 3). Знак и величина эффекта воздействия на облачную ячейку – сложная функция её состояния и термодинамических условий развития в момент засева;

– Технические средства воздействия и реагенты следует использовать с учётом реального состояния облачных образований. Например, на различных участках фронтального процесса могут развиваться различные облачные процессы, в том числе одновременно слоистая и конвективная структура. В этих ситуациях может оказывать

ся наиболее эффективным применение гранул сухого льда для засева верхней границы слоистых образований и одновременно пиропатроны с AgI для засева конвективных ячеек. В ряде ситуаций может оказаться наиболее целесообразным засев облачных слоёв или конвективных ячеек через их нижнюю границу, в том числе с помощью противоголового ракет.

– Количественные результаты воздействий на облачные процессы, при условии выполнения общих требований, зависят от региональных синоптических особенностей конкретного региона и периода. Например, климатические условия Молдавского региона создают весьма перспективные возможности для существенного увеличения здесь осадков во все периоды года, в том числе летом до 25%, в остальной период – до 20%.

#### *Благодарности*

*Авторы благодарят своих коллег из Молдавской Военизированной Службы по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, которые в радиолокаторах, около пусковых установок и в самолётах на протяжении многих лет обеспечивали сбор экспериментальных данных. Особую благодарность авторы выражают специалистам этой Службы, ЦАО и УкрНИГМИ непосредственно участвовавшим в экспериментах, среди них Леонид Абрамович Видиборский, Евгений Михайлович Ливиц, Владимир Абрамович Диневич, Николай Васильевич Воробьёв, Майя Васильевна Вычужанина, проф. Аркадий Борисович Шупяцкий, Евгений Иванович Кравченко.*

*С особой благодарностью мы храним память о тех профессорах, с которыми на протяжении многих лет планировали и обсуждали научные результаты этих работ, среди них Иван Иванович Гайворонский, Михаил Петрович. Леонов, Юрий Алексеевич Серёгин, Альберт Алексеевич Черников, Саломон Моисеевич Шметер.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абшаев М., Климовская Л. О влиянии противоголового работ на интенсивность и количество осадков // Труды ВГИ. – 1976. – Вып. 33. – С. 123–131.
2. Беляев В., Данелян Б., Зацепина Л., Зимин Б., Серёгин Ю., Черников А., Вальдес М., Мартинес Д. Результаты рандомизированных экспериментов по засеву конвективных облаков на Кубе // Активные воздействия на гидрометеорологические процессы: труды Всесоюзной конференции. Киев, 17–21 ноября 1987 года. – Л.: Гидрометиздат, 1990. – С. 214–220.
3. Боровиков А.М. и др. Физика облаков. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 459 с. (авторы: Боровиков А.М., Гайворонский И.И., Зак Е.Г., Костарев В.В., Мазин И.П., Минервин В.Е., Хргиан А.Х., Шметер С.М.).
4. Буйков М., Боднарчук Ю., Войт Ф., Корниенко Е., Кузьменко А., Осокина И., Смородинова Л., Фурман А., Хусид С., Шедеменко И. Оценка результатов экспериментов

