УДК 53.02

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРАССЕРОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РЕАГЕНТОВ ПРИ ИСКУССТВЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА КОНВЕКТИВНЫЕ ОБЛАКА

[1]Диневич Л.А., [2]Шалавеюс С.С.

[1]Тель-Авивский университет, Тель-Авив, e-mail: leonid@post.tau.ac.il;

[2]Вильнюский педагогический университет, Вильнюс, e-mail: stasala@gmail.com

Обсуждаются результаты исследований распространения реагента при искусственном воздействии на конвективные облака, проводившихся на базе Молдавской противоградовой службы в течении более двадцати летних сезонов. Для этого использовались специальные трассеры, вводившиеся в конвективные облачные ячейки с помощью ракет и самолетов. Эволюция ячеек прослеживалась с помощью радиолокационных станции специального назначения, а на густой плювиометрической сети велись непрерывные измерения массы выпавших осадков и содержания в них элементов, служащих трассерами. Проведены оценки влияния места введения трассеров на скорость и площадь их выпадения. Обнаружено влияние гигроскопичности трассеров на скорость их вымывания осадками, получены косвенные подтверждения эффективности льдообразующих реагентов и применявшихся методик активных воздействий.

Ключевые слова: облако, облачная ячейка, трассеры, внутри облачные потоки, осадкообразующие процессы

EXPERIENCE IN THE USE OF TRACERS TO STUDY THE SPREAD OF CHEMICALS IN THE ARTIFICIAL EFFECT ON CONVECTIVE CLOUDS

[1]Dinevich L.A., [2]Shalaveyus S.S.

[1]Tel-Aviv University, Tel-Aviv, Israel, e-mail: leonid@post.tau.ac.il;

[2]Vilnius Pedagogical University, Vilnius, Lithuania, e-mail: stasala@gmail.com

The results of research in artificial propagation reagent effect on convective clouds, carried out on the basis of the Moldavian hail service for more than twenty summers. For this purpose special tracers are introduced into the convective cloud cells with missiles and aircraft. Evolution of cells traced by radar stations of special purpose, and a dense network plyuviometricheskoy were continuous measurements of precipitation and mass content of elements that serve tracers. The influence of the site of injection of tracer at the rate and extent of their loss. The effect of water absorption on the tracer washout rate of precipitation, provided indirect confirmation of the effectiveness of ice-forming reagents and the technique of active effects.

Keywords: cloud, cloud cell tracers within the cloud flows, sediment-processes

Технология регулирования осадков из конвективных облаков, в том числе их увеличения и предотвращения роста опасного для сельскохозяйственных культур града, основывается на засеве конвективных облачных ячеек искусственными ледяными ядрами (Боровиков и др., 1961; Гайворонский и Серёгин, 1965; Сулаквелидзе, 1967; Атлас, 1967; Качурин, 1978; Бибилашвили и др., 1981; Деннис, 1983; Бурцев, 1990). При разработке технологии воздействия одной из наиболее трудных является задача определения места в облаке, куда следует вводить реагент. Трудности её решения связаны с тем, что потоки в облаках и в пространстве вокруг них очень сложны, изменчивы во времени и недостаточно изучены (Гайворонский и Серёгин, 1965; Шметер, 1972; Иванов и др., 1981; Мазин и Шметер, 1983; Шметер, 1989; Диневич и др., 1986, 1995). В одной и той же облачной ячейке, в один и тот же момент времени часть потоков способствует росту облачных капель или града, часть выбрасывает облачные элементы через вершину во внеоблачную среду, а часть способствует интенсификации осадков, а вместе с ним вымыванию естественных и искусственных примесей через основание. Учитывая, что само облако состоит из отдельных облачных ячеек, взаимодействие которых также зависит от многих факторов (стадий развития, их микрофизических характеристик, стратификации атмосферы, влияния подстилающей поверхности и орографии и т.д.), становится ясным, сколь сложно оценивать характер внутриоблачных потоков и определять место и момент засева (Бибилашвили и др., 1981; Шметер, 1977, 1987; Диневич, 1981).

В ряде случаев анализ потоков и засев облачных ячеек можно выполнять последовательно, без перерывов во времени, если он производится с помощью самолётов. В случаях же применения ракетной технологии засева или самолётной, но для очень мощных конвективных образований, прямые приборные измерения потоков в реальном масштабе времени выполнить невозможно. Такой анализ можно проводить лишь на основе радиолокационных наблюдений за облаками. Время необходимое для такого анализа и реализации технологии засева

чрезвычайно при этом ограничено. В большинстве случаев время роста опасного града от момента радиолокационного обнаружения градоопасной ячейки до выпадения его на землю, составляет 10–15 мин, а часто и меньше (Диневич, 1981). После определения градоопасности облака и до реализации его засева с помощью ракет требуется не менее 2 минут. Время реализации кристаллизующих свойств засеваемого реагента составляет не менее 10 минут (Плауде и Соловьёв, 1979). Приведенные цифры говорят о том, что баланс времени при производственных работах не оставляет и минуты для прямых измерений потоков в облаках. Для получения представлений о структуре потоков в конвективных облачных ячейках нами были проведены специальные исследования, в основе которых лежало использование соответствующих трассеров.

Применявшиеся трассеры и способы их выявления в пробах осадков и в каплях

При выборе трассеров учитывалось, что:

– Фоновое содержание входящих в трассеры элементов или их соединения должны отсутствовать (или присутствовать в ничтожных количествах) в естественных образцах осадков так, чтобы небольшие их добавки могли быть идентифицированы и количественно измерены доступными методами с помощью имеющейся лабораторной техники.

– Трассеры должны быть не токсичными или мало токсичными в используемых количествах, а радиоактивные изотопы обладать малым периодом полураспада. Учитывая большое количество проб, собираемых во время каждого эксперимента, важную роль играет оперативность идентификации трассеров в пробах осадков и возможность их консервации для проведения анализов в стационарных условиях.

С учётом этих условий в качестве трассеров использовались тяжелая вода (D_2O), металлический индий ^{115}In, йодистый свинец PbI_2, йодистое серебро AgI, радиоактивные изотопы полония и фосфора (^{210}Po источник α-излучения и ^{32}P-источник β-излучения). Все трассеры вводились в облачную ячейку методом диспергирования при взрыве. Для обнаружения трассеров в дождевой воде были разработаны специальные методики и аппаратура (Шалавеюс и др., 1968; Шалавеюс и Лескаускас, 1983; Лукшене и др., 1988).

В нескольких экспериментах в качестве трассера использовались радиоотражающие углеродистые нити (углен).

В табл. 1 приведены некоторые характеристики применявшихся в экспериментах трассеров.

Таблица 1

Некоторые характеристики трассеров, применявшихся в экспериментах

Вид трассера	Способ введения	Состояние	Способ идентификации и расчёта	Фоновое содержание
1	2	3	4	5
α-излучатели ^{210}Po *	Диспергирование взрывом	Двухмолярный азотнокислый раствор ^{210}Po	^{210}Po выделялся на серебряные или медные пластинки. Спектрометром измерялось его количество. (Шалавеюс и др., 1983)	В дождевых осадках $(0,4–0,9)\cdot10^{-2}$ (Бк/л)
Тяжелая вода (D_2O)**	Диспергирование взрывом	Жидкость с содержанием дейтерия до 99,7%	По содержанию дейтерия в пробах дождевой воды (Шалавеюс и др., 1977)	$\delta D = 0,1\%$**
Металлический индий (^{115}In)***	Диспергирование взрывом	Раствор ^{115}In в азотной кислоте и затем в дистиллированной воде.	Спектрофотометр атомной абсорбции. Чувствительность 10^{-9} г/л. (Шалавеюс и др., 1988)	От $(2 \pm 1)\cdot10^{-9}$ до $(6 \pm 1)\cdot10^{-9}$ г/л
Йодистый свинец (PbI_2)****	Возгонка в штатном режиме работы ракеты	Пиротехнический состав на основе PbI_2	Химический анализ дождевых проб (Никорич и др., 1989; Шалавеюс и Кекике, 1977)	Для Pb $1\cdot10^{-6}$ г/л
йодистое серебро (AgI)****	Возгонка в штатном режиме работы ракеты	Пиротехнический состав на основе AgI	Химический анализ дождевых проб (Шалавеюс и др., 1988); Громова и др., 1980)	Для Ag (0,01–0,07) мкг/л

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
β-излучатель ^{32}P*****	Диспергирование взрывом	^{32}P в виде порошка фосфата хрома	β-радиометр (Шалавеюс и др., 1988)	0 (Вк/м^3) ниже чувствительности метода
Углен –******	Сброс в точке с самолёта или ракеты	Радиоотражающие углеродистые нити	Радиолокационные наблюдения	

Примечания:

* – В природных образцах обнаруживаются сверхмалые α-активности ^{210}Po. В почве α-активность ^{210}Po равна (7–22)·10^{-2} Бк/г, в осадках – (0,4–9)·10^{-2} Бк/л, в воде открытых водоемов- на один два порядка меньше, в воздухе – (0,5–12)·10^{-3} Бк/м^3. ^{210}Po является короткоживущим α-излучателем, период полураспада – 140 дней. Он хорошо адсорбируется на металлах и его свойство широко используется при радиохимическом осаждении на серебренные, никелевые или медные пластинки. ^{210}Po является почти чистым α-излучателем (99,8 %) с энергией α-частиц равной 5,298 МэВ. Пробег α-частиц в воздухе составляет 3,8 см. В наших натурных экспериментах в качестве трассера он применялся ввиде двухмолярного азотнокислого раствора. Трассерный ^{210}Po разбрызгивался в облачной среде при взрыве головок противоградовых ракет. Не смотря на чрезвычайно малые количества использовавшегося в экспериментах ^{210}Po нами выполнялись все предписывавшиеся меры защиты. Перевозился и хранился ^{210}Po в специальных свинцовых контейнерах под контролем органов тех надзора. Его дозировки в растворе, а тем более после распыления взрывом, были ниже предельно допустимых норм в сотни раз. Для измерения α-активности ^{210}Po в дождевых каплях применяли метод α-авторадиографии (Шалавеюс и Кранкалис, 1984). Очень важной особенностью этого трассера является то, что в естественных образцах капель дождя наличие в них ^{210}Po проявляется единичными α-треками. При введении в облака трассера ^{210}Po облачные капли захватывают несколько его атомов и радиоактивность их проявляется множеством (10–20, а иногда и 30) α-треками;

** – При масс-спектрометрировании каждая проба сравнивалась с образцом. Концентрация дейтерия определялась в процентах отклонения от образца (Шалавеюс и др., 1977). Каждый образец сравнивался со стандартом. Концентрация дейтерия определялась в процентах отклонения от образца.

$$\delta D = \frac{\left(\frac{D}{H}\right)_{\text{проба}} - \left(\frac{D}{H}\right)_{\text{образец}}}{\left(\frac{D}{H}\right)_{\text{образец}}} \cdot 100\%. \qquad (1)$$

Здесь D/H-отношение числа молекул дейтерия к числу молекул водорода. Образцами служили пробы дождевой воды, собранные в нескольких точках полигона за месяц до экспериментов. Таким образом, положительные значения δD показывают на сколько процентов отношение числа молекул дейтерия к числу молекул водорода в пробе больше чем в образце (в фоне). В самих фоновых образцах этот разброс значений δD не превышал 0,1 %;

*** – (^{115}In) растворяли в азотной кислоте, и затем дополнительно разбавляли дистиллированной водой. Для оценки процентного соотношения испаряемого и диспергируемого вещества и спектра образуемых при взрыве капель, были проведены специальные эксперименты (Шалавеюс и Вебрене, 1980). Для повышения точности получаемых результатов содержание ^{115}In в пробах дождевой воды измерялось по несколько раз (Шалавеюс и др, 1988);

**** – Фоновое содержание Ag, Pb в осадках составляло микро и нанограммовые количества (Громова и Красиков, 1965). Серебро соосаждали с $CaCO_3$. В качестве дополнительного коллектора использовали ионы Fe^{3+} в концентрации 1 мг/л. Осадок обрабатывали серной кислотой и определяли Ag^+ (Шалавеюс и др., 1988).

Pb определяли колориметрическим методом, используя реакцию соединения свинца с плюмбоном (сульфарсазеном). Определение Pb слагалось из трех последовательных операций: повышения концентрации свинца методом соосаждения его с карбонатом кальция, отделения его от сопутствующих элементов (цинка, меди и других) и колориметрирования (Шалавеюс и Кеките, 1977);

***** – радиоактивный изотоп ^{32}P в атмосфере и естественных осадках не обнаружен. Период его полураспада ($t_{1/2}$ = 14,3 дня). Он характеризуется отсутствием γ – излучения и большой энергией β-частиц ($E_{мах}$ = 1,712 МэВ). Для экспериментов ^{32}P применялся в виде порошка фосфата хрома. В полевых условиях повышение концентрации ^{32}P в пробах дождя проводилось методом выпаривания воды или методом соосаждения с гидроокисью алюминия или железа. Полученный осадок высушивался и в нём измерялась β-активность. Измерение β-активности повторялось несколько раз, после чего по кривой распада определялась β-активность ^{32}P в пробе (Шопаускас и др. 1968);

****** – радиоотражающие нити длиной равной четверти длины волны. По результатам экспериментов, выполненных в чистой атмосфере их радиолокационная отражаемость не превышала 35 dBZ. Для обнаружения углена на фоне отражений от слабых облаков использовался радиолокатор на длине волны 3,2 см с поляризационной приставкой (Шупяцкий, 1959; Диневич, 1981).

