

**Б.Д. Белан**

## **САМОЛЕТНОЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ**

Статья является продолжением ранее опубликованных работ по анализу самолетов-лабораторий для контроля окружающей среды и посвящена описанию методик их применения как единого комплекса, начиная от трансграничного переноса и заканчивая локальным контролем. Приводятся примеры использования самолета-лаборатории Ан-30 «Оптик-Э» для зондирования воздуха на региональном и городском масштабах, обобщение их по территории бывшего СССР, а также данные по выбросам отдельных крупных источников. Сделан вывод о наиболее эффективном применении самолетов-лабораторий путем организации регионального мониторинга с включением элементов контроля трансграничного и локального уровня.

В предыдущих работах [1, 2] были рассмотрены приборные комплексы самолетов-лабораторий (СМЛ), которые использовались для измерения качества воздуха в различных физико-географических регионах, включая и районы, подверженные влиянию антропогенной деятельности. В настоящей статье рассматривается использование самолета-лаборатории как единого целого для экологического контроля состояния воздушного бассейна.

На первый взгляд, было бы логичным предположить, что усложнение экологической обстановки во многих странах должно привести к интенсивному использованию самолетов-лабораторий для определения пространственно-временного распределения и динамики загрязнений, учитывая тот набор преимуществ, который дает самолетный метод [2]. Однако в научной литературе имеется небольшое количество публикаций по использованию самолетов-лабораторий для экологического контроля воздушного бассейна загрязненных районов.

Одно из наиболее полных экологических обследований территорий с привлечением самолетов-лабораторий выполнено Агентством по охране окружающей среды США и Министерством охраны атмосферного воздуха Канады [3]. В ходе эксперимента была проведена инвентаризация выбросов от точечных и л распределенных источников загрязнения атмосферы в регионе, включающем южную часть провинций Онтарио и Манитоба, юго-восточную часть провинции Саскачеван и восточные штаты США. Для осуществления эксперимента использовались самолеты-лаборатории NCAR и NASA [2].

В 1983 году комиссия ЕЭС и Министерство окружающей среды Франции провели исследование загрязнения воздуха в регионе Фос-де-Бер, во время которого использовался арендованный самолет с лидаром на борту [4].

Доработка первой в СССР системы автоматизированного контроля загазованности воздуха ТЭЦ проводилась на Запорожской ГРЭС, предварительно был выполнен полный цикл обследования ее промышленной зоны. Характеристики атмосферы в слое от нуля до 300 м измерялись с помощью датчиков, установленных на мачте. Выше 300 м – с помощью самолетов и вертолетов [5].

В [6] сообщалось о проведении эксперимента по отслеживанию искусственно созданных газовых облаков с целью исследования особенностей их диффузии. Для измерений использовался СМЛ Cessna-206 [2].

Весьма успешные эксперименты по выявлению распределения некоторых загрязняющих веществ были выполнены в районе г. Мюнхена с помощью СМЛ Falcon-E [7, 8].

В [9, 10] приводятся сведения о зондировании вертикального распределения загрязнений воздуха в районе Японских островов на самолетах-лабораториях Cessna-404 и B-737.

Общим и основным недостатком перечисленных экспериментов являлось отсутствие научно обоснованных методик проведения полетов в ходе зондирования загрязнений воздуха, а также их некомплексность. Планирование полетов осуществлялось на уровне интуиции исследователей.

Исключением из этого вывода являются методы определения трансграничного переноса примесей с помощью самолета-лаборатории, подробно разработанные в ИПГ им. академика Е.К. Федорова [11].

### Трансграничный перенос загрязнений

Изучение дальнего переноса примесей выполнялось в соответствии с Конвенцией о трансграничном загрязнении воздуха [12]. По обязательствам бывшего СССР в ИПГ был создан самолет-лаборатория, который проводил в течение года периодические измерения по стационарным маршрутам, расположенным вдоль западной границы государства, Длина маршрутов составляла 100–150 км и была выбрана исходя из требований модели, по которой рассчитываются потоки. Зондирование атмосферы проводилось до высоты 2,5–5 км через интервалы 300–600 м.

Для расчета трансграничных потоков загрязнений использовалась методика, основанная на предположении, что на протяженном участке границы длиной  $L_j$  существуют относительно однородные условия переноса [13]. Тогда для перенесенного за время  $t$  количества вещества можно записать

$$Q_{ij} = P_{ij} L_j \Pi_{ij} t,$$

где поток вещества через единичный отрезок границы определяется выражением

$$\Pi = \frac{1}{J} \int_0^J \int_0^h C(x, y) U(y) \cos \alpha \, dy \, dx = \sum \bar{C}(y_i) U(y_i) \cos \alpha_i \Delta y_i.$$

Здесь  $J$  – длина маршрута, проходящего параллельно границе или вблизи нее;  $h$  – верхняя граница слоя переноса;  $C(x, y)$  – концентрация вещества;  $\bar{C}(y_i)$  – средняя концентрация на высоте  $y_i \pm \Delta y_i / 2$ ;  $U(y)$  – скорость ветра;  $\alpha = \alpha_i$  – угол между направлением ветра и нормалью к границе; индекс  $i$  характеризует направление переноса (например,  $i = 1$  – перенос внутрь и  $i = 2$  – перенос наружу);  $P_{ij}$  – вероятность переноса в данном направлении;  $\Pi_{ij}$  – среднее значение потока через единичный отрезок границы.

Для суммарных потоков можно записать

$$Q_{1j} = Q_j^B + d_{1j} Q_j^{B.T} + Q_{ij}^{ест};$$

$$Q_{2j} = d_{2j} Q_j^B + Q_j^{B.T} + d_{2j} Q_{ij}^{ест},$$

где  $Q_j^B$ ,  $Q_j^{B.T}$ ,  $Q_{ij}^{ест}$  – потоки, определяемые выбросами вне границы, внутри территории и от естественных источников соответственно;  $d_{ij}$  – доли потоков, которые в результате циркуляции атмосферы возвращаются обратно через границу:

$$Q_{1j}^{ест} = |Q_j^{ест}|^B + d_{1j} |Q_j^{ест}|^{B.T},$$

$$Q_{2j}^{ест} = |Q_j^{ест}|^{B.T} + d_{2j} |Q_j^{ест}|^B.$$

Для оценки загрязнения атмосферы должны быть известны значения  $Q_j^B$  и  $Q_j^{B.T}$ , а для оценки выпадений – балансовые значения потоков:

$$\Delta Q_j^B = Q_j^B - d_{2j} Q_j^B = Q_j^B (1 - d_{2j}),$$

$$\Delta Q_j^{B.T} = Q_j^{B.T} - d_{1j} Q_j^{B.T} = Q_j^{B.T} (1 - d_{1j}).$$

Перенос через всю границу находится суммированием величин  $Q_j^B, Q_j^{B.T}, \Delta Q_j^B, \Delta Q_j^{B.T}$  и  $Q_{ij}^{ect}$  при  $j = 1, \dots, n$ .