- УКРНИГМИ Госкомгидромета СССР по искусственному увеличению осадков // Активные воздействия на гидрометеорологические процессы: труды Всесоюзной конференции, г. Киев, 17–21 ноября 1987 года. – Л.: Гидрометиздат, 1990. – С. 220–227.
5. Вычужанина М., Гайворонский И. Изучение режима жидких осадков при искусственных воздействиях на градовые процессы // Труды ЦАО. – 1976. – Вып. 104. – С. 64–69.
6. Галаджий Н., Лесков Б., Сухомлинова В. О критериях пригодности зимних слоистых облаков к засева с целью увеличения осадков // Активные воздействия на гидрометеорологические процессы: труды Всесоюзной конференции, г. Киев, 17–21 ноября 1987 года. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – С. 360–363.
7. Диневич Л., Диневич С., Кудлаев Е., Леонов М. Физико-статистические исследования влияния противоработного засева кучево-дождевых облаков на режим осадков // Обзорение прикладной и промышленной математики. – М.: Научное изд-во «ТВП», 1995. – С. 253–287.
8. Заболоцкая Т., Лесков Б., Подгурская В., Шпиталь Т. Оценка возможного количества искусственных осадков из облаков холодного периода года над Украиной // Труды УкрНДГМИ. – 2001. – Вып. 248. – С. 57–66.
9. Злотников М., Строкань А. Влияние противоработных работ на количество выпадающих осадков // Труды САРНИГМИ. – 1975. – Вып. 35.
10. Качурин Л. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 455 с.
11. Корниенко Е. Результаты эксперимента по воздействию на кучево дождевые облака с целью искусственного регулирования осадков // Труды УкрНИИ. – 1982. – Вып. 187. – С. 3–25.
12. Корниенко Е., Смородинцева Л., Уманский Н., Шедеменко И. Зависимость эффекта воздействия на кучево-дождевые облака от параметров облаков // Активные воздействия на гидрометеорологические процессы: труды Всесоюзной конференции, г. Киев, 17–21 ноября 1987 года. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – С. 239–242.
13. Курбаткин В., Рахман-Зада Г., Ушинцева В. Трёх-летний эксперимент по увеличению осадков в Средней Азии // Активные воздействия на гидрометеорологические процессы: труды Всесоюзной конференции, г. Киев, 17–21 ноября 1987 года. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – С. 243–248.
14. Леонов М., Перелёт Г. Активные воздействия на облака в холодное полугодие. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 150 с.
15. Леонов М., Диневич Л., Диневич С. Климатическое обоснование увеличения зимних осадков в Молдавии. Климатические и микроклиматические исследования в Молдавии. – Кишинёв: Штиинца, 1985. – С. 45–52.
16. Лесков Б. Выделение зон усиленных осадков при воздействиях на фронтальные облака. Труды УкрНИГМИ. – 1970. – Вып. 86. – С. 23–31.
17. Лесков Б., Неробеева Т. О пригодности к воздействиям фронтальных облаков, дающих осадки // Труды УкрНИГМИ. – 1971. – Вып. 103. – С. 34–41.
18. Лесков Б. Параметры облаков, засевавшихся в экспериментах по регулярному увеличению осадков // Труды УкрНИГМИ. – 1977. – Вып. 152. – С. 74–79.
19. Лесков Б. О соотношении между дозировкой реагента и шириной зоны кристаллизации // Активные воздействия на гидрометеорологические процессы: труды Всесоюзной конференции, г. Киев, 17–21 ноября 1987 года. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – С. 412–417.
20. Лесков Б. Технологические аспекты производственного увеличения зимних осадков // Труды УкрНИГМИ. – 1991. – Вып. 242. – С. 3–17.
21. Лесков Б. Об оценке количества дополнительных осадков при регулярных воздействиях на слоистообразные облака // Труды УкрНИГМИ. – 1991. – Вып. 242. – С. 17–28.
22. Мазин И., Шмистер С. Облака строение и физика образования. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 279 с.
23. Никандров В. Искусственные воздействия на облака и туманы. – Л.: Гидрометеиздат, 1959. – 256 с.
24. Половина И. Воздействия на внутримассовые облака слоистых форм. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 214 с.
25. Сулаквелидзе Г. Ливневые осадки и град. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 410 с.
26. Сулаквелидзе Г., Бротгандель А., Климовская Л., Сулаквелидзе М. Влияние проведения противоработных работ на количество выпадающих осадков // Метеорология и гидрология. – 1973. – № 8. – С. 98.
27. Шишкин Н. Облака, осадки и грозное электричество. – 2-е изд. – Л.: Гидрометеиздат, 1964. – 401 с.
28. Шмистер С. Физика конвективных облаков. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 288 с.
29. Abbas A., Halabi S. Cloud Seeding in Syria 1991-1993 Results and Efficiency. Sixth WMO Scientific Conference on Weather Modification. Paestum, Italy (30 May – 4 June 1994). – 1994. – P. 325–328.
30. Akimov N., Leskov B. Comparison of various methodologies for distinguishing zones of intensive precipitation // Transactions of the UKR NIIGMI. – 1971. – Issue 103. – P. 34–41.
31. Elliott R. Seeding effects on convective clouds in the Colorado River Basin Pilot Project // Journal of Weather Modification. – 1984. – Vol. 16, № 1. – P. 30–33.
32. Changnon S. A review of methods to evaluate precipitation modification in North America. Proc. WMO/IAMAP, Sci. Conf. Weather Modification, Tashkent, 1-7 Oct. 1973. WMO. – 1974. – № 399. – P. 397–422.
33. Chernikov A., Koloskov V., Seregin Ju., Zimin B. Results of experiments on precipitation enhancement from the convective clouds in the Camaguey experimental area, Cuba. In: Reports on the Sixth WMO Scientific Conference on Weather Modification (Paestum, Italy, May – June 1994). – 1994. – Vol. 2. – P. 361–363.
34. Gabriel K., Rosenfeld D. The second Israeli rainfall stimulation experiment: analysis of precipitation on both targets // J. Applied Meteorology. – 1990. – № 29. – P. 1055–1067.
35. Gagin A., Neyman J. Rain stimulation and cloud physics in Israel. In: Weather and Climate Modification. / Ed. By W.N. Hess. – New York: Wiley-Interscience, 1974. – P. 454–459.
36. Gagin A., Neyman J. The second Israeli randomized cloud seeding experiment: Evaluation of the results // J. Appl. Meteor. – 1981. – № 20. – P. 1301–1311.
37. Dinevich L., Dinevich S., Leonov M., Seregin Ju., Berulev G. Precipitation Characteristics Variations Effected by Hail Protection Techniques. – Jerusalem: MIKA, 1998. – P. 165–193.
38. Dinevich L., Dinevich S. The Effect of Hail Suppression Seeding of Cumulonimbus Clouds on Precipitation Forming Processes. Part 1 and Part 2. Proceedings of the Fifth National Symposium with International Participation «Physics – Agriculture». – Sofia, 1994. – P. 1–6.
39. Yoshida Sakumatsu Evolution of cloud seeding effect by statistical analysis of snowfall amount in the Tohoky district, Japan. «Sci. Repts Tohoky Univ.» – 1965. – Ser. 5, 16, №1.
40. Kriege Daniel F. Operational cloud seeding // J. Amer. Water Works Assoc. – 1969. – 61, №3.
41. Neiburger M., Chin Cho Chin The meteorological factors associated with the precipitation effects of Swiss Hail Suppression Projec // J. Appl Meteorology. – 1969. – Vol. 8. – P. 264–273.
42. Rosenfeld D., Woodley W., Silverman D., Hartzell C., Khantiyanam W., Sukamjanaset W., Sudhikoses P. New results and insights to dynamic cloud seeding. In: Reports on the Sixth WMO Scientific Conference on Weather Modification (Paestum, Italy, May – June 1994). – 1994. – Vol. 2. – P. 401–405.
43. Schaefer Vincent J. Some problems concerning Weather control // L. angew. Math. and Phys. – 1963. – 2, № 3.

44. Siliceo E., Perez A., Ahumada A., Mosino P.A. Twelve years of cloud seeding in the Necaxa Watershed, Mexico // J. Appl. Meteorol. – 1963. – 2, № 3.

45. Shipilov O., Koloskov B. and Abbas A. Statistical Evaluation of Cloud Seeding Operation in Syria (1991-1993). Sixth WMO Scientific Conference on Weather Modification. Paestum, Italy (30 May – 4 June 1994). – 1994. – P. 341–344.