В ряде экспериментов в дождевых пробах определялось и сравнивалось с фоновым содержание химических элементов Ag, Pb, I при их штатном использовании в составе пиротехнических реагентов для засева облаков.

Технические средства

В проведенных исследованиях применялись следующие технические средства:

– радиолокационные станции МРЛ-5. Они в оперативном режиме и на основе материалов фоторегистрации позволяли оценивать ячеистую структуру облаков, осадков и эволюцию параметров радиоэхо во времени и в пространстве. Технические характеристики МРЛ-5 изложены в работе Абшаева и др. (1980).

– осадкомерные приборы,

– специальное лабораторное оборудование для идентификации и количественных измерений трассеров.

– противоградовые ракетные комплексы «ПГИ-м», «Облако», «Алазань», «Кристал» (Бурцев, 1990), с помощью которых трассеры вводились в заданную часть облачной ячейки (табл. 2).

Таблица 2

Некоторые характеристики применяемых в экспериментах ракет

Тип ракеты	Дальность полёта по земле, км	Высота полёта, км	Способ введения трассера	Штатный способ введения реагента	Вес груза, кг
ПГИ*	6	4	Взрыв в точке	Взрыв	0,250
Облако**	10	8	Взрыв в точке	Диспергирование по трассе	4,5
Алазань 2 м***	10	8	Взрыв в точке	Диспергирование по трассе	1,0
Кристалл****	14	12	Разброс диполей	Диспергирование по трассе	0,250

Примечания:

* – головная часть ракеты заполнялась раствором ^{210}Po. Учитывая малый радиус действия и малую высоту полёта, эти ракеты использовались для введения трассера в подоблачную и около облачную атмосферу;

** – в штатном варианте ракета разбрасывет (диспергирует) реагент по трассе и после этого опускается на парашюте. При проведении экспериментов, в штатных головных отсеках вместо реагентов размещались специально изготовленные из тонкого стекла контейнеры с жидким трассером и специальные головные дистанционные трубки с детонирующим шнуром. Трубка позволяла регулировать время подрыва «головы» ракеты в заданной точке траектории её полёта. Вместо штатного диспергирования по трассе такая «голова» вводила трассер в заданную точку методом взрыва. Траектория полёта ракеты рассчитывалась таким образом, чтобы взрыв и распыление трассера произошли в облачной ячейки в расчётной точке;

*** – использовался собственный штатный механизм взрыва всей ракеты в заданной (расчётной) точке траектории полёта;

**** – ракета несёт в своей штатной головной части пиротехнический реагент в виде отдельных 32 модулей, которые последовательно, по заданной схеме, отстреливаются на 8 километровой трассе. В экспериментах два (первые при отстреле) модуля снаряжались радиоотражающим угленом. Для регистрации углена в облаках применялась радиолокационная станция с поляриметром, работавшая на длине волны 3,2 см (Шупяцкий, 1959). Поляризационные характеристики радиоэхо позволяли наблюдать движение углена внутри конвективных облачных ячеек, отражаемость которых не превышала 30 dBZ. Это ограничение позволяет выполнять исследования потоков лишь в зарождающихся и сравнительно слабых облачных ячейках. Облачные капли в таких ячейках близки к сферическим. Диполи углена ориентируются при свободном падении в горизонтальной плоскости. Этот фактор приводит к отличию поляризационных характеристик их радиоэхо. Так для сферических облачных капель величина деполяризации радиоэхо облачных ячеек ΔP в наших экспериментах не превышала –15 dB. Для углена она была значительно больше, на уровне –10...–7 dB.

Для сбора проб воды и капель дождя применялись плювиографы. Густая плювиографическая сеть позволяла во всех её точках с точностью до минуты регистрировать время начала дождя, измерять его суммарное количество и изменение интенсивности во времени и в пространстве. Помимо плювиографов использовались сборники дождя специальной конструкции из полиэтилена. Они позволяли собирать, как поминутные так и суммарные их количества (Шалавеюс и др, 1983). Для сбора отдельных капель дождя использовались специальные планшеты из хромотографической бумаги, одна сторона которой покрыта смесью эритрозина с тальком.

Для идентификации и количественного измерения радиоактивных трассеров применялись микроскопы с бинокулярными насадками и светофильтрами, позволявшими выполнять расчёты числа α-треков и их длин. Телемикроустановка, состоящая из микроскопа, телевизионной приставки с оптоэлектронным преобразователем и телевизором, использовалась для просмотра фотоэмульсии. Треки α – частиц просматривались при увеличении в 300-400 раз.

Для идентификации и количественных измерений остальных трассеров использовались специальные методики и химические лаборатории.

Схема экспериментов

В зоне противоградового полигона площадью 1000 км^2 с помощью радиолокатора выбирались такие ячейки что бы можно было до прихода (образования) в эту зону новой облачной ячейки, успеть ввести трассер, провести все радиолокационные и наземные измерения, собрать дождевую воду из осадкомеров и подготовить их к новым экспериментам. Полигон, помимо штатного противоградового оборудования, был оснащён густой осадкомерной сетью (один плювиограф на 10–15 км^2). По прогнозируемому (с помощью радиолокатора) пути перемещения выбранной для эксперимента ячейки и осадков из неё создавался дополнительный измерительный полигон. При этом плотность измерительной сети увеличивалась в два – три раза. С этой целью вертолётом и автомобилем в каждую запланированную на этом временном полигоне точку заблаговременно доставлялись подготовленные наблюдатели (сотрудники института и студенты в период летней практики). Всего таких (живых) дополнительных точек наблюдения в каждом эксперименте создавалось 25. В этих точках устанавливались специальные сборники дождя, которые позволяли регистрировать время появления первых капель и собирать дождевую воду порциями через каждые две минуты. Кроме того наблюдатели каждую минуту на специальных планшетах собирали отдельные капли дождя. В зависимости от интенсивности осадков экспонирование этих планшетов длилось 1–30 с. При высушивании планшетов дождевые капли оставляли ярко окрашенные пятна, по которым определялся в дальнейшем истинный радиус капель. Диаметры отпечаток дождевых капель измерялись с абсолютной погрешностью равной 0,25 мм. Радиусы отпечатков, значения которых были больше 2,5 мм, и определенные по таррировкам радиусы капель измерялись с относительной погрешностью меньше 10 %.

В этих каплях определялось количество α – активного ^{210}Po и таким образом устанавливалось время выпадения первых радиоактивных капель. Радиоактивными считались капли, в которых α-активный ^{210}P$_o$ содержался в количестве, превышающем фоновое (более одного α трека в эмульсии). Как правило, первые радиоактивные капли содержали более 10 α-треков. (Эти треки получены при экспозиции отпечатков капель на хромотографической бумаге с ядерной эмульсией в течение 20–70 суток. При размере капли 0,5 мм массовая концентрация их радиоактивности составляет очень малое значение, лишь 0,086 Бк/г). Зная время и место введения радиоактивного трассера в облачную ячейку (а они определялись с точностью до минуты по времени и нескольких метров по площади), время и место появления первых радиоактивных капель в точке измерения на земле, оценивалась скорость распространения трассера до выпадения его на землю $V = L/t$, где L – путь, который пролетает радиоактивная капля от точки взрыва до точки её регистрации, t – время которое капля потратила на этот путь (смотри схему эксперимента на рис. 1).

Из рис. 1 следует, что в одну из точек полигона трассер попал через время t_1 после его ввода в заданную точку облака. Точка эта находится на расстоянии L_1 – в направлении смещения облачной ячейки ведущим потоком. Следовательно скорость переноса трассера в эту точку равна L_1/t_1. В то же время в другую точку полигона трассер попал через время t_2 после его ввода в ту же заданную точку облака. Эта вторая точка полигона находится в тылу ячейки, относительно проекции точки ввода реагента на землю и направления смещения ячейки. Следовательно скорость переноса трассера в этой точке (в направлении противоположном относительно направления смещения ячейки) равна L_2/t_2. Таков принцип измерения скоростей в данном эксперименте.

После каждого дождя вода доставлялась в химическую лабораторию для идентификации и определения концентрации трассеров, выпавших с осадками в каждой точке наблюдения. Во избежание загрязнения заборников остаточными трассерами, после каждого эксперимента они заменялись новыми. Эксперимент исключался из

анализа в тех случаях, когда дождевую воду с измерительного полигона не успевали собрать до следующего ливня, возникшего уже из новой облачной ячейки. Таких случаев было много, что существенно сократило количество экспериментов в каждом летнем сезоне. На основе анализов собранных осадков определялись концентрации трассеров и строились карты распределения их плотностей в пространстве и во времени. По ним определялись скорость, преимущественное направление и ареал распространения трассера. Эти карты совмещались с картами проекции радиоэхо на землю по данным радиолокатора. При этом радиолокационные наблюдения и фоторегистрация эволюции ячеек в течение всего периода эксперимента позволяли оценивать перенос их радиоэхо во времени. Точка ввода трассера на каждом горизонтальном сечении радиоэхо облачной ячейки переносилась с учётом направления, скорости ветра и времени. Это позволяло оценивать не только перемещение облачной ячейки и осадков из неё за счёт ведущего ветрового потока, но и развитие её за счёт сложных внутриоблачных потоков и микрофизических процессов.

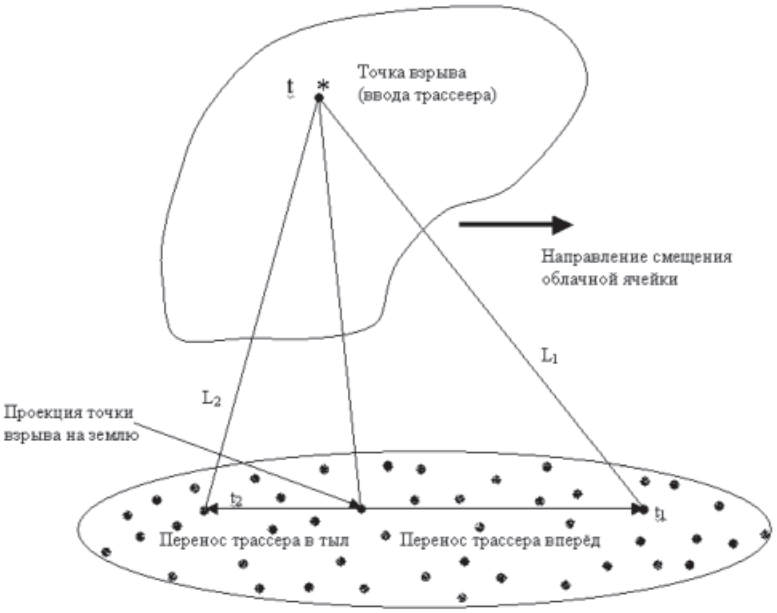

Рис. 1. Схема измерения скорости переноса трассера дождём. Вверху облачная ячейка и место взрыва ракеты (ввода трассера). Внизу измерительный полигон. Точки на полигоне – осадкомерные пункты. Стрелками на полигоне показано направление переноса трассера

Место в облачной ячейке для введения трассера и стадия её развития выбирались с учётом реальных возможностей завершения эксперимента, т. е. учитывалось взаиморасположение облачной ячейки и ракетного пункта, имеющего в своём запасе специально подготовленные ракеты с трассером. Эксперимент считался состоявшимся, если удавалось, как и предполагалось, сопровождать радиолокационной станцией передвижение подверженной воздействию трассером ячейки, а осадки собрать до начала дождя из другого облака со всех осадко измерительных приборов на полигоне.

В ряде экспериментов в ракету помещались несколько трассеров с различными свойствами, что давало возможность сравнить поведение различных трассеров, оказавшихся примерно в одинакоых условиях. На протяжении дождя на радиолокационной станции фиксировалась на фотоплёнку эволюция экспериментальной и соседних облачных ячеек. В числе радиолокационных параметров измерялись высота верхней границы ячейки $H_{ВГ,}$ км, максимум радиолокационной отражаемости $Z_{макс}$ в dBZ, высота максимальной радиолокационной отражаемости $H_{Zмакс}$, км, температура на этих высотах $T_{ВГ}$, °C, $T_{Zмакс}$, °C, отношение толщин холодной части ячейки к тёплой h_-/h_+. Эти данные учитывались на этапе анализа для определения стадии развития облачной ячейки и места введения в неё трассера.

Скорость вымывания трассера характеризуется константой вымывания σ (c^{-1}).