Для промежутка времени  $t = 1$  год полагают, что для всех участков границы  $P_{ij} = P_i, d_{ij} = d_i$ . Оценка величины  $P_i$  по данным о траекториях переноса и распределения ветра, выполненная в [13], показала, что  $P_1 \approx 0,63$  и  $P_2 \approx 0,37$  при погрешности не более 20%. Оценки значений  $d_0$  с помощью траекторного метода и по расчетам Восточно-европейского метеорологического синтезирующего центра (МСЦ-В) показали [12], что  $d_1 = 0,15$  и  $d_2 = 0,10$  при погрешности 25—30%.

В бывшей ГДР, наряду с изложенным выше оперативным, был разработан климатологический метод оценки потоков вредных веществ по эмпирическим данным [12]. При этом для оценки потоков не требуется знать эмиссию загрязняющих веществ и коэффициенты физико-химических превращений. Основой расчета массового расхода  $\Pi$  является уравнение

$$\Pi = \int_0^H C(z) U(z) dz,$$

где  $H$  — верхняя граница слоя, в котором распространяется примесь;  $C(z)$  — концентрация примеси на высоте  $z$ ;  $U(z)$  — горизонтальный вектор ветра на высоте  $z$ .

При расчетах предполагается, что все вредные вещества распространяются главным образом в слое атмосферы до высоты 1500 м; область распространения вредных веществ ограничивается максимальной высотой слоя перемешивания. Для определения  $U(z)$  используются данные аэрологического зондирования на высотах 300, 600, 900, 1200 и 1500 м.

Массовый расход рассчитывается отдельно для каждого 300-метрового слоя так, что общий суточный расход в слое распространения получается по уравнению

$$\Pi = 300 \int_1^H \bar{C}(\Delta z)_i \bar{U}(\Delta z)_i dz,$$

где  $i$  — номер слоя;  $\bar{C}(\Delta z)_i$  — средняя концентрация в  $i$ -м слое толщиной  $\Delta z$ ;  $\bar{U}(\Delta z)_i$  — средне-суточный вектор ветра в  $i$ -м слое.

В декартовой системе координат с осью  $X$ , направленной на восток, и осью  $Y$ , направленной на север, компоненты вектора ветра определяются по формулам

$$\bar{U}_{xi} = -\bar{U}_i \sin \varphi_i,$$

$$\bar{U}_{yi} = -\bar{U}_i \cos \varphi_i,$$

где  $\varphi_i$  — направление вектора ветра в  $i$ -м слое.

Компоненты массового потока в направлениях  $X$  и  $Y$  получаются в виде

$$\Pi_x = 300 \int_1^n \bar{C}_i \bar{V}_{xi} dz,$$

$$\Pi_y = 300 \int_1^n \bar{C}_i \bar{V}_{yi} dz.$$

Здесь при  $\Pi_x > 0$  — поток направлен на восток, при  $\Pi_y > 0$  — на север.

Общий массовый поток в слое распространения равен

$$\Pi = \sqrt{\Pi_x^2 + \Pi_y^2},$$

а среднее направление переноса общего потока массы

$$\varphi = \frac{3}{2} \pi - \operatorname{arctg} \frac{\Pi_y}{\Pi_x}.$$

Не будем останавливаться на результатах, полученных в ходе реализации описанных проектов. Они достаточно подробно изложены в литературе. Обратим внимание на новые аспекты постановки вопроса исследования трансграничного переноса загрязнений, возникшие после распада СССР. Для этого обратимся к карте среднего многолетнего распределения взвешенных веществ над территорией СССР, полученной в ИОА СО РАН с помощью СМЛ Ан-30 «Оптик-Э» [1], в период с 1981 по 1991 годы, представленной на рис. 1. Для ее построения использовались данные вертикального зондирования атмосферы, выполненные в разных географических районах. Осреднение концентрации проведено во времени. Вертикальный слой, охваченный измерениями, изменялся от 5 до 8 км. Однако осреднение выполнено для диапазона высот 0–3 км, где сосредоточена основная масса аэрозоля. Из обработки исключены профили, полученные в зонах влияния промышленных центров.

Из рис. 1 видно, что на рассматриваемой территории можно выделить несколько зон повышенного содержания взвешенных веществ, в слое перемешивания. Главная из них располагается над западными районами ЕТС и создается, учитывая западно-восточный перенос, сложением высоких фоновых концентраций аэрозоля, поступающего из Западной Европы и выбросов Днепропетровско-Донецкой промышленной зоны.

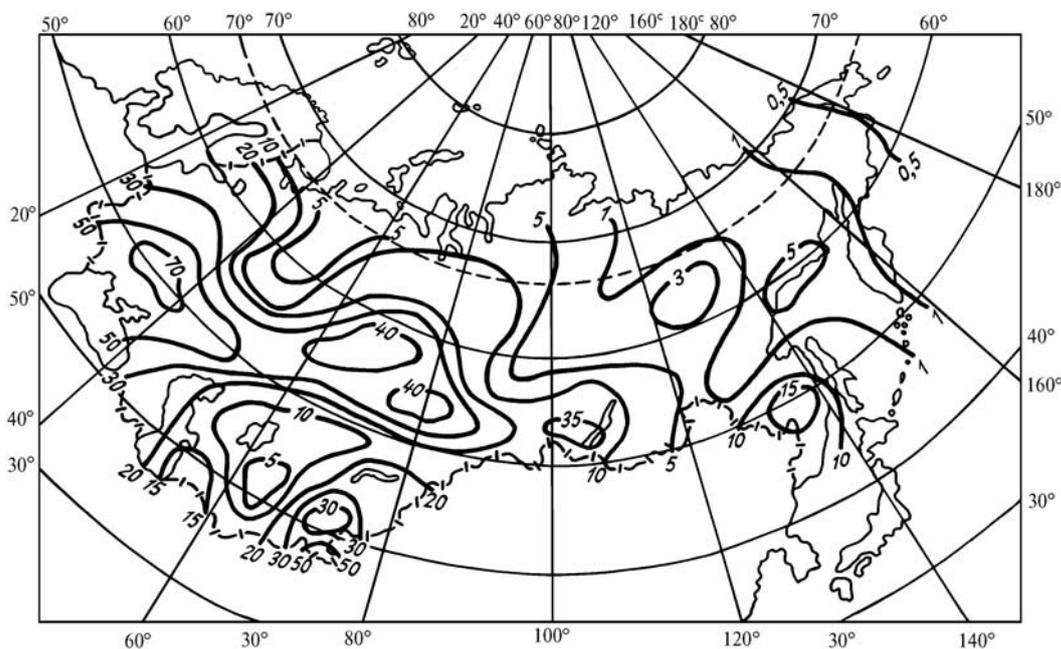


Рис. 1. Распределение счетной концентрации аэрозоля ( $\bar{N} = \frac{1}{H} \int_0^H N(h)_i dh$ ) над территорией бывшего СССР

Влияние этой зоны распространяется до южных районов Восточной Сибири. Правда, на него накладывает усиливающее действие Уральской промышленной зоны и промышленных объектов, расположенных в Северном Казахстане и на юге Западной Сибири, что выражается в появлении еще двух региональных областей повышенных концентраций аэрозоля. Немного меньшей интенсивностью отличаются фоновые концентрации взвешенных частиц в

зоне действия Иркутской промышленной зоны. Еще одна достаточно интенсивная область повышенной концентрации аэрозоля ( $N = 50 \text{ см}^{-3}$ ) выявляется над территорией Среднеазиатских республик. Ее появление можно объяснить застоём воздуха в долинах гор, где в основном и находятся промышленные предприятия.