46. Stanley A., Changnon, Robert C. Czys, and Steven Hollinger Ollinois State Water Survey, Champaign, Illinois, USA. The Integration of Meteorological, Technological, Economic, and Legal Factors Affecting use of Precipitation Modification in the Central United States. Sixth WMO Scientific Conference on Weather Modification. Paestum, Italy. – 1994. – P. 271–274.

47. William R., Cotton. Weather Modification by Cloud Seeding – A Status Report 1989-1997. Colorado State University Department of Atmospheric Science. Fort Collins, CO 80523. – <http://rams.atmos.colostate.edu/gkss.html>

### Приложение 1 (к параграфу 3)

Под конвективной ячейкой градового облака понимается активная часть конвективного облака с наиболее развитыми восходящими (нисходящими) потоками, обуславливающими его развитие (разрушение), образование и сосредоточение крупных облачных частиц и осадков, благодаря чему, как правило, обнаруживается метеорологическим радиолокатором. Из такой ячейки идут ливневые осадки. Данный термин соответствует принятому Госкомгидрометом СССР термину конвективная ячейка (ОСТ 52.11.25-86).

Экспериментальная единица осадков (эе) – ливень.

Количественно ливень измеряется либо в весовом выражении  $Q$ , млн. т/км<sup>2</sup> (вес воды, выпавшей из ливня на единице или на заданной площади), либо в виде слоёв воды  $R$ , ммR, выпавшей за ливень на изучаемой территории.

Приложение 2. Описание отдельных экспериментов при воздействии на облака с естественными осадками

**Опыт 26.01.1984 г.** Многослойные Ns. Засев выполнялся реагентом CO<sub>2</sub> по верхней границе среднего слоя Ns (1660 м,  $t = -3,2^{\circ}\text{C}$ ) с помощью самолета ИЛ-14. Всего за 49 минут засеяно 6 линий. Дозировки: 1-я и 2-я линии – по 1200 г/км, 3 линия – 2600 г/км, 4 линия – 650 г/км, 5 линия – 1000 г/ км, 6 линия – 600 г/км. Расстояние между линиями – 3 км. На экране радиолокатора МРЛ-5 в течение 15–20 мин были видны две слабые, но чётко выраженные линии повышенного радиоэхо на фоне радиоэхо от слабых естественных осадков. Бортаэролог в самолёте отмечал существенное уплотнение облака. Полученный результат показал, что в отдельных ситуациях линии воздействия могут быть видны на экране радиолокатора даже на фоне радиоэхо от слабых естественных осадков.

**Опыт 10.02.1984 г.** проведен в Ns, сформировавшихся на теплом фронте южного

циклона. Система облаков была многослойной. Смешанный по фазовому строению слой Ns, пригодный к засеву, имел верхнюю границу на уровне 990 м, где температура равнялась минус 4,1 $^{\circ}\text{C}$ . В этом слое отмечалось сильное обледенение. Выше засеваемого слоя отмечалось 10 баллов Ns, кристаллических по фазовому строению. Всего самолетом ИЛ-14 в течение 1 час 29 мин засеяно 15 линий. Дозировка CO<sub>2</sub> – 600 г/км. Радиоэхо от осадков усилилось. Руководитель воздействиями отмечал значительную интенсификацию осадков.

**Опыт 25.01.1988 г.** слой Ns–As. Параметры облаков и условия засева представлены в табл. 7 и 8. Засев велся внутри облачной системы по верхней границе пригодного для воздействий слоя. Дозировка CO<sub>2</sub> – 400 г/км. Засеяно 10 линий длиной по 20 км. Расстояние между линиями – 3,6 км. Условия для воздействия были очень благоприятные. Бортаэролог в самолёте наблюдал существенное уплотнение облаков в зоне засева. Радиоэхо от осадков усилилось.

**Опыт 26.01.1988 г.** был выполнен в системе Ns–As, сформировавшейся на теплом фронте. Внутри облачной системы на уровне 1770 м засеян пригодный для воздействия слой. На уровне засева температура была –8,4 $^{\circ}\text{C}$ , капельная водность слоя – (0,01 г/м<sup>3</sup>). Выше уровня засева были кристаллические Ns–As. Дозировка CO<sub>2</sub> в процессе воздействия менялась от 150 до 600 г/км. На экране радиолокатора было отмечено радиоэхо, напоминающее полосы кристаллизации. Длина этих полос находилась в пределах 20–25 км. В этом же секторе радиолокатор отмечал усиление осадков.

**В опыте 27.01.1988 г.** Засеяна кристаллическая система Ns–As на уровне 1150 м, где температура была –10,2 $^{\circ}\text{C}$ . Облачная система сформировалась на стационарном фронте. Воздействие на этот слой выполнено в период с 12.21 до 13.20. Дозировка CO<sub>2</sub> была 300 г/км (4 линии) и 120 г/км (3 линии). Засев осуществлялся на фоне естественных осадков. Отмечалось усиление радиоэхо.

В этот же день в период 15.08 до 16.13 был проведен еще один опыт. К этому времени в облачной системе появился пригодный для воздействия слой. Его верхняя граница была на уровне 1440 м, температура воздуха на этой высоте составляла –8,3 $^{\circ}\text{C}$ , а в нижней части этого слоя на высоте 340 м она понижалась до –12,4 $^{\circ}\text{C}$ . Слой был смешанным по фазе. Средняя водность в нем составляла 0,02 г/м<sup>3</sup>. Такие условия следует считать весьма благоприятными для воздействия. Радиоэхо после воздействий существенно усилилось.

**Опыт 30.01.1988 г.** Засеяна система Ns–As, сформировавшаяся на теплом фронте. Смешанный по фазовому строению слой этой системы располагался на высотах 2430–3250 м. Его средняя водность составила  $0,06 \text{ г/м}^3$ , а водозапас достигал  $53 \text{ г/м}^2$ . Температура на верхней границе этого слоя была  $-9,9^\circ\text{C}$ . Выше уровня засева (3250 м) было 10 баллов неплотных As–Cs.