Вначале концентрация трассера в дождевой воде растет, достигает максимума, а затем падает по экспоненте. Естественно

принять, что убывание количества (массы) трассера в дождевой воде отражает убывание массы трассера и в облаке в целом. Процесс убывания хорошо описывается экспонентой.

$$C(t) = C_0(t)\, e^{-\sigma \cdot t}. \qquad (2)$$

Практически константа σ находилась из соотношения

$$\sigma = \frac{1}{t_j - t_i} \ln \frac{C(t_i)}{C(t_j)}, \qquad (3)$$

где $C(t_i)$, $C(t_j)$ – объемные концентрации примеси в дождевой пробе в момент времени t_i и t_j соответственно.

Характерный параметр σ показывает скорость убывания (вымывания) трассера в облаке и переноса его на землю. Ниже, после описания экспериментов, будет дана оценка результатов исследования этого параметра.

Половина искусственно вводимого трассера вымывается облачными каплями за время

$$T_{1/2} = \ln 2/\sigma. \qquad (4)$$

О точности введения трассера в облачную ячейку

Место введения трассера выбирались по радиолокационным характеристикам радиоэхо. Для поставленной задачи необходимо было знать на какой стадии развития ячейки и в какое место следует вводить трассер. Точка ввода задавалась тремя координатами при пуске ракеты: азимутом, углом места и интервалом времени от пуска до подрыва головной части ракеты (или самой ракеты). Радиоэхо облачной ячейки и её параметры наносились на планшет по данным радиолокатора. Привязку к местности ракетных установок, радиолокаторов, осадкомеров и оформление планшета выполняла специализированная геофизическая организация с точностью ± 10 м. Момент взрыва на трассе полёта ракеты или её головной части задавался с помощью специальных головных трубок. На головной трубке перед пуском ракеты устанавливалось (задавалось) время её срабатывания (подрыва) после момента пуска. Точность её срабатывания на траектории полёта – не хуже ± 10 м. Как правило, выбранные для введения трассера точки в облачной ячейке находились в зоне активной части траектории полёта ракеты, где она подвержена минимальному влиянию бокового ветра. Точность места взрыва ракеты или её головной части проверялась прямыми экспериментами в чистой атмосфере. В Молдавии в них в качестве трассера применялись радиоотражающие диполи (металлизированные иглы длиной равной четверти длины волны радиолокатора, т.е. 0,8 см. В дальнейшем они были заменены угленом). Радиолокационная станция отслеживала точность места их введения при взрыве. На северном Кавказе подобные работы проводились путём радиолокационного контроля места разрыва артиллерийских снарядов по радиотражению его остатков. Эти эксперименты показали, что отклонение фактического места взрыва от рассчётного не превышает нескольких десятков метров. Вместе с тем, с учётом сказанного, отклонение фактической точки взрыва от задаваемой не следует считать лучше точности определения координат цели радиолокатором. При определении координаты цели по максимуму радиолокационного сигнала, исходя из технических характеристик МРЛ-5, ошибка на удалении 5 км составит по дальности 150 м, а по тангенциальной составляющей около 40 м (размер радиолокациолнного объёма). При этом для масштабов облачной ячейки и расстояния от места взрыва до осадкомерных приборов, регистрировавших первые капли с трассером (от 2 до 5 км), погрешность измерения скорости переноса трассера первыми каплями дождя не превосходит 10 %.

Часовые механизмы всех плювиографов систематически проходили специальную таррировку и синхронизацию с главными часами полигона. Погрешность в определении времени не превышала одной минуты.

Углен в ряде экспериментов вводился сбросом с самолёта в заданную точку перед облачной ячейкой. Она выбиралась метеорологическим радиолокатором. Самолёт наводился на цель аэродромным радиолокатором. Техническое оснащение совместного командно диспетчерского пункта управления полётами и воздействиями в аэропорту Кишинёва обеспечивало знание места расположения самолёта, а следовательно и места сброса углена, с точностью единиц метров (точность определения целей аэродромными станциями). Эволюция радиоэхо облачной ячейки и углена контролировалась метеорологическими радиолокаторами МРЛ-5 и поляриметром. Точности их измерения, как было показано выше, определяются параметрами станции (Абшаев и др., 1980).

Описание и результаты экспериментов

Табл. 3 содержит сводку выполненных наблюдений за все годы экспериментов, использованных в данной работе.

Таблица 3

Сведения о проведенных экспериментах

№ п/п	Дата	Высота нулевой изотермы, м	Высота взрыва, м	Трассер	Ракета	Место в ячейке*	Основной результат**
1	2	3	4	5	6	7	8
1	26.06.65	2500	2000	PbI_2	ПГИ	3	2
2	05.07.65	3000	3800	^{210}Po, ^{32}P	ПГИ	4	3
3	**09.07.65**	**2500**	**2700**	**PbI_2**	**Облако**	**2**	**3**
4	12.07.65	2200	3800	PbI_2	ПГИ	3	2
5	20.07.67	3900	3800	^{210}Po, ^{32}P	Облако	2	3
6	17.06.72	3600	4300	^{210}Po	ПГИ-м	4	3
7	18.06.72	3700	5600	^{210}Po, ^{32}P	Облако	1	1
8	24.06.72	2400	4300	^{210}Po, ^{32}P	ПГИ-м	3	2
9	29.06.72	3500	4100	^{210}Po	ПГИ-м	4	1
10	**08.07.72**	**2900**	**3600**	**^{210}Po**	**ПГИ-м**	**1**	**1**
11	17.07.72	2300	4100	^{210}Po	ПГИ-м	3	2
12	18.07.72	2500	3800	^{210}Po	ПГИ-м	4	1
13	07.07.74	3800	-	^{210}Po	Фоновые измер.		Табл. 1
14	09.07.74	3800	1000	^{210}Po	ПГИ-м	4	3
15	**09.07.74**	**3500**	**3800, 2700**	**PbI_2**	**Облако, ПГИ-м**	**1**	**1**
16	12.07.74	3400	3800, 2700	PbI_2	Облако, ПГИ-м	1	1
17	19.07.74	3600	5000 1100	D_2O ^{210}Po	Облако, ПГИ-м	4	3
18	20.07.74	2900	3400	D_2O, ^{210}Po	ПГИ-м	1	1
19	**02.08.74**	**3600**	**1100**	**^{210}Po**	**ПГИ-м**	**4**	**3**
20	**02.08.74**	**3600**	**5000**	**D_2O,**	**Облако**	**4**	**3**
21	02.08.74	3600	2600	PbI_2	Облако	2	3
22	03.08.74	2900	–	^{210}Po, PbI_2	Фоновые измер.		Табл. 1
23	12.08.74	3000	2700	PbI_2	ПГИ-м	4	3
24	09.07.77	3600	7000	^{210}Po	Облако	1	1
25	15.07.77	3600	6000	^{210}Po	Облако	1	1
26	16.07.77	3700	–	^{210}Po, PbI_2	Фоновые измер.		Табл. 1
27	27.07.80	3700	4700	^{210}Po	Облако	2	3
28	**09.08.80**	**4100**	**6000**	**^{210}Po**	**Облако**	**2**	**3**
29	10.08.80	4100	–	^{210}Po, PbI_2	Фоновые измер		Табл. 1
30	28.06.82	2900	–	^{210}Po, PbI_2	Фоновые измер		Табл. 1
31	11.07.82	3400	–	^{210}Po, PbI_2	Фоновые измер		Табл. 1
32	14.07.82	3400	–	^{210}Po, PbI_2	Фоновые измер		Табл. 1
33	17.07.82	3500	2800	^{210}Po	ПГИ-м	2	3
34	07.08.82	3500	2700	^{210}Po	ПГИ-м	1	1
35	09.08.82	3600	3000	^{210}Po,	ПГИ-м	1	1
36	12.07.83	4000	3800	^{210}Po, ^{115}In	Алазань	2	3
37	13.07.83	4000	4000	^{210}Po, ^{115}In	Алазань	2	3
38	28.07.83	3900	3800	^{210}Po, ^{115}In	Алазань	2	3
39	07.08.83	3800	3500	^{210}Po, ^{115}In	Алазань	2	3
40	09.08.83	3800	3500	^{210}Po, ^{115}In	Алазань	1	1
41	10.08.83	3800	–	^{210}Po, ^{115}In	Фоновые измер		Табл. 1

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8
42	03.07.84	3500	–	^{210}Po, PbI_2	Фоновые измер		Табл. 1
43	07.07.84	3500	5700	PbI_2	Алазань	1	1
44	**15.07.84**	**3600**	**4200**	**AgI**	**Алазань**	**2**	**3**
45	09.08.84	3600	–	^{210}Po, PbI_2	Фоновые измер		Табл. 1
46	25.06.89	3000	–	Pb, Mn, Ni	Фоновые измер		Табл. 1
47	29.06.89	3000	–	Pb, Mn, Ni	Фоновые измер		Табл. 1
48	29.06.89	3100	4800	PbI_2	Алазань	2	3
49	14.07.89	2900	5200	PbI_2	Алазань	2	3
50	15.07.89	2900	–	PbI_2, Cr, Ni	Фоновые измер		Табл. 1

Примечания:

* – цифры ниже указывают место введения трассера в облачную ячейку:

1 – трассер вводился в область максимальной радиолокационной отражаемости выше (ниже) нулевой изотермы на стадии выпадения ливневых осадков (стадия диссипации);

2 – трассер вводился во фронтальную часть облачной ячейки, выше (ниже) нулевой изотермы, на начальной стадии развития ячейки (стадия развития);

3 – трассер вводился в область, расположенную примерно в 500-х метрах перед облачной ячейкой на начальной стадии её развития. Высота введения трассера близкая к высоте верхней границы самой ячейки;

4 – трассер вводился в тыл области максимальной радиолокационной отражаемости, ниже (выше) нулевой изотермы, на стадии роста высоты ячейки и радиолокационной отражаемости. (стадия зрелости);

** – цифры ниже указывают характер распространения трассера:

1. Ареал распространения трассера ограничен зоной осадков, выпадавших в момент взрыва головки ракеты с учётом их примерно 5–7-минутного распространения в связи с движением ячейки под воздействием ветра. Появление радиоактивных капель (при применении в качестве трассера ^{210}Po) наблюдается примерно через 2–5 минут после взрыва. Величина σ для различных трассеров различна и находится в диапазоне ($5{,}0\cdot10^{-4}$–$1{,}8\cdot10^{-3}$) c^{-1}. Для ^{210}Po она равна $1{,}8\cdot10^{-3}$ c^{-1}

2. Трассер в дождевой воде на всей предполагаемой площади его выпадения из смещающейся ячейки не обнаружен.

3. Трассер обнаружен в дождевой воде из облачной ячейки на всей площади его выпадения с учётом и её развития, и смещения под влиянием ветра.

Радиоактивные капли обнаруживались через 5–7 минут после взрыва.

Величина σ для различных трассеров различна и находилась в диапозоне ($\sigma = 5{,}0\cdot10^{-4}$–$2{,}1\cdot10^{-3}$) c^{-1}. Для ^{210}Po она равна $\sigma = 2{,}1\cdot10^{-3}$ c^{-1}.

В качестве примеров рассмотрим несколько экспериментов.

Эксперимент 1 (09.08.80). *Пример введения трассера ^{210}Po на стадии развития облачной ячейки.*

На рис. 2 a, b, d, e, f, g – эволюция облачной ячейки по данным её горизонтальных радиолокационных сечений за период времени с 18.00 до 19.05. На рис. 2 c – вертикальное сечение её радиоэхо в момент введения трассера ^{210}Po. Место введения трассера на горизонтальных сечениях обозначено звёздочкой. Трассер введен в область повышенной радиолокационной отражаемости ячейки в 18.35 в точке выше нулевой изотермы. Радиолокационная отражаемость и высота радиоэха росли. Дождь только начинался. На рис. 3 приведено пространственно-временное распределение концентрации трассера ^{210}Po в пробах осадков (данные эксперимента представленного на рис. 2). Для каждого пункта полигона приведен ход изменения в пробах осадков концентрации ^{210}Po (в относительных единицах). На оси абсцисс первые две цифры – часы, следующие две – минуты. Замкнутые области – две зоны выпадения трассера.

На горизонтальном разрезе радиоэхо облаков, выполненном в 18.00, т. е. за 35 минут до начала эксперимента (рис. 2a). В радиусе 50 км видны две облачные ячейки, в том числе зрелая *F* и маленькая, зарождающаяся между пунктами наблюдения 10 и 13. Ячейка *F* перемещалась в северо-восточном направлении и из неё выпадал сильный ливень. Максимальная радиолокационная отражаемость была выше 45 dBZ. В дальнейшем эта ячейка осталась вдали от области эксперимента, в выпавшем из неё дожде трассер (в количестве более фонового) обнаружен не был.