Несмотря на то, что из обработки исключались все профили, измеренные в «шапках» промышленно развитых городов, рис. 1 демонстрирует, что антропогенная деятельность уже достигла такой интенсивности, что определяет региональный фон загрязнений.

### Региональный мониторинг загрязнений воздуха

Учитывая, что для загрязнений воздуха не существует государственных границ, на повестку дня встает проблема оценки количества примесей в атмосфере, обусловленных выбросами промышленных предприятий, находящихся на территориях государств бывшего СССР, а также получивших самостоятельность автономных краев и областей.

Решение поставленных проблем видится в организации регионального мониторинга над отдельными территориями, осуществляемого с помощью самолетов-лабораторий.

Возможную организацию проведения регионального мониторинга рассмотрим на примере территории Западной Сибири, включающей несколько областей. Когда идея необходимости реализации регионального мониторинга выкристаллизовалась, по инициативе академика В.Е. Зуева был разработан соответствующий проект, схема которого показана на рис. 2.

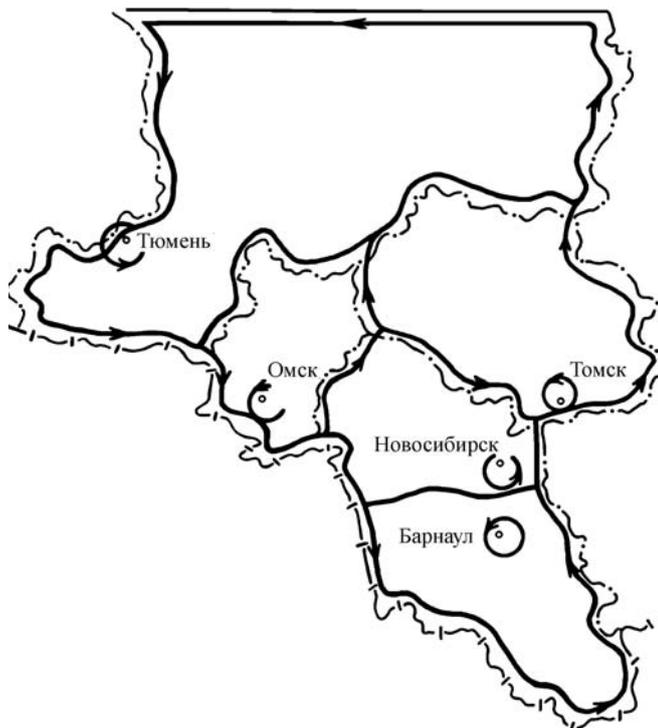


Рис. 2. Схема регионального мониторинга Западной Сибири (М 1:16000000): -.- - границы краев и областей; -/- государственная граница; → - маршруты полетов

Целью проекта является исследование закономерностей поступления и переноса примесей на территорию Западной Сибири, изучение распределения газового и аэрозольного состава загрязнений атмосферы.

В ходе его реализации в диапазоне высот 100–8000 м должны выполняться регулярные полеты вдоль границ контролируемой территории краев и областей, вокруг крупных промышленных центров. После выполнения полетов должны быть получены карты распределения загрязнений воздуха, исследованы перенос, трансформация и генерация примесей в пределах региона, выделен баланс веществ, оценены внутрорегиональные и межрегиональные балансы загрязнений, изучены основные направления переноса и ареалы распространения

примесей от крупных источников, определены соотношения «своих» и «чужих» примесей над рассматриваемой территорией.

Содержание и схема проекта были одобрены на Совещании руководителей природоохранных органов Сибири и Дальнего Востока (февраль 1991 г.). Предполагалось долевое его финансирование. Однако воплощение проекта отложено на неопределенное время из-за возникших финансовых проблем.

Тем не менее часть подобной работы выполнена. Она основывается на предыдущих исследованиях ИОА СО РАН и периодических полетах СМЛ Ан-30 «Оптик-Э», проведенных в 1991 году.

Полученное распределение взвешенных веществ над указанной территорией показано на рис. 3. Условия построения карты такие же, как и на рис. 1.

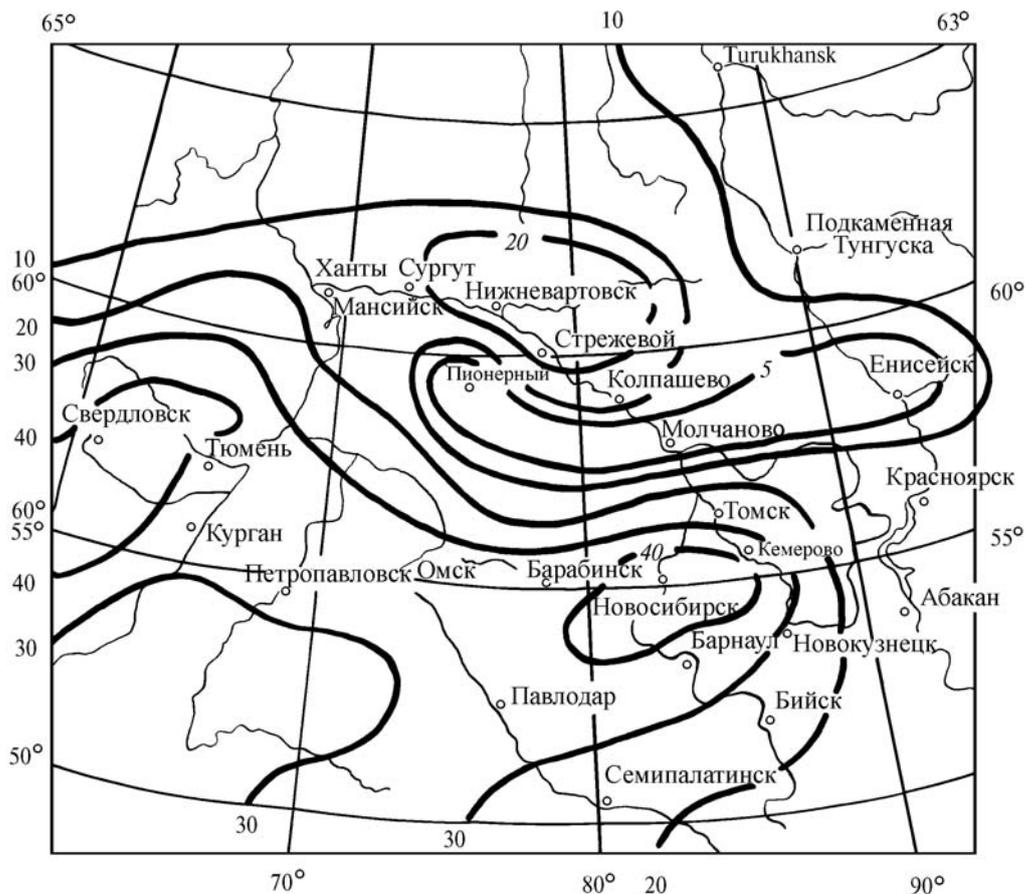


Рис. 3. Счетная концентрация аэрозоля ( $\bar{N} = \frac{1}{H} \int_0^H N(h)_i dh$ ) над Западной Сибирью

Из рис. 3 видно, что кроме отмеченных выше двух зон: Уральской и юга Западной Сибири, появляется еще одна в районе Нижневартовска – Стрежевого. Как показал анализ, она создается выбросами веществ при сгорании сопутствующих газов в факелах месторождений. Вместе с тем в центре Западно-Сибирской низменности имеется узкая зона относительно низких концентраций аэрозоля ( $N = 5 \text{ см}^{-3}$ ), которая является промежуточной между двумя источниками загрязнений, расположенными на севере и юге территории.