В этом эксперименте твердым  $\text{CO}_2$  было засеяно 10 линий длиной по 30 км. Первая линия засеяна с дозировкой  $500 \text{ г/км}$  в период от 12 ч 21 мин. Затем, с 12.32 до 13.49 засеяно еще 9 линий. Вторая линия засеяна на удалении 2 км от первой с дозировкой  $500 \text{ г/км}$ . Следующие 8 линий засевались тоже с этой дозировкой. Расстояния между этими девятью линиями было  $3,5 \text{ км}$ . На конечном радиолокационном разрезе, выполненном в 13 ч 11 мин, рис. 3 можно видеть полосовые структуры, соответствующие зонам кристаллизации от засеянных параллельных линий. В последующем МРЛ-5 наблюдал обособленную зону усиленных осадков, что подтверждало положительный эффект воздействия.

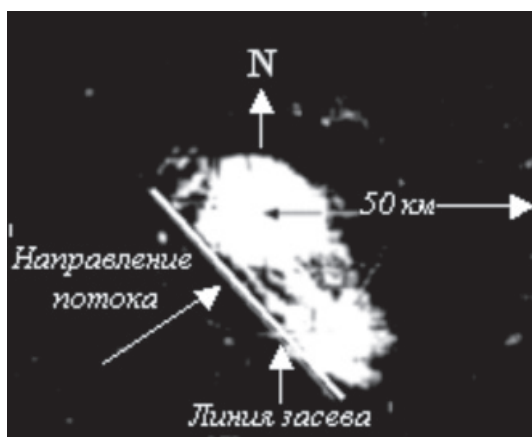


Рис. 3. Радиоэхоло искусственных осадков в зоне Кишинёва и его аэропорта.  
30.01.88 года в 13.11

**Опыт 31.01.1988 г.** Воздействие на систему Ns–As, образовавшуюся на теплом фронте. Засевался смешанный по фазовому строению слой на высоте 2850 м. Температура на этом уровне была  $-6,5^\circ\text{C}$ , а водность –  $0,01 \text{ г/м}^3$ . Всего было засеяно 7 линий с различными дозировками твердого  $\text{CO}_2$ . Метеорологические параметры системы приведены в табл. 7. Наблюдения показали, что радиолокаторы на фоне сильных естественных осадков (интенсивность  $0,6\text{--}1,2 \text{ мм/ч}$ ) линий засева обнаружить не смогли. Хотя и в этом эксперименте в очередной раз отмечалось существенное усиление радиоэхо от зоны осадков после воз-

действия. Бортоэролог в самолёте отмечал существенное уплотнение облаков в зоне засева.

**Опыт 18.03.1988 г.** Система Ns–As сформировалась на холодном фронте. В этой системе было обнаружено два смешанных по фазовому строению слоя пригодных для воздействия. Засевался нижний из них на уровне 2630 м, где температура составила  $-7,1^\circ\text{C}$ . Средняя водность в этом слое была  $0,04 \text{ г/м}^3$ , а водозапас –  $72 \text{ г/м}^2$ . Длина линий была 20 км, а расстояние между ними  $3,6 \text{ км}$ . Дозировка жидкого азота составила  $560 \text{ г/км}$ . Затем еще 3 линии были засеяны твердым  $\text{CO}_2$ , дозировка  $300 \text{ г/км}$ . Радиолокационные наблюдения отмечали усиление радиоэхо, но на фоне усиливающихся естественных осадков не обнаружили линий засева.

Приложение 3. Описание отдельных экспериментов при воздействии на облака, не дающие естественных осадков

**25 февраля 1984 г.** В этот день над центральной Молдовой отмечались плотные слоистые облака St, которые сформировались на юго-западной периферии антициклона.

**Первый эксперимент** был начат в 11.30. С самолета Як-40 йодистым серебром ( $\text{AgI}$ ) было засеяно 3 линии длиной по 25 км. Расстояние между линиями  $4,9 \text{ км}$ . Воздействие велось с высоты 100 м над верхней границей облаков с помощью пиропатронов ПВ-26. На первой и третьей линиях расстояние между точками отстрела пиропатронов было 400 м, что соответствовало дозировке  $4 \text{ г/км}$ . При засеве второй линии дозировки были  $2 \text{ г/км}$  (между выстрелами 800 м). Первые две линии засеяны к востоку – юго-востоку от аэропорта Кишинев на удалении 10–30 км. Третья линия засеяна севернее аэропорта на удалении 10 км.

В период воздействия облака имели следующие параметры. Верхняя граница 1230 м, нижняя – 830 м. Толщина облаков 400 м. Температура воздуха на верхней и нижней границах соответственно равнялась минус  $7,2^\circ\text{C}$  и минус  $6,9^\circ\text{C}$ . В облаках было сильное обледенение.

Целью этого эксперимента была проверка возможности обнаружения радиолокатором полос кристаллизации и искусственных осадков после засева облаков йодистым серебром. Визуальные наблюдения показали, что в результате воздействия образовались три полосы кристаллизации. Однако, они имели ширину около 2 км и в одну общую зону не объединились. Радиолокатор зафиксировал все три полосы искусственных осадков. Радиоэхо от них достигало земли. В дальнейшем было зафиксировано умень-

шение высоты верхней границы и увеличение толщины облаков. Зондирование выполненное в 14.45 показало, что толщина облаков достигла 760 м. Верхняя граница была на уровне 1050 м, а нижняя на высоте 290 м. Температура на этих уровнях соответственно равнялась минус 4,2°C и минус 6,5°C. Минимум температуры (минус 7,0°C) отмечен на высоте 950 м. Отмечалось сильное обледенение.