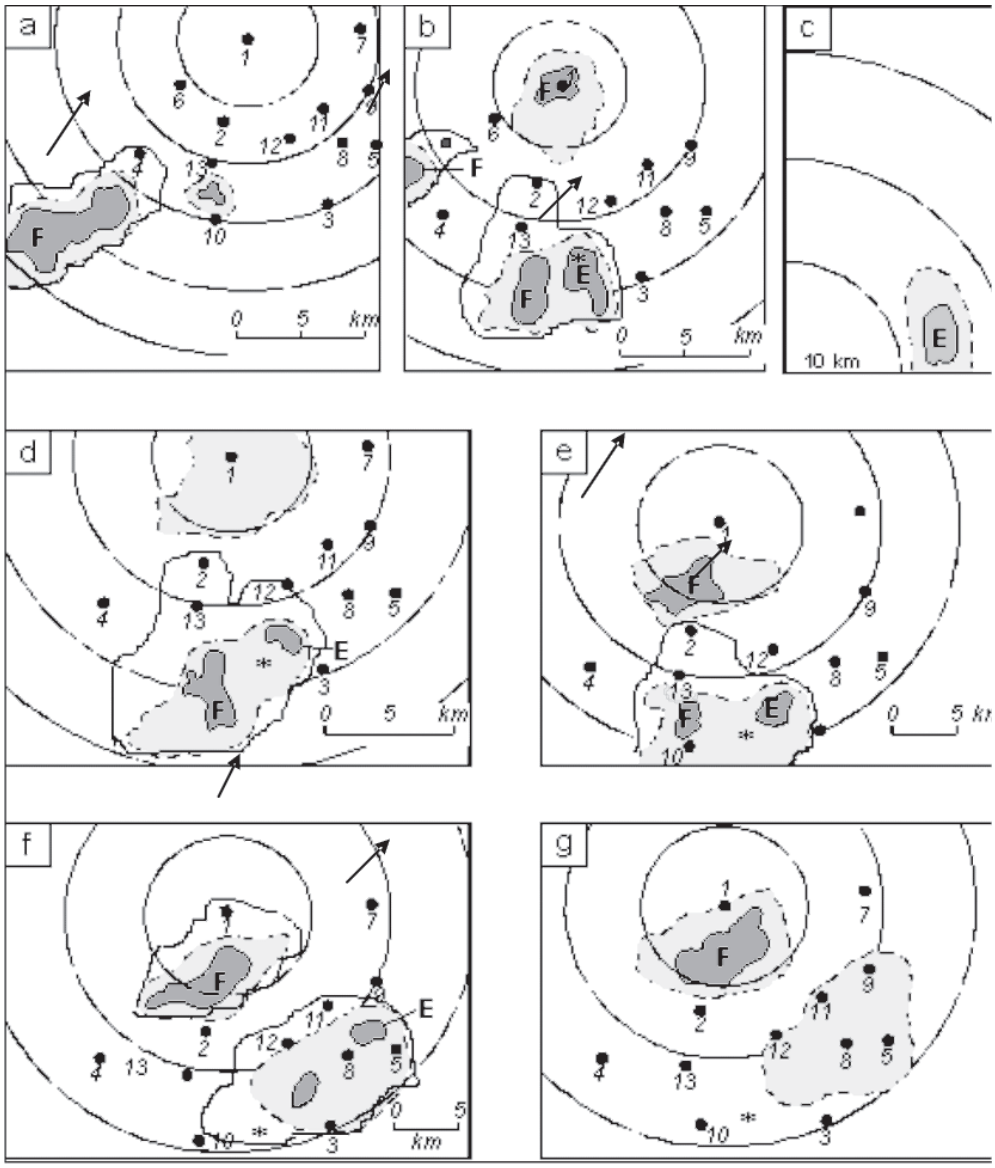

*Рис. 2. (a, b, d, e, f, g) – горизонтальные радиолокационные разрезы облачных ячеек за период эксперимента с 18.00 до 19.05; d – вертикальное сечение радиоэхо в азимуте введения трассера. Сплошные линии – изолинии радиолокационной отражаемости Z ≥ 20 dBZ, пунктирные – Z ≥ 35 dBZ, заштрихованные области Z ≥ 45dBZ, буквами E и F обозначены облачные ячейки, * – эпицентр введения трассерного ^{210}Po, точки с цифрами – пункты для сбора отдельных капель дождя и дождевой воды порциями: a – 18 ч 00 мин, b – 18 ч 35 мин, c – 18 ч 40 мин, φ = 172°, d – 18 ч 44 мин, e – 18 ч 47 мин, f – 18 ч 50 мин, g – 19 ч 05 мин, (φ – азимут радиолокационного вертикального сечения ячейки)*

Ячейка между пунктами 10 и 13 быстро развивалась в южном направлении, но смещалась, как и ячейка *F* в северо-восточном направлении. С помощью вертолёта и автомобилей под зоной возможного перемещения ячейки была организована сеть наблюдательных пунктов. На рисунках она обозначена цифрами. К 18.35 выбранная для эксперимента ячейка занимала уже обширную область над пунктами наблюдений 2, 13, 10, 3. В ней была общая область, описываемая изолиниями р/л отражаемостей 20 и 35 dBZ и два центра максимальной отражаемости более 45dBZ. Эти центры обозначены через F в тылу относительно направления движения ячейки и через E во фронтальной её части. В 18.35 во фронтальный центр E этой объединённой ячейки с помощью ракеты «Облако» был введен трассер ^{210}Po на высоте 6 км, т.е. выше нулевой изотермы на 1900 метров.

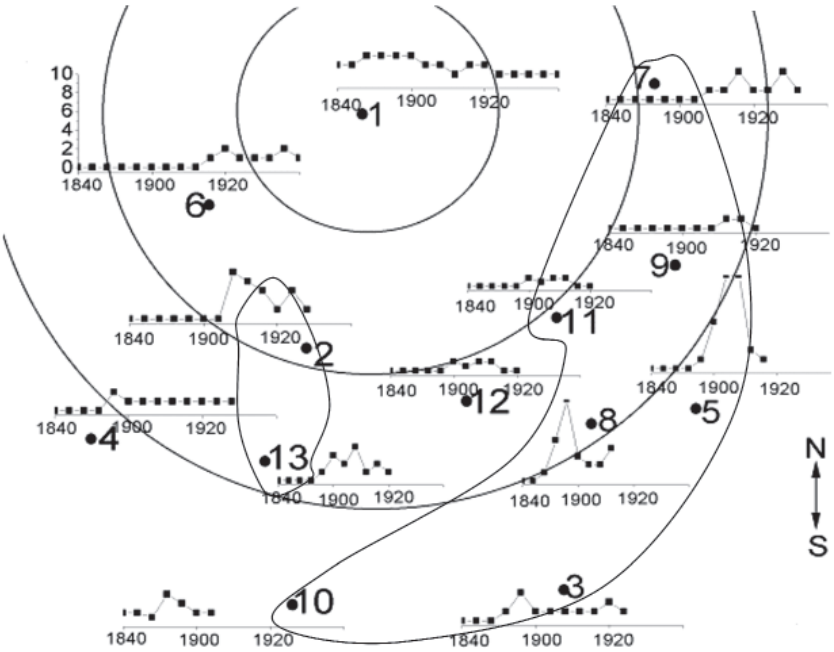

Рис. 3. Пространственно-временное распределение концентрации трассерного ^{210}Po в пробах осадков (данные эксперимента рис. 2). Каждому пункту полигона соответствует кривая изменения концентрации ^{210}Po в пробах осадков. На оси абсцисс первые две цифры – часы, следующие две - минуты. Замкнутые области – две зоны выпадения трассера

Через 15 минут в 18.50 (рис. 2 f) оба центра максимумов оставались объединёнными одной изолинией отражаемости 35 dBZ. Радиолокационные параметры фронтального центра увеличивались (верхняя граница – на километр, высота максимума радиолокационной отражаемости – на 500 м). Грозовая активность достигла 2–3 молниевых разрядов в минуту. Вся ячейка смещалась на северо восток в сторону пунктов 8, 5, 9. Центр *F* в тылу облачной ячейки почти не смещался и постепенно ослабевал. В результате образовались две области дождя, в которых идентифицирован трассер. При этом радиоактивные капли (с содержанием радиоактивности выше фонового) первыми обнаружили пункты 10 и 8 в 18.44 (через 9 минут после введения трассера в ячейку), далее пункты 5, 3 и 13 (в 18.46) и пункт 9 в 19.02. Радиоактивность на пунктах 8 и 5 со временем нарастала и достигла максимума через 6 минут после появления первых радиоактивных капель, т. е. через 15 минут после введения трассера. Заметим, что пункты 8, 5, 9 располагались по ходу движения одного из максимумов радиолокационной отражаемости. Пункты 10 и 3, также отметившие всплеск радиоактивности, располагались в непосредственной близости от проекции точки взрыва трассера на землю. Вторая зона радиоактивных капель образовалась в дожде, выпадавшем из второго максимума радиолокационной отражаемости *F*, располагавшегося в момент введения трассера в тыловой части ячейки (пункты 13 и 2). Радиоактивность дождя в этой зоне относительно мала. Суммируя результаты эксперимента можно сказать следующее. Трассер введен в область максимальной радиолокационной отражаемости, выше нулевой изотермы, на стадии развития ячейки. Хотя дождь из тыловой (по направлению движения) части ячейки уже выпадал, ячейка, тем не менее, продолжала развиваться. Трассер попал в тыл ячейки и частично принял участие в процессе осадкообразования, а частично, возможно, был просто вымыт дождём (точки 13, 2 и 10, 3). Трассер также распространился и во фронтальной части ячейки и выпадал вместе с дождём по трассе её развития и смещения. Следует отметить, что время появления первых радиоактивных капель дождя в различных наблюдательных точках полигона говорит о том, что скорость распространения трассера превышала возможные скорости гравитационного падения капель (или частиц осадков). (Скорость смещения радиоэха ячейки составляла 30 км/ч). Максимально зафиксированная в этом эксперименте скорость переноса радиоактивного трассера от точки его введения по прямой

в точку наблюдения на земле превышала 60 м/с. Подобные скорости распространения ^{210}Po были обнаружены только в нескольких экспериментах. Оценим какая могла быть максимальная скорость распространения трассера, если бы он выносился из точки введения в облачную ячейку только за счёт падения капель. Размер первых радиоактивных капель данного эксперимента был в диапозоне от 0,2 до 1,6 мм. В некоторых других подобных экспериментах спектр диаметров капель был от 0,1 до 2,0 мм. По данным 9 экспериментов (Шалавеюс, Кранкалис, 1984) доминировали дождевые капли, модальный радиус которых находился в интервале 0,24-0,68 мм. Они составляли 35% всех дождевых капель. Этими каплями вымывалось 13% введенного ^{210}Po. Наибольшей водностью обладали капли радиусами 0,57–1,47 мм. Их количество составляло 23% от общего количество измеренных капель и на их долю пришлось 36% трассерной радиоактивности. Эффективные радиусы капель, вымывавших наибольшее количество трассера колебались в интервале значений 0,46–1,47 мм. Их размеры почти совпадали с интервалом преобладающих радиусов. Такие капли в среднем вымывали 40% трассерного ^{210}Po, их водность составляла 46%, а количество 25%. Исходя из этих данных, оценим скорость падения капель диаметром равным 2 мм.

В этом случае скорость падения капли составит 3,27 м/с (Мазин и Шметер, 1983, с. 260). Ясно, что непосредственно скорость падения капель не может внести заметного вклада в обнаруженную скорость перемещения трассеров (60 м/с). Нами предлагается следующее объяснение столь высоких скоростей распространения трассера. Во время взрыва головки ракеты жидкость содержащая химическое соединение ^{210}Po (азотнокислый полоний) частично распыляется на мелкие капли, а частично испаряется (Шалавеюс и др., 1977). Основанием для такого вывода послужили эксперименты, в которых наполненная двухмолярным азотнокислым раствором ^{210}Po голова ракеты «Облако» взрывалась на уровне 1,5 м над землёй. Радиус распыления трассера при этом не превышал 10 м. Только 20% раствора разбрызгивался на капли. Диаметр 98% этих капель был в диапазоне 0,1–0,2 мм. 80% раствора при взрыве испарился. Во втором подобном эксперименте процент испарения раствора составил 95%. Ошибка метода при таких экспериментах по оценке авторов составляет около 20%. Это значит, что большая часть жидкости при взрыве испарялась. При испарении образуются ионы, на скорость движения которых оказывают влияние сильные электрические поля, которые могут образовываться внутри мощных конвективных облаков, как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. Следует учитывать и то, что ионная среда ^{210}Po ускоряет коагуляционные процессы (Мучник, 1974). В результате облачные капли, содержащие на своей поверхности ^{210}Po быстрее увеличивают свою массу. Интенсивность грозовых разрядов в нашей экспериментальной облачной ячейке составляла 2–3 молнии в минуту. Направление разрядов могло быть, как горизонтальное (внутри облачное), так и вертикальное (между облачной ячейкой и землёй). По данным (Мучник, 1974; Степанеко и Гальперин, 1983; Имянитов, 1956) минимальная напряжённость поля, необходимая для поддержания электрического разряда в таких облачных ячейках составляет 10^6 V/м. Такие электрические силы, вероятно, могут увеличить захват ионов облачными каплями и ускорить процессы коагуляции. Степанеко и Гальперин (1983) с помощью доплеровских измерений на радиолокаторе показали, что нисходящие потоки облачных частиц в грозовых ячейках могут превышать 20 м/с. Таким образом, с нашей точки зрения, ионы трассера в столь сильных электрических полях и условиях турбулентности способны приобретать значительные скорости, достигая в отдельных случаях 60 м/с. Важным результатом наблюдений в этом и подобных экспериментах, нам представляется тот факт, что трассер в различных направлениях распространялся с различной скоростью. В данном эксперименте скорость распространения трассера 60м/с, определенная по времени появления первых радиоактивных капель, была отмечена в направлении противоположном смещению облачной ячейки, т.е. в тылу. Скорость распространения трассера в других направлениях (в сторону смещения ячейки и перпендикулярно ему) составляла 20–24 м/с. Это может свидетельствовать как о том, что в области введения трассера имели место сильные внутриоблачные потоки, направленные в сторону противоположную направлению смещения облачной ячейки, так и о том, что электрическое поле в этот момент было ориентировано либо горизонтально, либо наклонно к точке на земле, расположенной в тылу относительно ведущего потока. С нашей точки зрения выше приведенные предположения могут объяснить столь большие ско-

рости (20–25 м/с и даже 60 м/с) распространения трассера облачными и дождевыми каплями. Возможно, что этот не достаточно изученный фактор играет важную роль при распространении и активизации льдообразуещего аэрозоля в работах по увеличению осадков и предотвращению роста града. Если внутри облачные заряды способствуют столь быстрому рапространению ионов трассеров и их захвату облачными каплями, то стоит разработать методы электризации льдообразующих реагентов перед их диспергированием в облачные ячейки с целью управления осадкообразующими процессами и при воздействиях с целью рассеивания туманов.