Приведенное на рис. 3 среднее распределение, на наш взгляд, еще раз подчеркивает необходимость организации регионального мониторинга данной территории. Если уж среднее фоновое поле аэрозоля выявляет климатически значимые особенности, то изменение циркуляции воздуха в различные сезоны должно приводить к распространению примесей из выделенных зон по любым направлениям, в том числе и по тем, где пока фон не является повышенным.

Уместен и другой вопрос, не являются ли высокие уровни загрязнения воздуха в г. Кемерово следствием того, что сюда поступает воздух с очень высоким фоновым содержанием примесей, на которые накладываются выбросы местных предприятий. Такой же вопрос, судя по рис. 3, можно задать администрации и других городов.

Неинициативности Западно-Сибирских административных органов можно противопоставить отношение к этой проблеме Совета министров Бурятии, который начал осуществлять региональный контроль своей и прилегающих территорий.

По его поручению ИОА СО РАН и Эколого-геохимическая партия ПГО «Бурятгеология» в 1991 году провели аэрозольно-газовую съемку оз. Байкал и Бурятии. Целью работы являлось определение регионального переноса примесей воздуха и оценка возможного загрязнения оз. Байкал через атмосферный канал. Схема полетов над данным регионом приведена на рис. 4. На каждом из маршрутов, как правило, выполнялось два полета на высотах 400 и 900 м над рельефом местности.

Результаты работы по схеме, изображенной на рис. 4, позволили ПГО «Бурятгеология» построить карты распределения более 50 примесей воздуха в масштабе 1:1000000. Из-за большого объема материала весь массив приводить не будем.

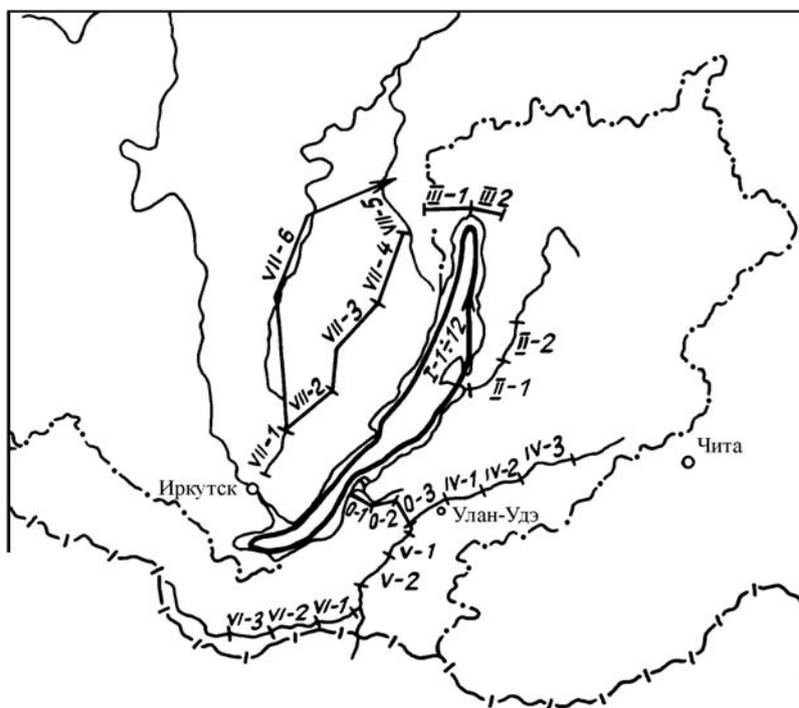


Рис. 4. Схема региональной съемки оз. Байкал и Бурятии: 1–12 – номера маршрута и участка соответственно

Для подтверждения важности регионального подхода и демонстрации отсутствия административных границ для распространения загрязнений, приведем карту распределения массовой концентрации аэрозоля в районе оз. Байкал (рис. 5).

Из рис. 5 видно, что на западной стороне оз. Байкал имеется обширная область повышенной концентрации взвешенных веществ. Это является следствием действия Иркутской промышленной зоны (см. рис. 1). Накоплению аэрозоля способствует задерживающее действие горного хребта, расположенного вдоль северо-западной части озера. Небольшие по масштабу области высоких концентраций аэрозоля на восточном берегу оз. Байкал обусловлены гидродинамическим концентрированием примеси в долинах рек Селенга и Баргузин, куда они загоняются западным переносом.

В ходе зондирования загрязнений над оз. Байкал выявилась еще одна особенность. Горные хребты вокруг озера расположены так, что поток загрязнений от Иркутской промышленной зоны может поступать только на его южную оконечность. Сравнение же концентраций на различных участках показало их соразмерность. Анализ такой ситуации позволил нам

обнаружить в котловине озера наличие замкнутой циркуляции воздуха вдоль его контура [14], которая и способствует распространению загрязнений.

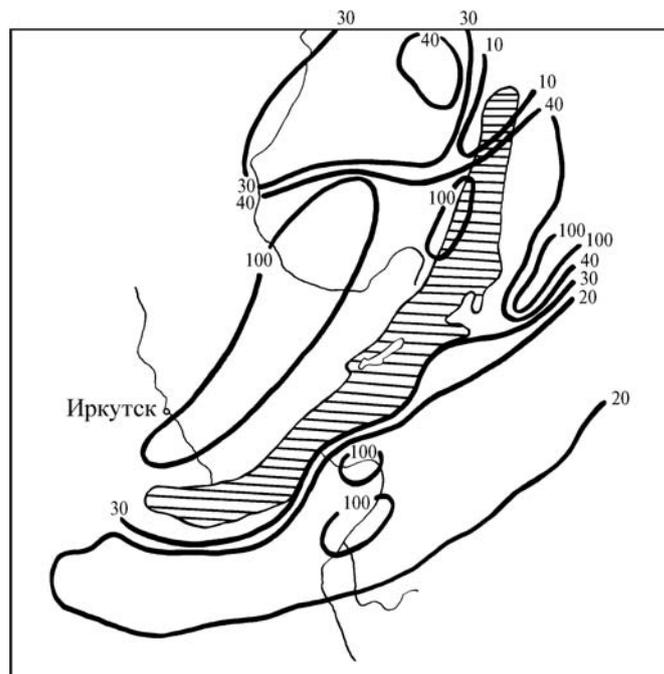


Рис. 5. Массовая концентрация аэрозоля (мкг/куб. м) на высотах 40–600 м над Байкальским регионом

Внутри масштаба 1:1000000 в этом же эксперименте была проведена съемка масштаба 1:200000 для большей детализации исследования. Она выполнялась над г. Улан-Удэ по 15 равноудаленным (шаг 7,5 км) маршрутам длиной 100 км. Выход на каждый маршрут выполнялся с помощью аэрофотосъемочного оборудования с погрешностью  $\pm 50$  метров.