**Второй эксперимент.** Засев проводился с самолета ИЛ-14 в период с 14.52 по 15.45. За это время было засеяно 7 линий. При этом первая линия (длина 12 км) и третья (длина 16 км) были засеяны жидким азотом, который вводился в облака в пористых гранулах «аэросила» при полёте самолета на высоте 1000 м, т.е. на 50 м ниже уровня верхней границы. На первой линии дозировка  $N_2$  была 50 г/км, а на третьей – 10 г/км.

Остальные 5 линий с уровня верхней границы облачного слоя засеяны твердым  $CO_2$ . Дозировка на линии 2 – 600 г/км, а на 4–7 линиях – по 350 г/км. Длина линий, засеянных твердым  $CO_2$ , – 20 км. Воздействие проведено на юго-востоке от аэропорта Кишинев на удалении 20–25 км. Ветер в слое облаков был 140° – 7 м/с. Предполагалось, что искусственные осадки выпадут на г. Кишинев, включая и территорию аэропорта. В результате воздействия были получены интенсивные искусственные осадки. При выходе зоны осадков на аэропорт горизонтальная видимость уменьшилась до 400–500 м, что привело к закрытию аэропорта Кишинев и возврату на запасной аэродром Одессы семи тяжелых пассажирских самолетов. Эффект воздействия хорошо заметен на снимках с экрана радиолокатора. На рис. 4 показан конический разрез выполненный в 15.56. На снимке хорошо видно пять полос искусственных осадков. Две из них, первая и третья, – от воздействия жидким азотом (первая на снимке слева – вблизи центра круга) и три от засева твердым  $CO_2$ . Две последние линии к моменту фотографирования еще не проявились. Таким образом, воздействие на St op, выполненное двумя реагентами, привело к образованию интенсивных осадков. Радиолокационные наблюдения показали, что зоны кристаллизации и искусственных осадков, полученные от засевов твердым  $CO_2$  и жидким  $N_2$ , были практически одинаковыми. Заметим при этом, что дозировка жидкого  $N_2$  была в 3–12 раз ниже, чем твердого  $CO_2$  (табл. 10).

Время 15.56. Белые полосы и пятна – радиоэхо искусственных осадков.

**Третий эксперимент.** Засев выполнен в том же массиве облаков, что и во втором эксперименте, но в период с 15.19 по

15.38 к северо-западу от Кишинева на удалении 20–25 км. С самолета Як-40 реагентом AgI было засеяно три линии длиной по 25 км. Первая линия засеяна с дозировкой 4 г/км, две последующие с дозировкой 2 г/км. Расстояние между линиями 5 км. Зондирование облаков в этом районе показало, что St располагались на высоте 370 м (нижняя граница) и 1190 м (верхняя граница). На их уровнях температура воздуха соответственно равнялась минус 7,2 и минус 8,6°C. В слое облаков отмечалось сильное обледенение. Визуальные наблюдения показали, что засев привел к образованию трех зон кристаллизации шириной около 2 км. Пролет самолёта в этих зонах зафиксировал выпадение интенсивных осадков.

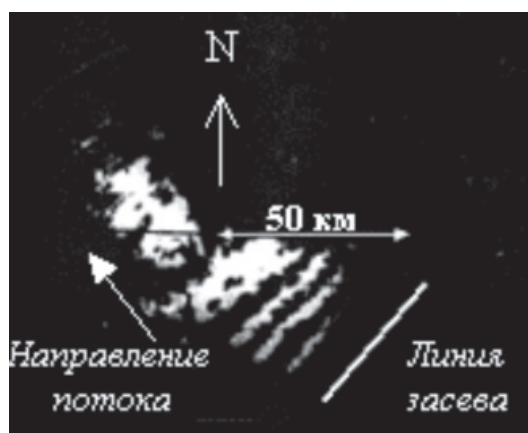


Рис. 4. Радиолокационное горизонтальное сечение радиоэхо осадков в зоне засева облака 25.04.84 года

**Опыт 22 декабря 1984 г.** Воздействие проведено на поле St, сформировавшемся на юго-западной периферии антициклона. Облака капельные располагались в слое 550–920 м с температурой соответственно минус 8,6°C и минус 9,3°C. Отмечалось сильное обледенение. В период с 13.23 по 13.50 с самолета Як-40 было засеяно йодистым серебром (пиропатроны ПВ-26) пять линий длиной по 20 км, расстояние между линиями 5 км. Дозировки на 1-й и 4-й линиях были по 6 г/км (расстояние между точками отстрела пиропатронов – 250 м), на 2-й – 3 г/км, 3-й – 1,5 г/км, и на пятой – 0,75 г/км (между точками отстрела пиропатронов – 2000 м). Согласно визуальным наблюдениям с самолёта лучше были видны линии первая и четвёртая. Они были сплошными и достигали ширины около 2,6 км. Линия вторая также была сплошной, но местами сужалась до 1 км. Линия третья была не сплошной. Линия пятая состояла лишь из отдельных очагов кристаллизации, которые между собой не смыкались. Радиолокатор «видел» 4 линии. Сильнее про-

явились линии 1-я и 4-я. От них радиоэхо прослежено до земли. Линии 2-я и 3-я проявились слабо и имели очаговый характер. Линия 5-я радиолокатором не зафиксирована. Результат эксперимента показал, что при отстреле пиропатронов через 250 м (что соответствовало дозировке 6 г/км) образовывались хорошо выраженные зоны радиоэхо искусственных осадков.