Эксперимент 2 (09.07.74). *Пример штатного противоградового засева реагентом PbI_2 на стадии диссипации облачной ячейки.*

На рис. 4 представлено поле распределения Pb в осадках, выпавших на полигоне из облачной ячейки после штатного воздействия с целью предотвращения роста града.

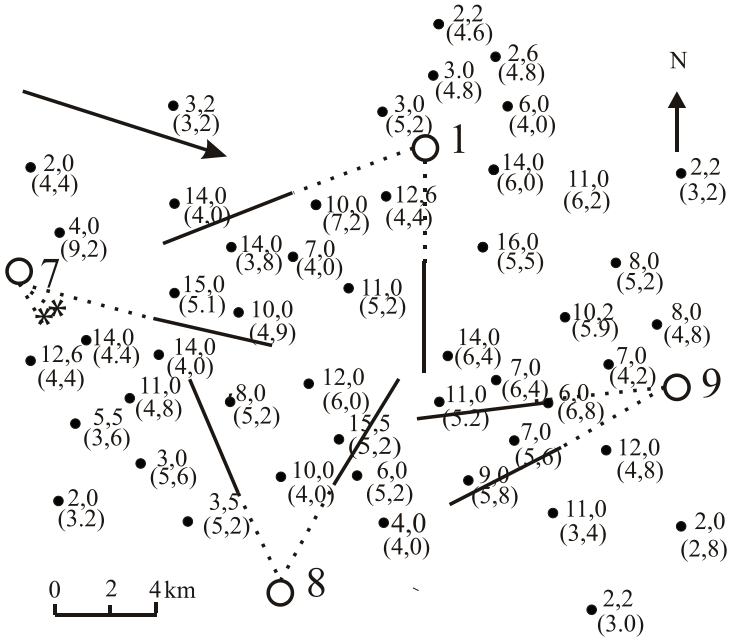

*Рис. 4. Общий вид распределения заборников дождевой воды на полигоне (отмечено точками), кружочки с цифрами обозначают пункты запуска ракет с льдообразующим реагентом, направление смещения облачной системы отмечено стрелкой, направление введения PbI_2 по трассе при помощи ракеты «Облако» отмечено жирными отрезками, ** – эпицетры введения реагента при взрыве противоградовых ракет «ПГИ-М», цифры у точек обозначают концентрацию Pb в осадках в 10^{-6} г/л, а в скобках – количество осадков в мм*

Обширная облачная малоподвижная ячейка высотой 10,5 км находилась между ракетными пунктами 1, 7, 9, 8 (на рисунке они выделены кружками). Радиолокационная отражаемость достигала $Z \geq 45$ dBZ. Ячейка была на стадии своего максимального развития (радиолокационные параметры не росли), из неё выпадал ливневой дождь и мелкий град. На этой стадии развития с перечисленных пунктов в течении 10 минут в неё были запущены 7 ракет «Облако» и 2 ракеты ПГИ-М. В качестве реагента в ракетах был PbI_2. Реагент вводился в область максимальной радиолокационной отражаемости. Через 15 минут после начала засева параметры ячейки ослабли и дождь прекратился. Цифры возле точек (заборников дождевой воды) обозначают концентрацию Pb в осадках умноженную на 10^{-6} г/л, а в скобках – количество осадков, мм. Результаты эксперимента показали следующее:

– концентрация Pb в осадках распределилась по полигону неравномерно;

– максимумы концентрации свинца наблюдаются под трассой введения реагента. На земле сформировались площадки повышенной (относительно фона) концентрации свинца, у которых есть ось максимума (под ракетной трассой – отрезки прямых на рис. 4) и почти симметричное уменьшение его в обе стороны;

– Pb быстро вымывался на локальных площадях и не переносился в удаленные от места его введения районы.

При введении реагента PbI_2 в облачную ячейку на стадии её максимального раз-

вития (диссипации) он выливается вместе с ливнем из неё и скорее всего либо не принимает участие, либо активизирует рост облачных капель и их выпадение на землю.

Эксперимент 3 (09.07.65). *Пример штатного противоградового засева облачной ячейки льдообразующим реагентом PbI_2 на стадии её развития.*

На рис. 5 показана эволюция радиолокационных горизонтальных сечений облачной ячейки на уровне отражаемости более 40 dBZ. В 16.59 радиолокационные параметры ячейки (высота верхней границы, величина максимальной радиолокационной отражаемости, отношение холодной части ячейки к тёплой и др.) быстро росли. Дождь не выпадал. Ячейка была градоопасной. Ещё до этого момента в 16.55 было принято решение о проведении на неё противоградового засева. В 16.56, 16.58 и 16.59 в ячейку было запущено три ракеты «Облако» с PbI_2 (см. рис. 5). Через 9 мин после первой ракеты начался дождь, который длился 35 мин. Вторая серия воздействий проводилась во время дождя в 17.07 и в 17.08.

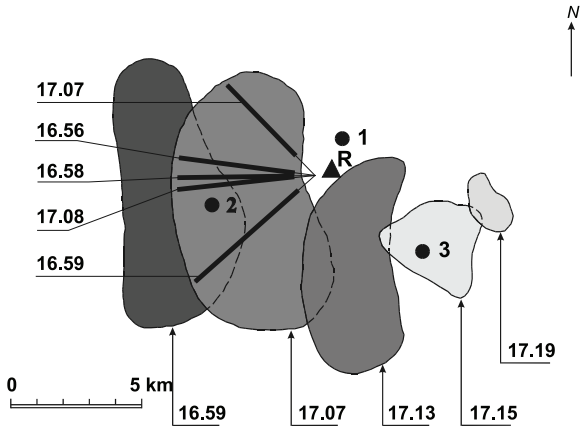

Рис. 5. Радиолокационный горизонтальный разрез облачной ячейки (на уровне отражаемости более 40 dBZ) на высоте засева PbI_2 во время смещения ее над полигоном:
– жирными отрезками линий отмечены трассы диспергирования реагента;
– R-точка стояния радиолокатора и пункта запуска ракет;
– точки с цифрами 1, 2, 3 пункты сбора отдельных проб дождевой воды;
– числа означают часы и минуты запуска ракет и расположения облачной ячейки

На рис. 6 показано, как изменялась концентрация Pb в осадках на трёх наблюдательных пунктах. Вертикальными стрелками на оси абсцисс обозначены моменты запуска ракет.

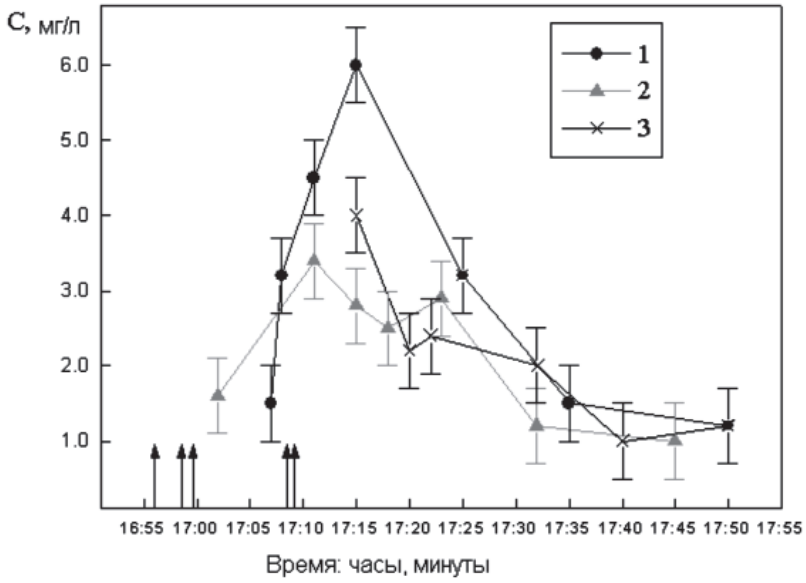

Рис. 6. Изменение концентрации Pb в осадках после введения в облачную ячейку льдообразующего реагента PbI_2. Стрелки означают время запуска противоградовых ракет. Кривые 1, 2, 3 получены в пунктах, указанных на рис. 4

Первым на пути движения ячейки после засева был пункт номер 2. Повышение (относительно фона) концентрации Pb здесь началось через 6 минут после запуска первой ракеты. Концентрация Pb достигла максимума через 12 минут. Повышение (относительно фоновой) концентрации Pb на наблюдательном пункте номер 1 отмечено в 17.08, т.е. через 14 минут после запуска первой ракеты. В это время ячейка развивалась и смещалась в направлении этого наблюдательного пункта. Значения её радиолокационных параметров росли. Вместе с дождём из неё выпадал мелкий град. Максимальная концентрация Pb была измерена здесь через 21 мин после запуска первой ракеты. К этому времени в ячейку было запущено уже 5 ракет (22,5 кг пиротехнической смеси, содержащей PbI_2). Величина этого максимума значительно больше соответствующего максимума на пункте номер 2. В 17.14 концентрация Pb в дожде начала расти на пункте номер 3. К этому времени интенсивность дождя начала снижаться, выпадение града прекратилось. Обращает на себя внимание очень быстрое снижение концентрации Pb после достижения максимума. Объясняется это очень быстрым его вымыванием. Представляется, что свинец быстро вымывался потому, что именно на его частицах образовывались зародыши первых частиц осадков, которые и выпадали.

Максимальные концентрации Pb измерены после засева реагента через 10–15 мин. Время полного вымывания льдообразующего реагента из ячейки на всех трёх пунктах составляло 20–25 мин. Дождь меньшей интенсивности после уменьшения концетрации Pb выпадал на всех трёх наблюдательных пунктах ещё не менее 15 минут.

Подводя итог этого эксперимента можно отметить, что трассер PbI_2 вводился во фронтальную часть облачной ячейки, выше нулевой изотермы, на стадии её развития. В итоге повышенная концентрация Pb проявилась по всей площади дождя. Это значит, что реагент внутриоблачными потоками и турбулентностью распространился по всей ячейке и участвовал в осадкообразующем процессе. При этом он быстро вымывался выпадающими каплями (характерное время вымывания σ^{-1} равно примерно 8 минут. Это позволяет думать, что частицы PbI_2 эффективно участвовали в осадкообразующем процессе. Аналогичные результаты получены и в других экспериментах при засеве облачных ячеек (в том числе и с помощью AgI) на стадии их развитя.

Эксперимент номер 4 (15.07.84). *Штатный засев развивающейся градоопасной ячейки с целью предотвращения роста града реагентом AgI.*

Аналогичные (эксперименту 3) результаты получены в других экспериментах при засеве облачных ячеек на стадии их развития, в том числе с помощью реагента AgI.