По полученным данным строились карты, которые позволяли оценить на фоне регионального переноса вклад выбросов промышленных объектов г. Улан-Удэ.

Таким образом, если сопоставлять задачи трансграничного и регионального методов зондирования, то можно отметить, что региональный существенно более информативен, чем трансграничный, и позволяет исследовать не только перенос загрязнений, но и их распределение и динамику.

### Комплексное экологическое обследование городов

Самолеты-лаборатории использовались не только для трансграничного и регионального зондирования, проведения отдельных экспериментов, но и для контроля городских загрязнений [15–17]. Однако общепринятых схем и методик для городского мониторинга не разработано.

Поэтому при переходе к исследованию распределения и динамики городских загрязнений нам пришлось восполнить этот пробел. Были разработаны методики, позволяющие: определять баланс веществ, поступающих в город извне, выбрасываемых на его территории и выходящих из города; картировать распределение примесей над городом и по его территории (последнее делается с помощью наземного мобильного комплекса); измерять состав и рассчитывать объем выбросов отдельных крупных источников.

Для того чтобы определить баланс загрязнений в районе города, надо измерить среднюю их концентрацию по периметру на разных высотах, скорость и направление ветра. Балансовая оценка выполняется исходя из закона сохранения массы вещества в следующей форме:

$$B = \int_l \int_0^H C_i(l, h) U(l, h) \cos(\hat{U}, l) dl dh$$

или

$$B = \oint\oint_s C_i(s) V(s) \cos(\hat{U}, s) ds + \oint\oint_s \int_0^H Q_i ds dh,$$

где  $l$  – координата вдоль периметра города;  $h$  – текущая высота над поверхностью земли;  $s$  – элемент площади;  $C_i$  – концентрация исследуемой примеси;  $U$  – скорость ветра;  $\cos(\hat{U}, l)$  –  $\cos$  угла между вектором ветра и границей участка;  $\cos(\hat{U}, s)$  – то же, только между вектором ветра и элементом площади;  $Q_i$  – скорость образования  $i$ -й примеси на территории города. Вторая формула является предпочтительней, так как позволяет оценить баланс не только по горизонтали, но и по вертикали (осаждение или генерацию).

Этот вид экологического обследования города реализуется по следующей схеме (рис. 6, а). Сначала производится вертикальное зондирование атмосферы до максимальной высоты, как это показано в левой части рис. 6, а. Оно выполняется для определения температурной и ветровой стратификации, высоты слоя перемешивания, выделения особенностей в профилях загрязняющих веществ. Затем СМЛ переходит в режим горизонтального полета по квадрату или прямоугольнику, охватывающему весь город. Он выполняется по площадкам с интервалом высот 100 м от минимально возможной в данной местности до верхней границы слоя перемешивания. Одна площадка для контроля производится выше слоя перемешивания. Концентрация примесей у поверхности земли определяется с помощью мобильной станции.

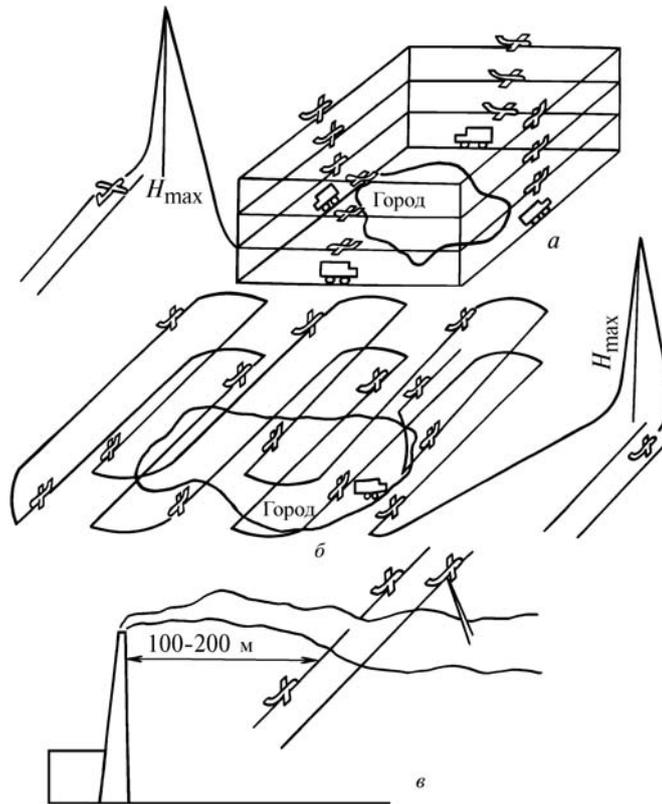


Рис. 6. Организация полетов при экологическом обследовании городов

Помимо концентрации загрязнений в ходе полета фиксируются метеорологические величины и навигационные характеристики. Независимо от масштабов города этот вид обследования должен быть завершен в течение одного дня при устойчивой погоде с постоянным по времени и по высоте направлением ветра. Расчет баланса ведется по любой из приведенных выше формул. Суммарная ошибка определения баланса в зависимости от выбранного

параметра, погодных условий, географических особенностей местности может изменяться от 35 до 60%.

Величины балансов загрязнений в районе некоторых городов СНГ показаны в табл. 1. Они показывают приращение массы загрязнений при прохождении воздушной массы через территорию города. Как правило, это сотни тысяч тонн в год. Исключение, составляет район г. Хабаровска, где получилась относительно малая величина. Объяснение этому факту дадим несколько позже.

Таблица 1

Баланс загрязнений (т/год) в городах

Город	Период	Баланс
Нижневартовск	зима	266357
	лето	189513
Павлодар+ Ермак	весна	1977140
Хабаровск	лето	5430
Усть-Каменогорск	весна	780767
Улан-Удэ	осень	79154

В связи с полным отсутствием описания подобных исследований прямое сопоставление полученных результатов с независимыми данными сделать невозможно. Однако в литературе имеются примеры измерения потоков загрязнений воздуха через вертикальную поверхность [15, 18]. Так как для данной методики это является одним из элементов расчета баланса, то такое сравнение, на наш взгляд, будет правомерным и корректным.

Из табл. 2 видно, что независимо от региона получаются вполне сопоставимые цифры. Это, с одной стороны, подтверждает корректность измерений потоков. С другой стороны, встает вопрос о величине значений самих балансов (табл. 1), так как таких цифр простым суммированием выбросов пока получить не удастся [19]. Возможно, сказываются особенности расчета: в одном случае расчет по технологиям и ограниченному количеству ингредиентов, в другом – прямые измерения в атмосфере по большему числу компонентов после их конденсации, трансформации и т.п. По-видимому, на этот вопрос могут ответить только специально поставленные эксперименты.