**Опыт 01.03.1987 г.** Поле высококучевых облаков (Ac), образовавшихся в зоне холодного фронта. Облака капельные, располагались на высотах 2100–2550 м. Температура на этих уровнях была одинаковой и составляла минус 10,5°C. В них отмечалось обледенение. Ниже слоя Ac был слой Sc (Нижняя граница 680, верхняя – 1250 м, толщина 570 м, температура на нижней границе минус 6,5°C, на верхней – минус 9,6°C). С 07.54 до 08.23 облака были засеяны с самолета Ан-30 твердым CO<sub>2</sub>. Засеивание проводилось вдоль 5-й линии длиной по 20 км с дозировкой – 600 г/км. Расстояние между линиями 4,5 км. Радиолокационными наблюдениями были обнаружены 4 полосы искусственных осадков, доходящих до земли. Отсутствие одной из линий (первой) объясняется тем, что она проходила в зоне слабых облаков с просветами.

**Опыт 22 декабря 1987 г.** Выполнено два эксперимента. Засев проводился в разное время на трехслойную облачную систему, образовавшуюся на вторичном холодном фронте. Верхний слой Ac был на высотах 2550–3380 м с температурой, соответственно, минус 9,5°C и минус 12,8°C. Толщина этого слоя достигала 830 м. Средние водность и водозапас этого слоя составили соответственно 0,27 и 224 г/м<sup>2</sup>. Ниже, на высотах 1870–2260 м, располагался слой Sc с температурами, соответственно, минус 5,7°C и минус 7,0°C. Толщина слоя была около 390 м. Средние водность и водозапас были соответственно 0,21 и 82 г/м<sup>2</sup>. Ниже, на высотах 430–1280 м располагался еще один слой Sc с температурами минус 0,4°C и минус 3,0°C (толщина слоя 850 м). Средняя водность этого слоя составляла 0,25 г/м<sup>3</sup>, а водозапас достигал 212 г/м<sup>2</sup>. Таким образом, в целом эта система облаков представляла собой исключительно благоприятную ситуацию для вызывания искусственных осадков. Такой вывод следует из того, что было несколько слоёв с межоблачными прослойками 290 м между верхними и 570 м между нижними слоями. Суммарная толщина трёх облачных слоев составляла 2070 м, а водозапас 518 г/м<sup>2</sup>. Засев мощного верхнего слоя мог привести к увеличению размера частиц искусственных осадков в нижних слоях. Потери на испаре-

ние в подоблачном слое были невелики, т.к. высота нижней границы нижнего слоя облаков составляла всего 430 м. При первом эксперименте засеивался верхний слой Ac при сбросе твердого CO<sub>2</sub> с самолета ИЛ-14 с уровня верхней границы облаков (3380 м). В течение 1 ч 11 мин (с 09.59 до 11.10) было засеяно 10 линий с дозировкой 350 г/км. Длина линий 20 км, расстояние между ними 3,2 км. Воздействие привело к появлению интенсивных искусственных осадков, которые выпадали с 10.50 до 13.30. Продолжительность выпадения искусственных осадков составила 2 ч 40 мин, что более чем вдвое превышало продолжительность воздействия (1 ч 11 мин). Высокая результативность воздействия была подтверждена радиолокационными наблюдениями. Радиолокатор МРЛ-5 работал в аэропорту Кишинев и выполнял конические и вертикальные разрезы облаков и выпадающих из них осадков. Другой радиолокатор в системе измерительного осадкомерного комплекса (МРВК) в г. Котовске проводил измерения количества выпадающих осадков.

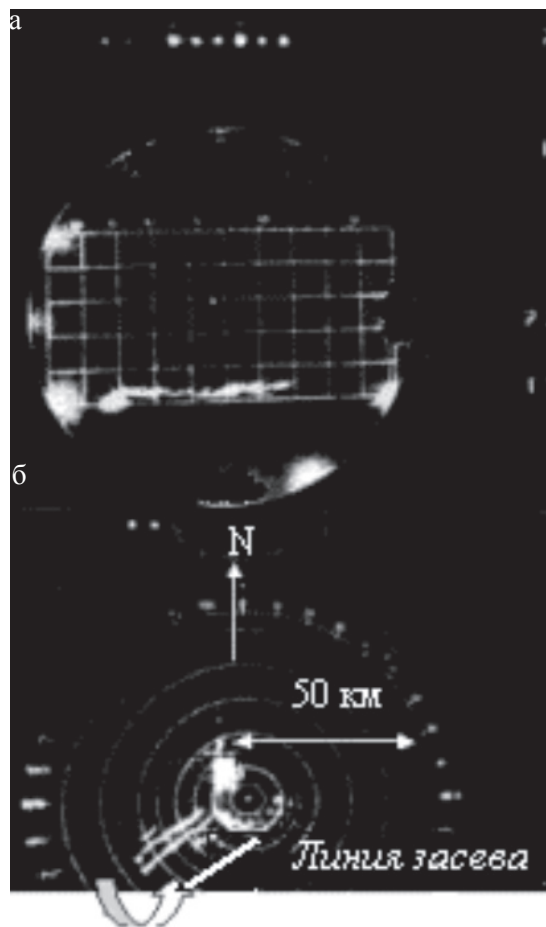


Рис. 5. Вертикальное и коническое сечение радиоэхо осадков в зоне засева облака 22.12.87 года. Время 10.50

На вертикальном разрезе за 10.50 (рис. 5,а) видны зоны искусственных осадков, которые в этот момент уже достигали земли. Этот момент следует считать началом выпадения искусственных осадков.

На рис. 5,б показан конический разрез, выполненный в 10.57. На нём видно 4 полосы радиоэхо искусственных осадков.

На рис. 6,а представлены данные МРВК за 10.10–10.15, где осадки еще не

фиксируются и видно только несколько небольших очагов радиоэхо. Линия воздействия на этом и последующих рисунках обозначена отрезком АВ. На рис. 6,б, на котором показана осредненная ситуация за 10.55–11.00, видно, что осадки уже идут. На рисунках проведены изолинии равных интенсивностей искусственных осадков. Их максимальная интенсивность достигает 0,3 мм/ч.