На рис. 7 представлены две кривые изменения концентрации Ag в дождевой воде после введения в развивающуюся облачную ячейку AgI. Стрелки обозначают время запуска ракет с реагентом. Наблюдательные пункты 1 и 2 располагались на удалении 3 км друг от друга по направлению движения облачной ячейки. Наблюдения над развивающейся, градоопасной, не дождящей облачной ячейкой были начаты в 18.35. В 18.45 из неё начался дождь. Её радиолокационные параметры продолжали рости и градоопасность увеличивалась. С 18.45 до 18.53 она была засеяна тремя ракетами «Алазань 2 М» (три килограмма пиротехнического состава с AgI). Из графика (рис. 7) видим, что рост концентрации Ag (относительно фоновой) на пункте 1 начался через 6 минут после запуска первой ракеты и достиг максимума соответственно через 12–13 минут. На втором пункте (по направлению движения ячейки) дождь начался в 19.08, но рост концентрации Ag отмечается после 19.10. К этому времени радиолокационные параметры ячейки достигли своего максимума. Из неё выпадал сильный ливень. С 19.08 до 19.13 в ячейку были запущены ещё три ракеты «Алазань 2М» (три килограмма пиротехнического состава с AgI). В 19.24, т. е. через 14–15 минут после запуска ракет второй серии засева этот пункт зафиксировал максимум концентрации Ag. На пункте номер 1 концентрация Ag плавно снижалась на протяжении всего времени смещения ячейки. На пункте 2 она начала резко снижаться через 10 минут после запуска последней ракеты и достигла фонового уровня в 19.37. Дождь на этом пункте прекратился в 19.52. Следует отметить, что во всех образцах дождевой воды собраных всеми наблюдательными пунктами, расположенными в зоне дождя из этой ячейки, концентрация Ag превышала фоновые значения ($3...4\cdot10^{-9}$ г/л) и колебалась в пределах $5...30\cdot10^{-9}$ г/л. В то же время обнаружен большой разброс концентраций как по времени, так и по пунктам сбора, что видимо связано с многократным введением реагента в облако. И в этом, как и в предыдущем, эксперименте отмечалось повышен-

ная концентрация реагента (в данном случае Ag) по всей площади дождя. Это значит, что реагент внутриоблачными потоками и турбулентностью рассеивается и участвует в осадкообразующем процессе, затрагивающем всю ячейку. Тот факт, что он быстро вымывался выпадающими каплями позволяет думать, что частицы реагента действительно служат зародышами осадков. Таким образом, использование трассеров косвенно подтвердило эффективность реагентов и методики их введения. Характерное время вымывания трассера, установленное на пунктах наблюдения, расположенных по направлению смещения ячейки, составило примерно 8–9 минут.

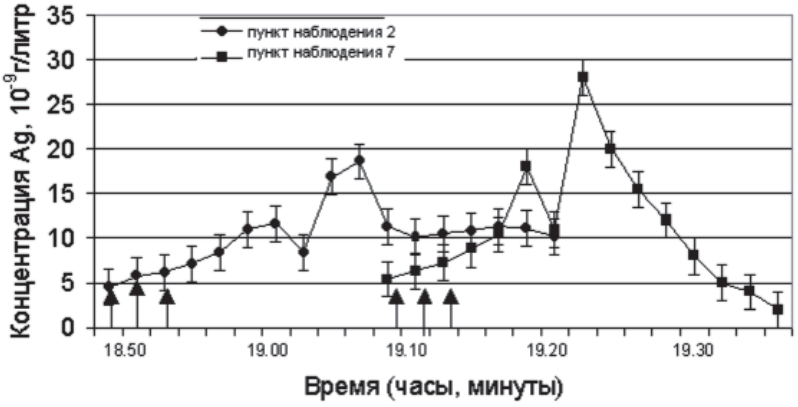

Рис. 7. Изменение концентрации Ag в дождевой воде после засева облачной ячейки льдообразущим реагентом AgI. Стрелки обозначают время запуска ракет с льдообразующим реагентом. Первая кривая – результаты наблюдения на пункте номер 2. Вторая кривая – на пункте номер 7

Эксперимент 5 (02.08.74). *Пример распространения трассера из тыла зрелой ячейки в её фронтальную область.*

В облачную ячейку с разрывом во времени 3 минуты была введены тяжелая вода (с помощью ракеты «Облако») и ^{210}Po – (с помощью ракеты «ПГИ-М»).

Облачная ячейка развивалась в зоне холодного фронта с волнами. Фронт медленно смещался со скоростью 10–15 км/ч. По данным радиозондирования верхний уровень конвекции находился на высоте 11,4 км. Нулевая изотерма была на уровне 3600 м. Максимальное отклонение кривой состояния атмосферы от кривой стратификации – 9,5 °C.

Тяжелая вода была введена в тыловую часть облачной ячейки на уровне 5000 м (на 1400 м выше нулевой изотермой), а ^{210}Po – в центр ячейки на высоте 1100 м (на 2500 м ниже нулевой изотермы).

Схема эксперимента представлена на рис. 8.

На рис. 9 и 10 представлены поля распределения дейтерия и полония.

Анализ эксперимента показал, что введенная в тыл ячейки тяжелая вода распространилась преимущественно по направлению смещения и развития ячейки. Её максимальная концентрация наблюдалась не под эпицентром введения, а на расстоянии 6 км в направлении перемещения облачной ячейки. При постепенном уменьшении концентрации тяжёлая вода регистрировалась пунктами наблюдения почти по всей площади осадков выпавших из этой ячейки за весь период движения и развития. Максимальная концентрация ^{210}Po наблюдалась под эпицентром его введения. Изолинии равных концентраций ^{210}Po, как и тяжелой воды, растянуты по направлению передвижения облачной ячейки. Распространение ^{210}Po в тыловую часть облака было незначительным, но оно, как и во всех экспериментах, имело место. Тяжелая вода, по данным полей концентрации, быстрее удалялась из облака, чем ^{210}Po. В отдельных каплях дождя α – активный ^{210}Po был в виде аэрозоля, состоящего из 40–100 атомов. Первые капли дождя с ^{210}Po были зарегистрированы через 3 минуты, а с тяжёлой водой через 6 минут после их введения в ячейку.

Данный эксперимент свидетельствует, что в ряде ситуаций, воздушный поток, обтекая мощное облачное образование, может частично втягиваться в облачную ячейку с тыла и либо продлить жизнь, либо активизировать в ней осадкообразовательный процесс. Это обстоятельство важно учитывать при проведении работ по засеву облаков при противоградовых мероприятиях.

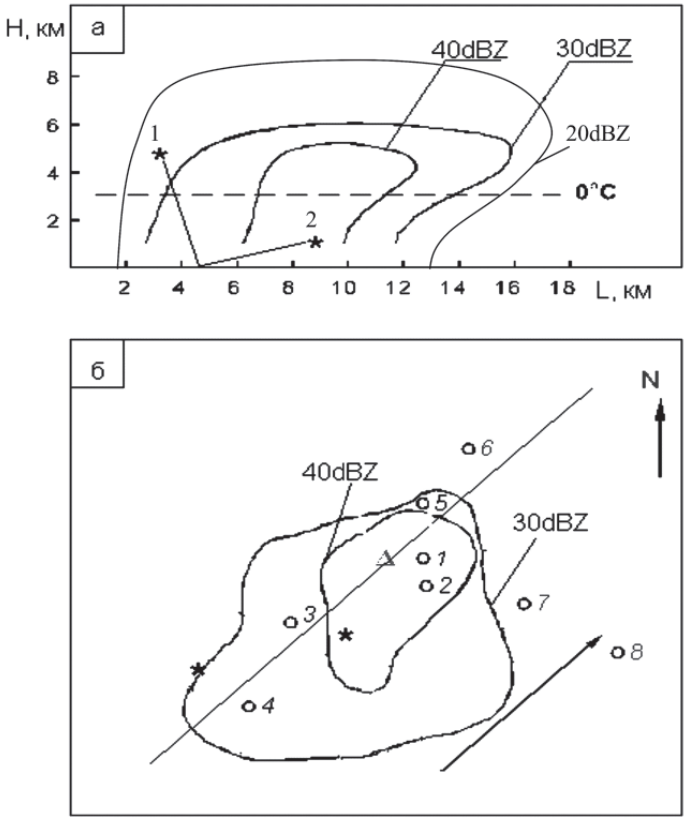

Рис. 8. Вертикальный (а) и горизонтальный (б) разрезы радиоэхо облачной ячейки в момент введения трассеров (02.08.74). Звёздочками 1 обозначено место введения D_2O, звёздочкой 2 – место введения ^{210}Po, числа у изолиний – величины радиолокационной отраженемости, пунктирная линия – высота нулевой изотермы, стрелка показывает направление перемещения облачной ячейки, кружочки с числами – пункты поминутного сбора капель, треугольник – место размещения радиолокатора и ракетного пункта

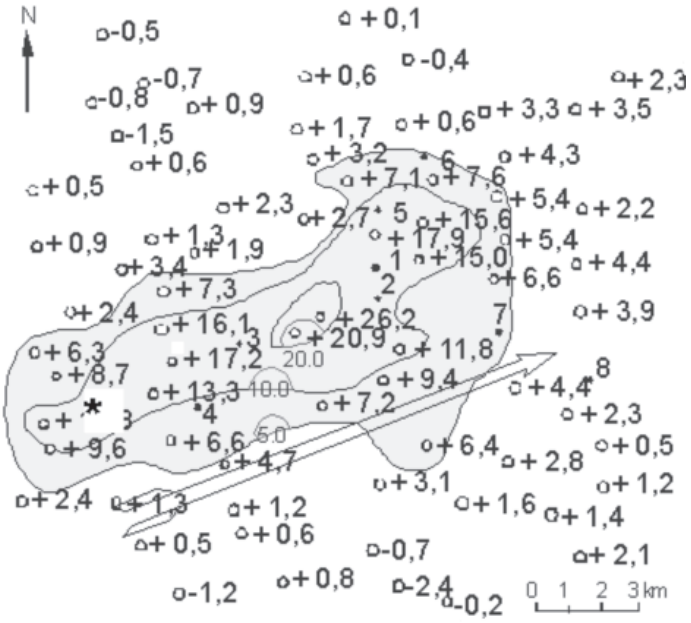

Рис. 9. Поле рапределения D_2O в дожде из облачной ячейки (02.08.1974). Стрелкой отмечено направление смещения облачной ячейки, звездочкой – проекция на землю эпицентра введения трассера, кружёчками обозначены пункты измерения трассера в дожде, сплошные кривые – изолинии равных концетраций

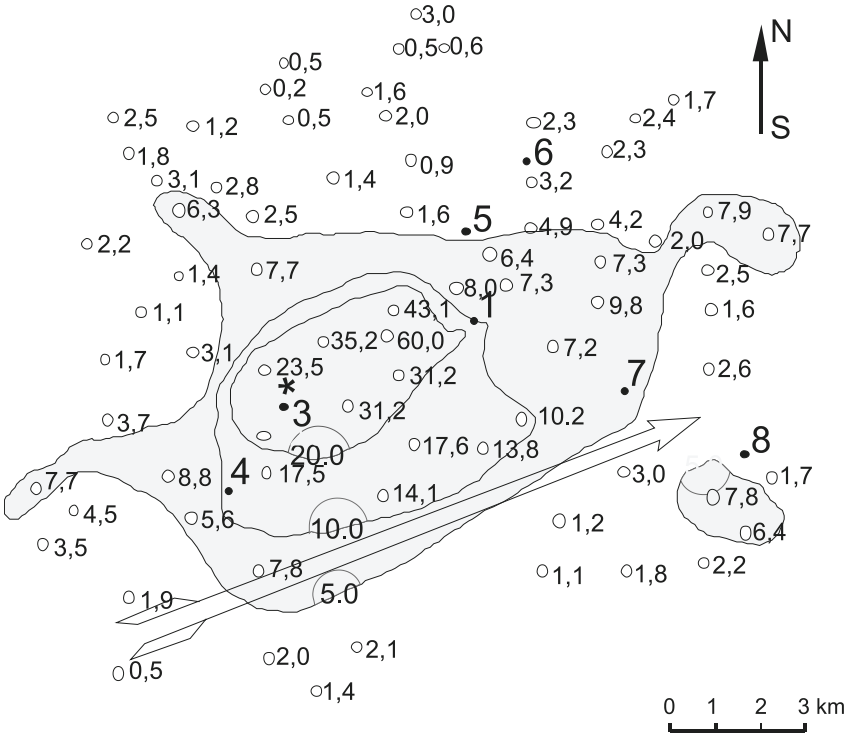

Рис. 10. Поле рапределения ^{210}Po в дожде из облачной ячейки (02.08.1974). Стрелкой отмечено направление смещения облачной ячейки, звездочкой – проекция на землю эпицентра введения трассера, кружочками обозначены пункты измерения трассера в дожде, сплошные кривые – изолинии равных концетраций

Эксперимент номер 6 (08.07.72). *Реагент ^{210}Po. Воздействие на стадии максимального развития ячейки.*

На рис. 11 облачная ячейка на стадии своего максимального развития. Верхняя граница ячейки достигла 9,5 км, высота максимальной радиолокационной отражаемости 7,5 км, уровень максимальной радиолокационной отражаемости – $Z \geq 40$ dBZ. Из ячейки выпадает сильный ливень. В область максимальной радиолокационной отражаемости с помощью ракеты «ПГИ-М» введен трассер ^{210}Po. Выделены три области по значению радиолокационной отражаемости, в том числе первая внешняя $Z \geq 25$ dBZ, вторая $Z \geq 35$ dBZ, третья $Z \geq 40$ dBZ. Короткими штриховыми линиями отмечена зона интенсивного вымывания ^{210}Po в процессе перемещения облачной ячейки. Крестиком – место введения ^{210}Po. Кружочками обозначены пункты сбора осадков. Цифрами в числителе обозначены плотности выпадения ^{210}Po, в знаменателе – количество выпавших осадков в относительных единицах. Стрелка показывает направление смещения ячейки.