Таблица 2

Потоки массы загрязнений (кг/с · км) через единицу вертикальной плоскости

Компонент	Мегион	Нижневартовск	Самотлор	Нидерланды [18]	Мариуполь [15]
Оксид азота	42,8	98,1	20	44,7	–
Оксид углерода	100	–	–	60,6	–
Диоксид серы	1,7	15,8	9,7	64,9	–
Взвешенные вещества	1,4	2,5	5,1	13,1	16,4–31,1

Следующим видом работ при экологическом обследовании города является картирование распределения воздушных и приземных примесей. Воздушное картирование осуществляется с помощью самолета-лаборатории, приземное – с помощью мобильной станции. Схематически это изображено на рис. 6, б.

В начале работы, так же как и при оценке балансов, выполняется вертикальное зондирование для определения термодинамической стратификации и профилей примесей. На основании полученных вертикальных распределений выбираются высоты, для которых будут строиться горизонтальные разрезы (площадки). Эти критерии общеизвестны [20], поэтому заострять вопрос на них не будем. Отметим только, что высоты для картирования не задаются заранее, кроме минимальной, а определяются в ходе полета. Предварительно в этом виде зондирования выбираются направление и количество маршрутов, по которым будут проходить полеты СМЛ. Как правило, маршруты одинаково удалены друг от друга, что в последующем облегчает интерполяцию данных. В зависимости от размера города таких маршрутов на одной площадке может быть от 6 до 12. Сняв характеристики на одной высотной площадке, СМЛ переходит на следующую, и так по всем выбранным уровням. Число уровней изменяется от 3-х, при наличии низкой приземной инверсии, до 6-ти – в условиях летнего интенсивного перемешивания.

Данные, полученные в ходе этого вида зондирования, используются затем для построения карт распределения разных ингредиентов на каждом из прозондированных уровней. Сопоставление таких карт между собой позволяет составить картину объемного распределения загрязнений над городом, а их сравнение во времени – оценить динамику генерации и переноса примесей.

Ранее нами уже приводились примеры карт, которые демонстрировали особенности распределения загрязнений над разными городами [21, 22]. Кроме этого достоинства, более интересного специалистам по природоохране, у таких карт имеется еще одно, позволяющее, путем сопоставления различных характеристик воздуха найти объяснение тем или иным особенностям полученных распределений. В качестве подтверждения сказанному, приведем рис. 7, на котором проведено сопоставление распределения счетной концентрации аэрозоля над г. Хабаровском и траекторий воздушных потоков на том же уровне.

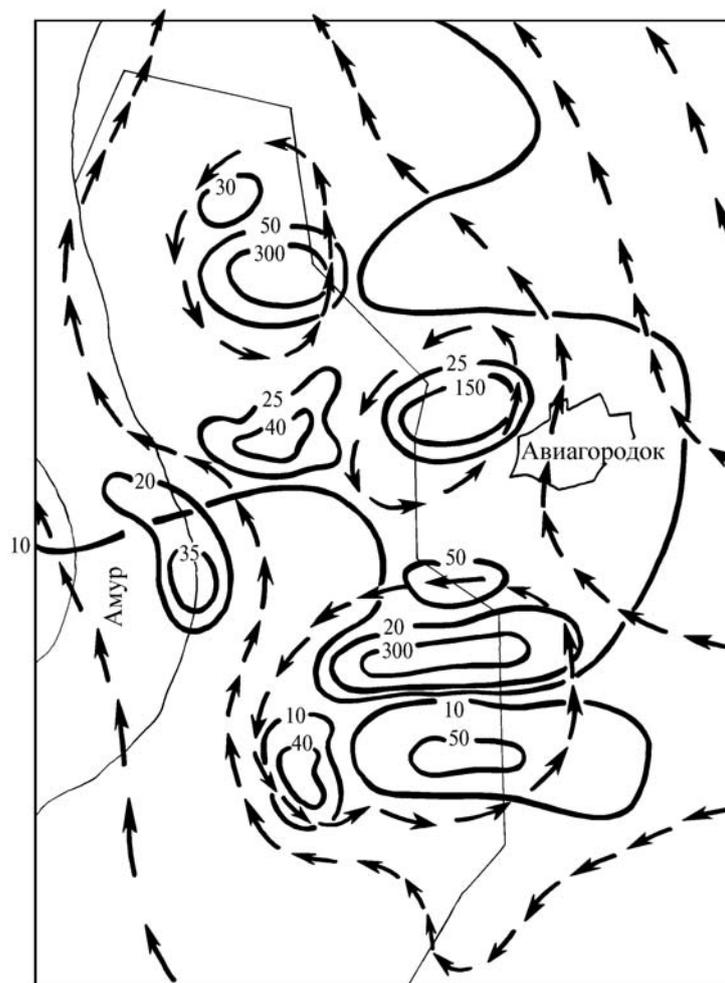


Рис. 7. Счетная концентрация (—) и линии тока (→) на высоте 400 м над г. Хабаровском в июне 1990 года

Из рис. 7 видно, что в поле ветра над городом возникают круговые циркуляции, которые приводят к концентрированию аэрозоля в них. Данным эффектом и можно объяснить маленькую величину баланса загрязнений в районе этого города, приведенную в табл. 1.

Схема зондирования, приведенная на рис. 6, б, преследует и еще одну цель, а именно, определение масштабов неоднородностей в пространственном распределении загрязнений над городом. Это необходимо при выборе шага сетки размещения пунктов наземного контроля системы воздушного мониторинга типа «Город». Обзор существующих методик выбора рационального шага сети наземных пунктов, а соответственно их количества имеется в [23]. Там же приведен анализ их достоинств и недостатков.

Одним из возможных путей решения данной задачи является расчет по корреляционным (структурным) функциям распределения загрязнений [24, 25]. Соглашаясь в целом с таким подходом, отметим, что в пределах города проведение расчета функций по приземным данным чревато большими ошибками из-за влияния локальных факторов. На наш взгляд, более оптимальным вариантом является расчет автокорреляционных функций по данным самолетного зондирования, проведенного над городом на высотах 100–200 м. Правомерность переноса результатов с высоты 100 м в приземный слой можно обосновать тем, что, по ранее полученным данным [26], масштабы неоднородностей загрязнения уменьшаются с высотой. Следовательно, при опускании вниз оценка шага сети не будет завышена.

Проведенные эксперименты над рядом промышленных центров (Хабаровск, Павлодар, Нижний Тагил, Нижневартовск и др.) показали, что шаг сети наземных пунктов, определяемый по такой методике, может изменяться от 0,8 км до 5 км. Важной особенностью такого подхода является то, что корреляционный радиус зависит от степени концентрирования организованных источников, уменьшаясь, где их много, и увеличиваясь, где они отсутствуют. Это позволяет уменьшить избыточность числа наземных пунктов, которая получается по теоретическому расчету [25].

Третьим видом зондирования при экологическом обследовании городов является определение характеристик выбросов из крупных источников их состава и объема. Обычно состав и объем выбросов рассчитываются на основании технологий или определяются путем забора проб из отводящих труб. При этом физико-химические изменения, которые могут произойти в составе аэрозоле-газовой смеси при ее переносе по выводящей трубе и выходе в атмосферу, остаются за пределами учета.

Надо отметить, что работ в шлейфах выбросов на самолетах-лабораториях выполнялось достаточно много. Но они, как правило, имели частный характер и сводились к определению одного или нескольких ингредиентов выбросов, либо их динамики в шлейфе (см., например, [15, 17, 27, 28]). Целостного представления о широкой гамме веществ и об объеме выбросов такие измерения не дают. Соответствующее оснащение самолета-лаборатории Ан-30 «Оптик-Э» [1] позволяет существенно расширить сведения о характеристиках выбросов.