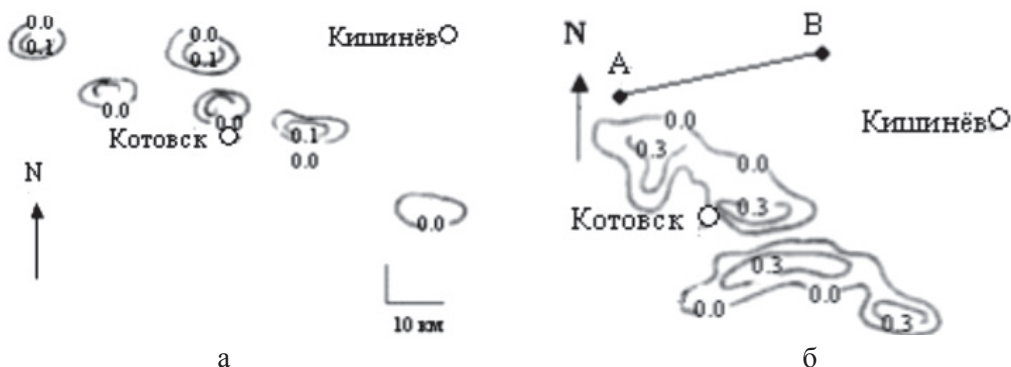


Рис. 6. Изолинии интенсивности осадков в мм/час по данным радиолокационного измерительного комплекса 22.12.87 года: а – период времени с 10.10 до 10.15. Осадки еще не видны; б – период времени с 10.55 до 11.00. Появились осадки, видны изолинии 0,3 мм/ч

В дальнейшем происходило развитие (расширение) зон кристаллизации и усиление процесса образования искусственных осадков. На рис. 7,а,б приведены кониче-

ские разрезы радиоэхо засеянных облаков в 11.22 и в 11.45 соответственно, где видны проявления и развитие во времени полос кристаллизации.

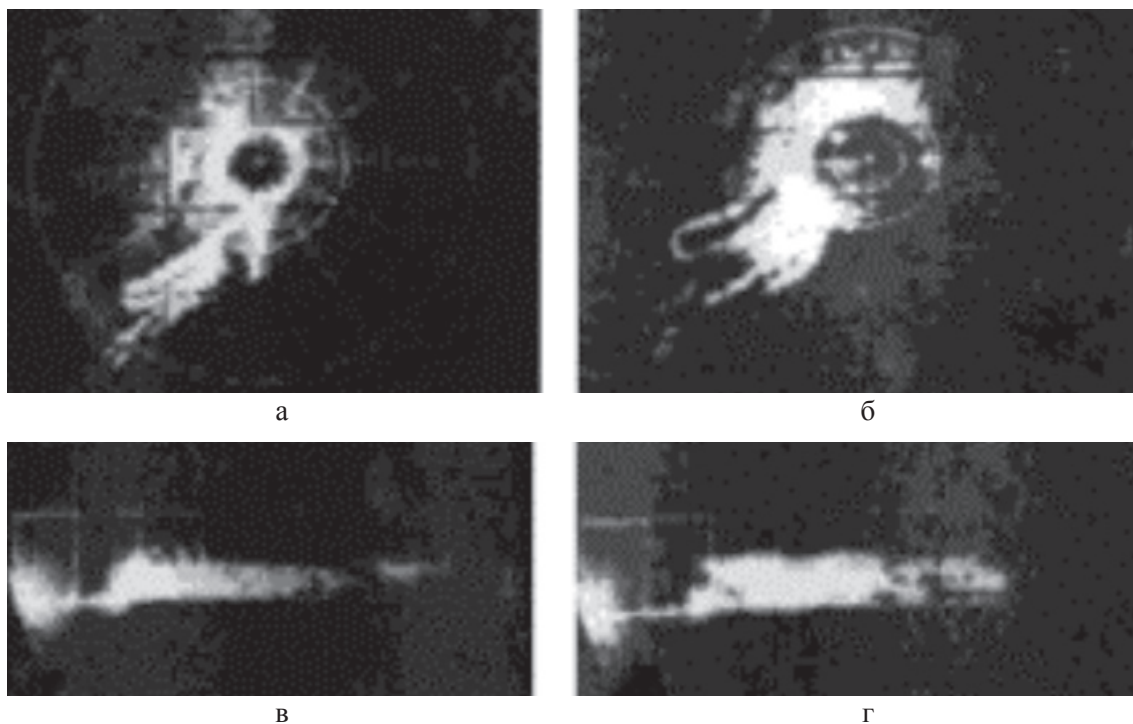


Рис. 7. Конические и вертикальные радиолокационные разрезы радиоэхо засеянных облаков 22.12.87 года. Время: а – 11.22; в – 11.25; б – 11.45; г – 11.49. Видно развитие во времени полос кристаллизации, которые к 11.45 объединились, образовав обширное поле осадков.

Ширина первых линий составляла 2,5–3,0 км, а в 11.45 они объединились, образовав обширное поле осадков. На рис. 6,с,д показаны вертикальные разрезы областей радиоэхо от искусственных осадков выполненные соответственно в 11.25 и в 11.49. Здесь прослеживается эволюция во времени вертикальной структуры мощной зоны кристаллизации и искусственных осадков. Верхняя граница радиоэхо нахо-

дится на высоте 3,5 км, нижняя – у земли. Справа (на рисунках) видны зоны кристаллизации от последних трех линий, которые только начинают объединяться, а искусственные осадки из них ещё не достигают земли. В 12.05–12.10 (рис. 8,а) зона осадков резко расширилась, достигнув площади около 1000 км<sup>2</sup>. Интенсивность осадков в центральных частях зоны превысила 1 мм/ч.