Из рис. 11 видно, что трассер вымывался только в правой (по направлению перемещения) части облачной ячейки. Зоны повышенной концентрации трассера отмечены и в тылу и по фронту перемещения ячейки. Эксперимент показал, что при введении трассера на стадии выпадения ливневых осадков в область максимальной радиолокационной отражаемости выше нулевой изотермы, он вымывается под областью его введения.

Скорость вымывания различных трассеров облачными и дождевыми каплями

Проведенные эксперименты дают основание думать, что скорость вымывания трассеров из облачной среды зависит от их собственных свойств и в первую очередь от гигроскопичности и растворимости. Полученные данные о средних значениях констант вымывания σ и времени $T_{1/2}$, в течение которого облачные и дождевые капли вымывают половину вводимого трассера, опубликованы в работах: Shalavėjus and Dinevich, (1995); Shalavėjus, (1994), (1996); Никорич и др. (1989); Шалавеюс и др, (1988); Шалавеюс и др, (1983); Шалавеюс и Кранкалис, (1984).

Основные результаты, полученные в этих работах сведены в табл. 4.

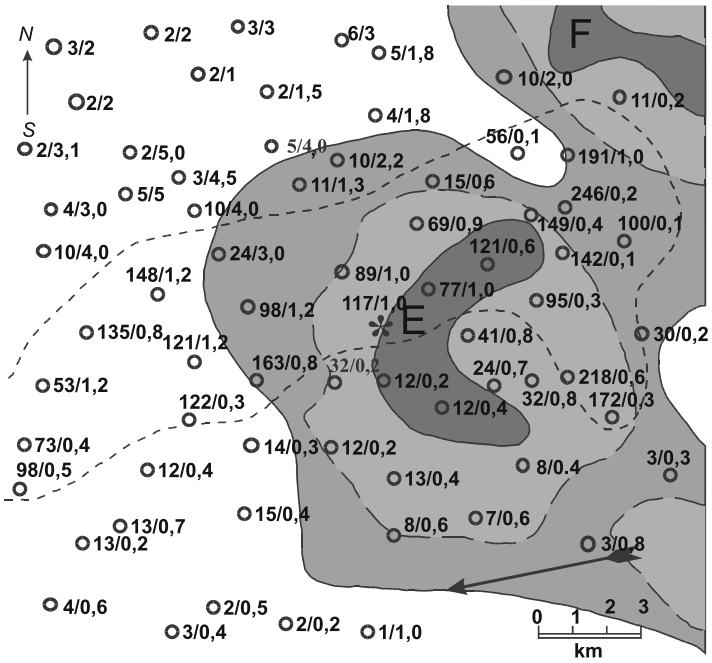

Рис. 11. Положение облачной ячейки в момент введения ^{210}Po. Выделены три области: внешняя $Z \geq 25$ dBZ, вторая $Z \geq 35$ dBZ и третья $Z \geq 40$dBZ. Короткими пунктирными линиями отмечена зона интенсивного вымывания ^{210}Po в процессе перемещения облачной ячейки. Крестиком – место введения ^{210}Po. Кружёчками обозначены пункты сбора осадков. Цифрами в числителе обозначены плотности выпадения ^{210}Po, в знаменателе – количество выпавших осадков в относительных единицах. Стрелка показывает направление смещения ячейки

Таблица 4

Скорость поглощения (вымывания) различных трассеров облачными каплями

Примесь	σ (10^{-4} с$^{-1}$)	$T_{1/2}$, min
^{210}Po	20 ± 4	4 ± 1
D_2O	26 ± 5	3 ± 1
PbJ_2	21 ± 4	3 ± 2
In	11 ± 2	6 ± 3
J	27 ± 6	3 ± 1
AgJ	19 ± 4	4 ± 1
Cr	6 ± 1	12 ± 4
Ni	5 ± 1	14 ± 5

Из табл. 4 следует, что среднее время поглощения (вымывания) различных трассеров облачными каплями в облачной ячейке почти сравнимо со временем существования в ней капель, которое для слоистых облаков не превышает 30 минут, а для конвективных, по расчётам Ивановой, Кабановой, существенно меньше (Мазин и Шметер, 1983, с. 233–235). Время же вымывания трассера осадками зависит, как от характеристик трассера, так и от особенностей каждого осадкообразующего процесса, в том числе от места введения трассера и стадии развития облачной ячейки.

Из табл. 5 следует, что трассер быстрее переносится каплями дождя на землю, если он попадает в область максимальной отражаемости облачной ячейки на стадии её диссипации. Он медленнее переносится каплями дождя на землю, если попадает в область максимальной отражаемоости либо во фронтальную часть облачной ячейки на стадии её развития.

В ряде случаев аналогичный эффект наблюдается и при введении трассера в тыл мощной, но развивающейся облачной ячейки. Обращает на себя внимание отсутсвие в экспериментах с различными трассерами такой экстремальной скорости их переноса, которая была обнаружена в нескольких экспериментах с ^{210}Po (60 м/с). Это может быть объяснено, как ограниченностью спектра облачных ситуаций, в которых они применялись, так и отличием свойств их ионов. Ион ^{210}Po обладает особой устойчивостью в соединении с другими веществами. Так ионы свинца, индия, серебра или фосфора легко удаляются с загрязнённой ими поверхности. Ионы же ^{210}Po смыть, дезактивировать, удалить с поверхности чрезвычайно трудно. Столь устойчивы они вероятно в каплях.

Таблица 5

Скорость переноса различных трассеров дождём

Стадия развития ячейки/ место введения трассера	Время появления первых капель с трассером после взрыва	Продолжительность осадков с трассером*, мин	Скорость переноса трассера дождём, м/с
Стадия диссипации/ область максимальной отражаемости	2–5	10–15	20–60 (для ^{210}Po) 20–25 (для других трассеров)
Начальная стадия развития/фронтальная часть	5–8	20–30	7–25
Стадия зрелости/фронтальная часть	2–8	10–35	7–60 (для ^{210}Po) 7–25 (для других трассеров)
Стадия зрелости/область максимальной отражаемости	5–8	20–30	7–25
Стадия диссипации/тыл области максимальной отражаемости	2–5	10–20	20–25

Примечание. * после обнаружения первых капель с трассером он присутствовал в течение всего времени выпадения дождя.

Дополнительные эксперименты с угленом

Всего с использованием углена было проведено 5 экспериментов. В одном из них углен был сброшен с самолёта на высоте 3,5 км (на километр ниже верхней границы) и в пятистах метрах перед облачной ячейкой по направлению её смещения. Сброс углена с самолёта осуществлялся через отверстие дозатора, который в штатном режиме используется для засева облаков углекислотой. Для того, что бы обеспечить компактность трассера в точке сброса примерно 100 г углена были смешаны с гранулами углекислоты и подморожены небольшим количеством воды. Из-за быстрого испарения гранул углекислоты такая компактная масса была достаточно рыхлой и после сброса с самолёта должна была быстро освободить углен для свободного падения. Место сброса углена было определено радиолокатром МРЛ-5. Он же учитывал положение и состояние экспериментальной облачной ячейки. Контроль за местом нахождения самолёта в момент сброса трассера осуществлялся с помощью аэродромного радиолокатора. Дальнейшие наблюдения за эволюцией радиоэхо от углена и облака в данном эксперименте выполнял радиолокатор МРЛ-5. На радиолокаторе облачная ячейка просматривалась при отражаемости менее 30 dBZ. Высота её радиоэхо составляла 4,5 км. Радиоэхо углена по данным горизонтальных и вертикальных сечений (при отражаемости 30 dBZ) постепенно увеличивалось по объёму, главным образом за счёт горизонтального распространения. Радиоэхо хорошо просматривалось радиолокатором в течение 12 минут. Весь этот период оно смещалось перед облачной ячейкой. Его нижняя граница опускалась, отражаемость превысила 30 dBZ. Облачная ячейка в этот период выросла по высоте на 500 м, её отражаемость достигла 40 dBZ. Из ячейки начался дождь. Дальнейшее наблюдение за радиоэхо углена стало не возможным, так как оно смешалось с радиоэхо вновь возникших ячеек. Аналогичная картина в подобных экспериментах была получена в исследованиях Бибилашвили. Он с помощью артиллерийских снарядов вводил металлизированные диполи в свободную атмосферу перед облачной ячейкой на уровень близкий к уровню верхней границы её радиоэхо (Бибилашвили и др., 1981). Диполи длительное время смещались параллельным курсом с ячейкой, но в неё не втягивались. Эти эксперименты показывают, что развивающиеся облачные ячейки на уровне своей верхней границы не втягивают воздух из околооблачной среды, а следовательно введение в эту область реагентов при проведении работ по увеличению осадков и предотвращению роста града бессмысленно.

Все остальные эксперименты с угленом были выполнены с использованием ракет «Алазань-2м» и «Кристал». Углен вводился внутрь слабых, развивающихся облачных ячеек, отражаемость которых в момент введения трассера не превышала 30dBZ. Радиоэхо углена выделялось с помощью поляризационных характеристик сигнала

(Шупяцкий, 1959). За эволюцией радиоэхо облачной ячейки наблюдали радиолокаторы МРЛ-5 в аэропорту Кишинёва и поляриметр в Григориопольском отряде. По данным поляримерта величина деполяризации сигнала от углена находилась в пределах $\Delta P \approx -12...-8$ dB, в то время как в остальной части облака она была –15..–17 dB. В начальный момент радиоэхо углена представляло собой компактное образование в виде небольшого пятна. Очень быстро это пятно распространялось во все стороны ячейки, в том числе его нижняя граница опускалась. Через 5–6 мин радиоэхо облака увеличивалось и существенно превышало радиоэхо углена. Вклад облачных капель, по сравнению с угленом, в формирование деполяризационной компоненты сигнала существенно увеличивался и погрешность идентификации трассера становилась очень большой. Дальнейшие наблюдения за поведением углена становились бессмысленными. Однако этих 5 – 6 минут наблюдений, с нашей точки зрения, достаточно, что бы сделать следующий вывод. Вводимый в ячейку (на стадии зарождения и развития) трассер (льдообразующий реагент) быстро распространяется по всему её объёму и учавствует в осадкообразвательном процессе. Это соответствует результатам экспериментов с другими трассерами в облачных ячейках на стадии их развития.

Выводы

В многочисленных экспериментах, перечисленных в табл. 3 и более детально проиллюстрированных примерами, были отмечены характерные величины и особенности распространения трассеров в различных ситуациях. Многофакторность процессов распространения трассеров и формирования осадков затрудняет выявление причин, приводящих к отмеченным особенностям. Тем не менее, следующие выводы представляются достаточно обоснованными:

– При внесении трассера в любую точечную область ячейки на стадии ее диссипации максимальная плотность вымывания трассера отмечается под эпицентром его введения, а ареал распространения занимает площадь меньше чем площадь выпавшего из этой ячейки дождя. Скорость распространения трассера по горизонтали от 7 до 22 м/с. Она несколько выше в направлении смещения облачной ячейки. При одновременном использовании в качестве трассера дейтерия и ^{210}Po последний обнаруживается в точках измерения значительно раньше. Обнаружена зависимость содержания этих трассеров от размера капель дождя. Чем больше размер капель, тем большее содержание в них трассера.

– При внесении трассера в любую точечную область ячейки на стадии ее зарождения и развития ареал ее распространения охватывает всю площадь дождя за весь период жизни ячейки. Концентрация трассера в различных точках измерительного полигона тем больше, чем больше количество выпавших в них осадков. Однако прямой пропорциональной связи у этой зависимости нет.

– Наибольшие скорости переноса трассеров всех типов наблюдаются в стороне противоположной направлению смещения облачной ячейки и могут достигать высоких значений. Так для ^{210}Po наблюдались скорости более 60 м/с. В других направлениях эти скорости достигали 25 м/с. Для надёжного установления, являются ли наблюдённые факты такого рода действительно результатом переноса трассеров, или это артефакт, связанный с неточным определением времени и места введения трассеров, желательно проведение дополнительных специальных исследований.

– При внесении трассера в центр и тыл зрелой облачной ячейки (область максимальной радиолокационной отражаемости не развивающейся ячейки), расположенной выше нулевой изотермы ареал его вымывания занимает относительно небольшую площадь с максимальной концентрацией под зоной его введения. Причем, тяжелая вода вымывается значительно быстрее чем ^{210}Po и поле ее распространения значительно меньше.

Здесь следует заметить, что были отдельные эксперименты, в которых трассер введённый в тыл зрелой ячейки на высоте выше нулевой изотермы обнаруживался в осадках выпавших далеко впереди по направлению перемещения и развития облачной ячейки. Вероятно это свидетельствует о том, что в ряде случаев в тылу зрелой ячейки есть поток, обтекающий её, как твёрдое тело и учавствующий в процессе осадкоообразования.