Зондирование выбросов крупных предприятий выполнялось по схеме, изображенной на рис. 6, в, либо прямым забором проб воздуха при полете через шлейф, либо лазерным локатором при полете над шлейфом [29]. Отбор проб в шлейфах осуществлялся в непосредственной близости от труб на расстоянии 100–200 м от их среза. Высота и направление полета выдерживались так, чтобы СМЛ проходил через центр шлейфа, перпендикулярно ему. Экспозиция фильтров и контейнеров делалась только в шлейфе, остальные характеристики регистрировались непрерывно.

В качестве примера приведем табл. 3 и 4, в которых представлены аэрозольный и газовый состав выбросов некоторых объектов. Подробный анализ табл. 3 и 4 выходит за пределы настоящей статьи, так как относится больше к вопросам принятия природоохранных решений. Здесь только обратим внимание на широкую гамму веществ, выбрасываемых различными объектами в окружающую среду.

Метеорологические и навигационные параметры, регистрируемые синхронно СМЛ Ан-30 «Оптик-Э» [1], позволяют не только определять состав выбросов, но и рассчитывать их объем по каждому объекту.

Зная параметры шлейфа, скорость ветра на высоте пересечения и среднюю концентрацию примеси в его сечении, можно определить количество вещества, выбрасываемого в единицу времени:

$$Q = \int \int_s C_f(s) U(s) ds .$$

Суммарная погрешность определения объема выбросов по этой методике не превышает по оценкам 35%.

Не приводя данных по объемам выбросов различными объектами, укажем, что сравнение результатов полученных по данной методике, с расчетами по технологиям может изменяться от 0,95 до 10 раз. Это может происходить по трем причинам.

Во-первых, некорректность расчета по технологиям и невозможность прямой проверки данных расчета.

Во-вторых, нестационарность самих технологических процессов и соответственно, флуктуации интенсивности выбросов. Этот факт зафиксирован неоднократно при лазерном зондировании шлейфов [29 30]. Поэтому при разовых измерениях можно попасть на период максимума или минимума выброса и, естественно, зависить или занизить объем.

Т а б л и ц а 3

**Баланс загрязнений (т/год) в городах**

Компонент	Район						
	Самотлор		Ермак	Хабаровск		Камчатка оз. Байкал	
	Объект						
	шлейф нефтяной	шлейф газовый	ГРЭС	ТЭЦ-1	ТЭЦ-3	вулкан	шлейф Иркутска
pH	6,37	6,35	–	–	–	–	5,63
Na <sup>+</sup>	18,30	5,17	50,00	675,00	153,30	5,10	0,91
K <sup>+</sup>	<	<	11,70	820,00	316,70	0,83	0,03
Cl <sup>-</sup>	112,10	<	69,50	665,00	443,00	0,76	34,41
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<	<	225,00	<	346,60	15,20	1,20
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<	<	201,57	<	<	18,00	<
Hg <sup>2+</sup>		0,19	45,00	1,90	<	<	<
Zn <sup>2+</sup>	<	<	4,52	33,50	22,40	<	<
Cd <sup>2+</sup>	<	<	0,20	<	16,70	<	<
Br <sup>-</sup>	<	<	80,00	–	–	<	<
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<	<	30,00	40,00	6,90	<	<
As <sup>5+</sup>	<	<	53,30	46,80	51,30	<	<
Fe	4,38	6,12	520,00	580,00	200,00	19,50	12,23
Mn	0,04	0,003	10,00	3,20	2,50	0,46	0,12
Mg	4,25	<	23,30	110,00	51,70	2,60	0,14
Pb	0,14	0,07	0,27	<	<	<	<
Cr	0,10	<	50,20	8,25	2,70	0,16	20,34
Ni	0,41	0,03	9,00	2,82	16,00	0,50	1,1
Li	242,50	3,22	1100,00	460,00	620,00	9,05	1,10
Ti	12,00	5,32	80,00	8,50	<	3,50	0,09
Cu	0,28	2,13	8,10	14,00	4,50	0,08	0,32
V	0,03	<	1,00	6,00	1,00	0,10	0,01
Mo	<	<	<	1,00	5,80	<	0,52
Ca	13,75	3,54	255,00	1700,00	1016,70	38,90	0,83
Si	0,63	0,03	943,30	7100,00	1266,70	13,40	<!
Ba	1,56	<	<	<	<!	0,78	0,51
B	0,06	<	0,19	<	0,30	0,04	<
Co	<	<	0,06	<	<	0,20	0,02
Cd	<	<	170,00	78,00	16,70	<	<

П р и м е ч а н и е : < — ниже порога определения; – вещество не определялось.

Т а б л и ц а 4

**Газовый состав выбросов (мг/м<sup>3</sup>)**

Компонент	Район				
	Самотлор		Мегион	Хабаровск	
	Объект				
	шлейф нефтяной	шлейф газовый	котельная	ТЭЦ-1	ТЭЦ-3
Аммиак	1,9	0,2	<	0,2	0,2
Ацетилен	<	<	<	3,0	3,2
Бензин	31,0	2,22	12,4	—	—
Бензол	1,8	1,2	0,5	—	—
Ксилол	9,6	10,8	5,2	—	—
NO	1,2	1,3	0,1	6,0	7,2
NO <sub>2</sub>	0,08	0,2	0,08	0,3	0,1
CO	3,2	3,9	5,6	2,0	15,0
SO <sub>2</sub>	1,8	1,6	0,8	0,8	0,6
H <sub>2</sub> S	<	<	<	0,8	0,2
Cl <sub>2</sub>	<	<	<	0,1	0,5

П р и м е ч а н и е : < – ниже порога определения; – газ не определялся.

В-третьих, конденсация газов на выходе из трубы и переход их в аэрозоль, а также увлажнение и обводнение частиц должно приводить к присоединению дополнительной массы. Покажем это на примере трансформации распределения частиц аэрозоля по размерам, на разном удалении от среза трубы, приведенном на рис. 8. На начальном участке шлейфа, на удалении 2 км распределение частиц имеет вид кривой, помеченной 1. Пройдя 20 км, участвуя в перечисленных процессах, аэрозоль трансформируется в распределение, показанное кривой 2. Кривая 3, снятая на удалении 22 км, демонстрирует тот факт, что процессы укрупнения частиц продолжают.