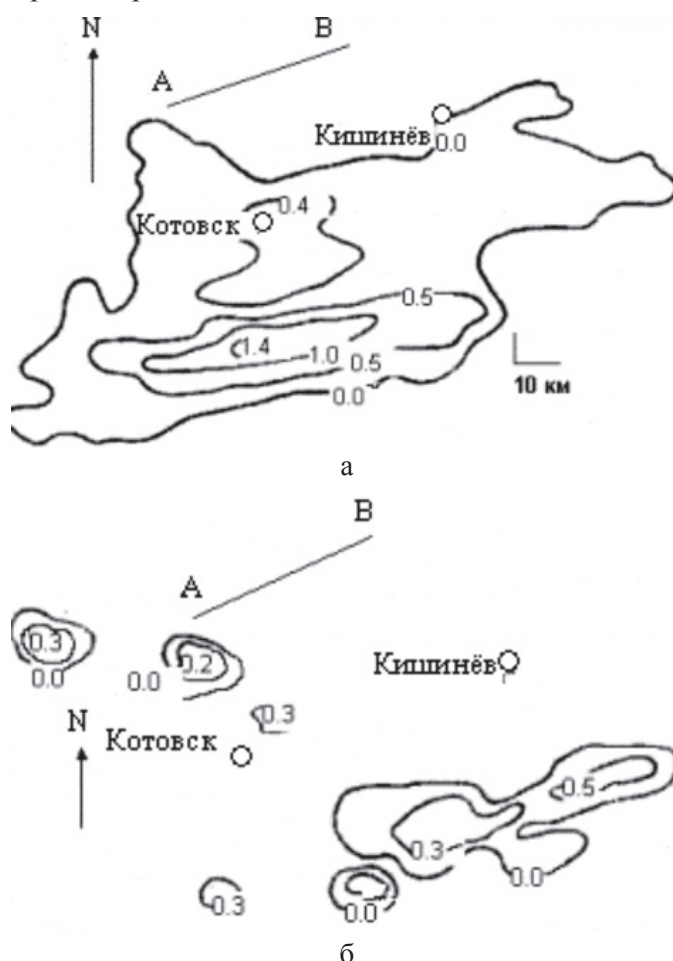


Рис. 8. Изолинии интенсивности осадков в мм/час по данным радиолокационного измерительного комплекса 22.12.87 года. АВ – линия засева:

а – период времени с 10.10 до 10.15; б – период времени с 11.22 до 11.45

В центральной части зоны их интенсивность достигала 1,4 мм/ч.

Вследствие влияния сдвига ветра, зона искусственных осадков резко расширилась, достигнув длины (вдоль линии засева) 50 км и ширины до 45–60 км. Площадь зоны осадков превысила 2000 км<sup>2</sup>. Зона, ограниченная изолинией 1 мм/ч, имела размер 24×15 км (3600 км<sup>2</sup>), а центральное ядро (1,5 мм/ч и более) имело площадь около 70 км<sup>2</sup> (12×6 км).

После 13 ч воздействия были прекращены, интенсивность искусственных осадков существенно уменьшилась. На рис. 7,б в

13.20–13.25 в районе Котовска отмечаются лишь линии отражения от местников, а площадь радиоэхо от осадков сократилась до 600 км<sup>2</sup>. Интенсивность осадков в ее центре в этот период не превышала 0,3 мм/ч. Последний очажок осадков площадью около 100 км<sup>2</sup> был отмечен в 13.00–13.35 в 150 км южнее Кишинёва. Интенсивность осадков в нем была в пределах 0,00–0,2 мм/ч.

Представленные на приведенных рисунках данные показывают, что засев мощной многослойной облачной системы привел к образованию интенсивных искусственных осадков, площадь выпадения

которых в различные моменты времени достигала 600–3000 км<sup>2</sup>. Засеянная площадь облаков составляла около 800 км<sup>2</sup> (20×40 км). Большая суммарная толщина облачной системы (2070 м), её большой водозапас (518 г/м<sup>2</sup>), способствующая развитию облаков циклоничность, определили значительный эффект воздействий. В последнем примере параметры эффекта засева из облаков, не дававших без воздействия на них осадки, следующие: максимальная интенсивность искусственных осадков составила 2,0–2,5 мм/ч при общей продолжительности их выпадения 2 ч 40 мин на средней, за этот период, площади 1000 км<sup>2</sup>.

Второй эксперимент был проведен в тыловой части той же облачной системы, которая была подвергнута воздействию в предыдущем опыте. Однако за прошедшие 3 часа основной массив облаков ушел из зоны полигона. Отмечались два тонких слоя Ac. Первый из них был на высоте 3300–3480 м, где температуры равнялись соответственно минус 13,3 °С и минус 14,1 °С.

Второй слой располагался на высотах 2620–2920 м, где температуры были минус 9,1 °С и минус 10,2 °С. Водность и водозапас этого слоя составили 0,18 и 54 г/м<sup>2</sup>. Эти слои Ac были капельными, в нижнем слое Ac отмечались умеренное, а в верхнем – слабое обледенение. Ниже сохранялся слой Sc. Он стал тоньше и располагался на высотах 510–910 м, где температуры были соответственно плюс 1,4 °С и минус 1,6 °С. Водность и водозапас этого слоя составили 0,36 и 144 г/м<sup>2</sup>. Облака были засеяны CO<sub>2</sub> (3 линии по 16 км) и N<sub>2</sub> (3 линии по 16 км). Дозировки CO<sub>2</sub> составили 350 г/км, а N<sub>2</sub> – 600 г/км. Радиолокатор МРЛ-5 наблюдал две полосы кристаллизации от CO<sub>2</sub>, однако осадки до земли не доходили. Последующие полосы (от CO<sub>2</sub> и три полосы от N<sub>2</sub>) не были обнаружены, так как эти линии засеивались на кромке облачного слоя, где облака были очень тонкими. В данном опыте засеивались облака непригодные для воздействия.