– При внесении трассера во фронтальную часть развивающейся ячейки максимальная ее концентрация в дожде отмечается не под эпицентром его введения, а впереди по ходу перемещения и развития ячейки.

– При внесении трассера на стадии зарождения и развития ячейки он (льдообра-

зующий реагент) быстро распространяется по всему её объёму и учувствует в осадкообразвательном процессе.

– Использование трассеров косвенно подтвердило эффективность применяющихся в активных воздействиях на осадкообразующие процессы льдообразующих реагентов и методики их применения.

– Скорость вымывания трассера зависит не только от стадии развития ячейки, но и от его собственных свойств и в первую очередь от гигроскопичности и растворимости (см. табл. 4, 5). Из табл. 4 видно, что очень быстро вымываются тяжелая вода, йодистый свинец, иодистое серебро и полоний. Хром и никель дождевыми каплями вымываются в 4–5 раз медленнее. Это позволяет думать, что перечисленные быстро вымывающиеся трассеры взаимодействуют с облачной влагой и непосредственно участвуют в процессе образования и роста капель.

– Как показали наземные измерения трассеры регистрируются только в осадках, выпавших из ячеек, в которые они вводились. Перенос их в другие ячейки одной и той же облачной системы не отмечался.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность всем участникам многолетних экспериментов, в том числе научным сотрудникам и специалистам Военизированной Службы по активным воздействиям Молдавии и института Физики АН Литвы.

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, Болеслав Иосифович Стыро, Саломон Моисеевич Шметер.

Основная терминология и обозначения

– Облачная ячейка – экспериментальная единица исследования. Под облачной ячейкой понимается активная часть конвективного облака с наиболее развитыми восходящими (нисходящими) потоками, обуславливающими его развитие (разрушение) и сосредоточение крупных частиц облаков и осадков, благодаря чему она, как правило, обнаруживается метеорологическим радиолокатором. Данный термин соответствует принятому Госкомгидрометом СССР термину конвективная ячейка (ОСТ 52.11.25–86).

– Z – радиолокационная отражаемость. Величина Z определяется концентрацией и распределением частиц по размерам в единичном объёме ($Z = \sum ND^6$) и измеряется в см^6/м^3 или мм^6/м^3 или см^3. Диапозон отражаемости Z в облаках очень велик (от 10^{-5} до 10^7 мм^6/м^3). Поэтому для удобства обычно пользуются децибеллами. Так например, $Z = 10^{3,5}$ мм^6/м^3 записывается как 35 *dBZ*.

– $H_{ВГ}$ – высота (в км) верхней границы ячейки.

– $H_{Zмакс.}$ – высота (в км) максимума радиолокационой отражаемости.

– $T_{ВГ}$, °C – значение температуры на уровне $H_{ВГ}$.

– $T_{Hzмакс}$, °C – температура на уровне H_{Zmax}.

– h_-/h_+ отношение вертикальной мощности переохлаждённой (выше изотермы 0 °C) части ячейки к тёплой (ниже этой изотермы).

– эпицентр введения трассера – точечная ($R \approx 10$ м) область взрыва головной части ракеты, содержащей трассер.

– Бк (Bq) – единица радиоактивного распада (Беккерель). Она показывает сколько распадов происходит за 1 с.

– Бк/л (Bq/l), г/л – объемная концентрация соответственно трассера в дождевой воде или в воздухе.

– Бк/м^2 (Bq/m^2), г/м^2 – плотность выпадения трассера – количество трассера в соответствующих единицах на квадратный метр.

– σ (с$^{-1}$) – константа вымывания трассера облачными каплями. Обратная величина σ^{-1} есть характерное время вымывания, за которое трассер поглащается облачными каплями.

Список литературы

1. Руководство по применению радиолокаторов МРЛ–4, МРЛ–5 и МРЛ–6 в системе градозащиты / М. Абшаев, И. Бурцев, С. Ваксенбург, Г. Шевела. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 230 с.

2. Атлас Д. Успехи радарной метеорологии: пер. с англ.; под ред. К. Шафрина. – Л.: Гидрометеоиздат, 1967. – 194 с.

3. Бурцев И.И. Новый метод воздействия на градовые процессы // Метеорология и гидрология. – 1990. – № 4. – С. 29–41.

4. Бибилашвили Н.Ш., Евстратов В.В., Ковальчук А.Н. Радиолокационные исследования структуры воздушных потоков в зоне кучево дождевых облаков с помощью дипольных отражателей // Труды Пятого всесоюзного совещания по радиометеорологии. – 1981. – С. 28–32.

5. Бибилашвили Н., Бурцев И., Серёгин Ю. Руководство по организации и проведению противоградовых работ. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 168 с.

6. Боровиков А.М., Гайворонский И.И., Зак Е.Г., Костарев В.В., Мазин И.П., Минервин В. Е., Хргиан А.Х., Шметер С.М. Физика облаков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1961. – 459 с.

7. Гайворонский И.И., Серёгин Ю.А. К вопросу о введении реагентов в облака при воздействии на градовые процессы // Тр. ЦАО. – 1965. – Вып. 65.

8. Громова Т.Н., Красиков П.Н. Исследования льдообразующих свойств растворов йодистого серебра и йодистого свинца // Тр. ГГО. – 1965. – Вып. 176.

9. Громова Т.Н., Диневич Л.А., Никандров В.Я., Свешников Г.В., Торопова Н.В., Унгерман Т.М., Шишкин Н.С. Исследования содержания иода в атмосферных осадках в районе проведения противоградовых работ и анализ нескольких случаев воздействия с целью градозащиты // Вестник Ленинградского гос. университета. – 1980. – № 12. – Вып. 2. – С. 42–47.

10. Деннис А. Изменение погоды засевом облаков. – М.: Мир, 1983. – 271 с.

11. Диневич Л. Некоторые особенности структуры и эволюции градовых кучево дождевых облаков // Метеорология и гидрология. – 1981. – Nr. 9. – С. 41–49.

12. Диневич Л.А., Старостин А.Н., Лившиц Е.М., Швецов В.С., Шилин В.С. Эволюция полей радиоэха кучево – дождевых облаков и прикладные вопросы технологии воздействия // Физика образования градовых процессов и активных воздействий на них: сб. материалы Всесоюзного семинара (Нальчик, 15-17 октября 1985г) . – М.: Гидрометиздат, 1986. – С. 123–129.

13. Диневич Л., Диневич С., Кудлаев Э., Леонов М. Физико-статистические исследования влияния противоградового засева кучево-дождевых облаков на режим осадков // Обозрение прикладной и промышленной математики. Серия Вероятность и статистика. – М.: Научное издательство ТВП, 1995. – Т. 2. – Вып. 2. – С. 253. – 286.

14. Плауде Н.О., Соловьёв А.Д. Льдообразующие аэрозоли для воздействия на облака // Обзорная информация. – Обнинск, 1979. – Вып. 5. – 80 с.

15. Иванов А.А., Мельничук Ю.В., Моргоев А.К., Понамарёва Г.Ф. Исследование скоростей воздушных движений в мощных кучевых облаках с помощью доплеровских радиолокаторов. Труды Пятого Всезоюзного совещания по радиометеорологии. – М.: Гидрометеоиздат, 1981. – С. 24–28.

16. Имянитов И.М. К вопросу об электризации и проводимости грозовых облаков // ДАН СССР. – 1956. – Т. 109. – № 1. – С. 77–83.

17. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978. – 455 с.

18. Лукшене Б.И., Шалавеюс С.С., Алишаускас Ю.Ю. Приборы для радиохимических анализов // Физика атмосферы 12. – Вильнюс: Мокслас, 1988. – С. 138–142.

19. Мазин И.П., Шметер С.М. Облака. Строение и физика образования. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 279 с.

20. Мейсон Б.Дж. Физика облаков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1961. – 542 с.

21. Мучник В.М. Физика грозы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – С. 156. – 158.

22. Никорич В.А., Никорич Т.Д., Потапов Е.И., Шалавеюс С.С. Исследование особенностей вымывания свинца, йода и ^{210}Po из конвективных облаков // Физика атмосферы. – Вильнюс: Мокслас, 1989. – С. 15. – 22.

23. Сулаквелидзе Г.К., 1967. Ливневые осадки и град. Ленинград. Гидрометеоиздат. с. 41

24. Степаненко В.Д., 1973. Радиолокация в метеорологии. Ленинград. Гидрометеоиздат, с. 60.

25. Степаненко В.Д., Гальперин С.М. Радиотехнические методы исследования гроз. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – С. 6–7, 62–66.

26. Шопаускас К.К., Стыро Б.И., Вебра Э.Ю., Вебрене Б.К., Шалавеюс С.С., Шопаускене Д.А., 1968. О вымывании искусственно введенных в облако радиоактивных изотопов по данным наземных станций наблюдения // Исследование процессов самоочищения атмосферы от радиоактивных изотопов. – Вильнюс: Минтис. – С. 323–332.

27. О методике изучения распространения пассивной примеси в облаках с помощью радиоактивных изотопов / С. Шалавеюс, И. Гайворонский, Б. Стыро, Е. Вебра, В. Вебрене, Г. Воронов, Б. Лесков, Ю. Серёгин, Ю. Сумин, Д. Шопаскене // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1968. – Т.4, № 7. – С. 792–796.

28. Шалавеюс С., Кеките В. Концентрация свинца в осадках после активного воздействия PbJ_2 на кучево-дождевые облака. Физика атмосферы, 3. Радиоактивность атмосферы и гидросферы. Радиоактивные трассеры. – Вильнюс: Москлас, 1977. – С. 77–85.

29. К вопросу о распространении примеси в конвективных облаках / С. Шалавеюс, В. Стыро, В. Вебрене, Н. Шпирскаускайте, Л. Моркелунас, К. Стелингис, Д. Буткус, В. Лукшене, Л. Диневич, Е. Потапов. Физика атмосферы, 3. Радиоактивность атмосферы и гидросферы. Радиоактивные трассеры. – Вильнюс: Москлас, 1977. – С. 27–77.

30. Шалавеюс С.С., Вебрене Б.К. О дисперсности жидкого трассера, вводимого взрывом в атмосферу // Физика атмосферы, 6. Распространение примеси в окружающей среде. – Вильнюс: Мокслас, 1980. – С. 174–178.

31. Шалавеюс С., Лескаускас Р., Вебрене В. Методика проведения экспериментов по изучению конвективных облаков при помощи химических трассеров. Физика атмосферы, 8. Примеси в атмосфере и их применение в качестве трассеров. – Вильнюс: Мокслас, 1983. – С. 52–55.

32. Шалавеюс С., Лескаускас Р. О методике определения эффективности выделения изотопов из проб осадков. Физика атмосферы, 8. Примеси в атмосфере и их применение в качестве трассеров. – Вильнюс: Москлас, 1983. – С. 56–60.

33. Шалавеюс С.С., Кранкалис Р.Г. 1984. О распространении с каплями искусственно введенного ^{210}Po в кучево-дождевых облаках// Физика атмосферы 9. Локальные и глобальные примеси в атмосфере. Вильнюс: Мокслас, с.81-86.

34. Шалавеюс С.С., Кранкалис Р.Г. Некоторые закономерности распределения искусственной радиоактивности в дождевых каплях // Физика атмосферы 9. Локальные и глобальные примеси в атмосфере. – Вильнюс: Мокслас, 1984. – С. 86–91.

35. Пространственно-временное изменение интенсивности выпадений и концентраций в осадках трассерного индия в натурных экспериментах 1983 года / С. Шалавеюс, Л. Савицкас, Л. Диневич, С. Гренда, В. Масевич, Р. Кранкалис. Физика атмосферы, 12. Примеси в окружающей среде. – Вильнюс: Москлас, 988. – С. 53–62.

36. Шалавеюс С., Лужанене Г., Лужанас В. Исследование концентрации и форм серебра в воде осадков после активных воздействий. Физика атмосферы, 12. Примеси в окружающей среде. – Вильнюс: Москлас, 1988. – С. 145–150.

37. Шметер С.М. Физика конвективных облаков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 216 с.

38. Шметер С.М. Особенности механизма вовлечения в кучевые облака // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1977. – Т. 13, № 12. – С. 1239–1247.

39. Шметер С.М. Термодинамика и физика конвективных облаков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987. –287 с.

40. Шметер Облака и облачная атмосфера. Справочник; под ред. И. Мазина, А. Хргиана. Глава 6. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – С. 264–275.

41. Шупяцкий А.Б. Радиолокационное рассеяние несферическими частицами // Тр. ЦАО. – 1959. – Вып. 30. – С. 39–52.

42. Shalavëjus S. On peculiarities of distribution of tracers in cloud systems // Atmospheric Physics. 16. – 1994. – Vilnius, P. 75–78.

43. Shalavejus S., Dinevich L. Changes of trace indium concentrations in precipitation during a large – scale experiment // Atmospheric Physics. – 1995. – № 1. Vilnius 17. – P. 13–18.

44. Shalavëjus S. Investigation of flows in clouds using ^{210}Po and D_2O as tracers // Atmospheric Physics. – 1996. – № 1, Vilnius18. – P. 29–33.