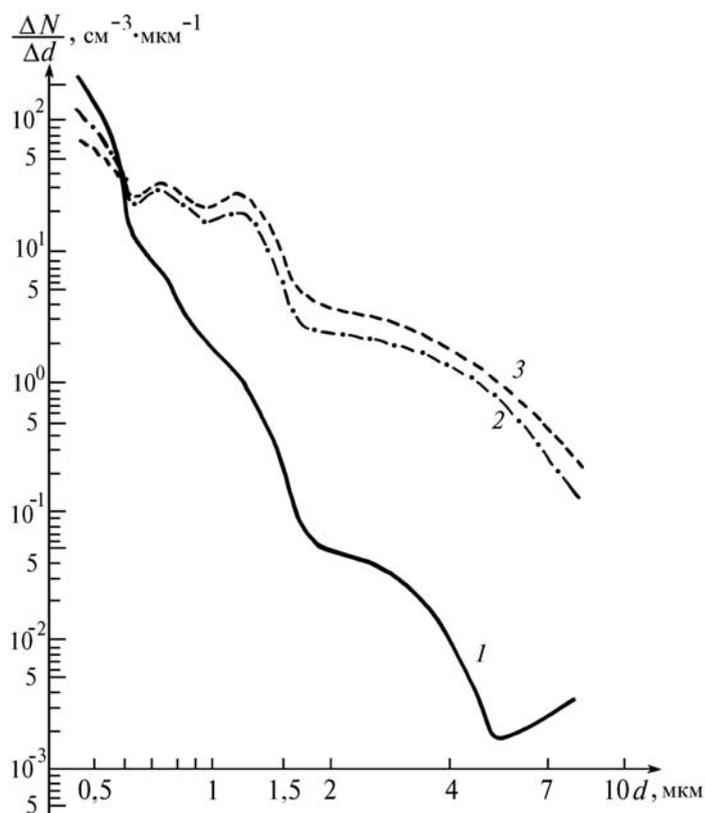


Рис. 8. Распределение частиц аэрозоля по размерам в шлейфе г. Амурска на расстоянии: 1–2 км; 2–20 км и 3–22 км от среза труб

Завершая этот раздел, отметим, что в ходе такого экологического обследования городов получается не только комплексное описание распределения загрязнений воздушного бассейна, но и составляется общая картина их динамики, как, например, для гг. Хабаровска и Комсомольска-на-Амуре, изложенная в [22]. Она позволяет разрабатывать технические требования к системе оперативного контроля воздушного бассейна именно данного города и вырабатывать предложения по природоохранным мероприятиям, которые могут осуществляться сразу же после проведения эксперимента.

### Заключение

Изложенные в настоящей статье методики применения самолетов-лабораторий для контроля состояния воздуха охватывают практически весь диапазон масштабов изменения полей загрязнений от глобального до локального. Приведенные результаты валидации этих методик показывают эффективность применения СМЛ на любом из масштабов. Однако полученный ранее опыт и изложенные здесь достоинства и недостатки самолетного метода экологического контроля убеждают в том, что наиболее оптимальным его применением будет организация регионального мониторинга, с включением элементов трансграничного и локально-

го контроля. При этом в данной статье не рассматривались еще вопросы о возможном применении СМЛ в аварийных ситуациях, где их привлечение не менее эффективно.

1. Зуев В.Е., Белан Б.Д., Кабанов Д.М. и др. //Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. № 10. С. 1012–1021.
2. Белан Б.Д. //Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 1. С. 5–32.
3. Muschett F.D. //Ann. Amer. Assoc. Geogr. 1981. V. 71. № 4. P. 552–565.
4. Despres A., Rancillac F. //Pollut. Atmosph. 1987. № 7–9. P. 226–236.
5. Волков Э.П. Контроль загазованности атмосферы выбросами ТЭС. М.: Энергоатомиздат, 1986. 256 с.
6. Blumenthal D.L., Ogren J.A., Anderson J.A. //Atmos. Environ. 1978. V. 12. P. 613–620.
7. Paffrath D., Peters W. //VI Congr. inond. qualite air. Paris. 1983. P. 133–136.
8. Paffrath D. //Remote Sens and Earth's Environ.: Some Pap. Present Alpbach Simp. School. Noordwijk, 1990. P. 43–49.
9. Тоуа Т., Кимура Ф., Мурауама Н. //J. Meteorol. Soc. Jap. 1986. V. 64. № 3. P. 431–442.
10. Tanaka M., Nakazawa T., Aoki S., Ohshima H. //Tellus, 1988. B40. № 1. P. 16–22.
11. Израэль Ю.А., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. и др. Мониторинг трансграничного переноса загрязняющих воздух веществ. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 303 с.
12. Назаров И., Фридман Ш. //Проблемы фоновго мониторинга состояния природной среды. 1988. № 6. С. 21–37.
13. Израэль Ю.А., Назаров И.М., Прессман А.Я. и др. Кислотные дожди. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 206 с.
14. Зуев В.Е., Антонович В.В., Белан Б.Д. //Доклады РАН. 1992. Т. 325. № 6. С. 1146–1150.
15. Дечук В.А., Раменский Л.А. //Труды УкрНИГМИ. 1991. Вып. 241. С. 3–10.
16. Rosier F.M., Paffrath D., Peters W. //Environ. Meteorol.: Proc. Int Simp. Wiezbung, 1988. P. 413–414.
17. Домбровская Э.П., Куклин А.М. //Атмосферноохранные проблемы Канско-Ачинского и Экибастузского топливно-энергетических комплексов. М.: Энергоатомиздат, 1989. С. 54–57.
18. Lelieveid J., Jansen F.W., Den Tonkelaar J.F. //Atmos. Environ. 1987. V. 21. № 10. P. 2133–2143.
19. Безуглая Э.Ю., Расторгуева Г.П., Смирнова И.В. Чем дышит промышленный город. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 256 с.
20. Владимиров А.М., Ляхин Ю.И., Матвеев Л.Т., Орлов В.Г. Охрана окружающей среды. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 424 с.
21. Зуев В.Е., Белан Б.Д., Заде Г.О. и др. //Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 6. С. 636–641.
22. Белан Б.Д., Микушев М.К., Панченко М.В. и др. //Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. № 9. С. 995–1005.
23. Ясенский А.Н., Боброва В.К., Зив А.Д., Красов В.И. //Труды ГГО. 1987. Вып. 492. С. 13–23.
24. Bower J.S. //Meas.-fContr. 1989. V. 22. № 5. P. 142–145.
25. Безуглая Э.Ю. Мониторинг состояния загрязнения атмосферы в городах. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 200 с.
26. Белан Б.Д., Гришин А.И., Матвиенко Г.Г., Самохвалов И.В. Пространственная изменчивость характеристик атмосферного аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1989. 152 с.
27. Болтнева Л.И., Брюханов П.А., Назаров И.М. и др. //Труды ИПГ. 1988. Вып. 71. С. 143–149.
28. Абрамовский Б. //Проблемы фоновго мониторинга состояния природной среды. 1986. Вып. 4. С. 181–193.
29. Белан Б.Д., Бурков В.В., Панченко М.В. и др. //Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. Лв 2. С. 186–192.
30. Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. и др. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. Новосибирск: Наука, 1986. 108 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
27 ноября 1992 г.

#### **B. D. Belan. Airborne Ecological Sounding of the Atmosphere.**

The present paper is a continuation of previously made works concerning the analysis of airborne laboratories for monitoring the environment. The paper is devoted to description of procedures of their application as a unique complex beginning with transboundary transfer and ending with local control. The paper gives the examples of the use of the airborne laboratory AN-30 «ОПТИК-Е» for air sounding in regional and urban scales as well as generalization of the examples according to the territory of the former USSR and the data on the exhausts of separate large sources. A conclusion can be drawn concerning the most efficient vise of airborne laboratories by regional monitoring with the inclusion of control elements of transboundary and local levels.