

М.В. Панченко, Б.Д. Белан, В.С. Шаманасев

РОЛЬ САМОЛЕТА-ЛАБОРАТОРИИ ИОА СО РАН В ИЗУЧЕНИИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОЗ. БАЙКАЛ

Представлен обзор работ, которые Институт оптики атмосферы СО РАН проводит на Байкале. Исходя из поставленной задачи, основное внимание уделено анализу применения самолета-лаборатории для природоохранных исследований.

Показано, что при постановке комплексных экспериментов самолет-лаборатория, позволяющая проводить исследования в атмосфере в масштабах целого региона, является наиболее важным средством, поскольку ее возможности адекватны масштабам явлений, понимание которых необходимо для корректного изучения экологических проблем.

Введение

Оптимальные отношения между природой и хозяйственной деятельностью человека возможны лишь на основе тщательного и всестороннего изучения всего спектра изменчивости природных факторов и антропогенных воздействий и обоснованного прогноза возможных последствий.

Очевидно, что для решения этих задач в идеальном случае понадобится развитая сеть станций мониторинга основных климато-экологических параметров. В то же время, исходя из конкретной экономической ситуации в нашей стране, понятно, что реализация подобной программы – дело далекого будущего. Отсюда следует, что для развития научного подхода к решению этих проблем, выработки практических рекомендаций по проведению измерений и анализу получаемой информации в настоящее время необходимо сосредоточить усилия и имеющиеся материальные и интеллектуальные ресурсы на каком-либо наиболее важном и интересном объекте (в геофизическом плане – в масштабе определенного региона).

Выбор района исследований

Среди всех наиболее ценных природных комплексов Сибири Байкал по праву занимает особое место, а проблема охраны природы здесь выходит далеко за рамки сугубо региональных задач и имеет общемировое значение.

Очень верно был определен подход мирового научного сообщества, рассматривающего Байкал как природную лабораторию для всестороннего исследования по программе GLOBAL CHANGE [1].

Действительно, в Прибайкалье, которое характеризуется разнообразием рельефа, располагаются и уникальное озеро, не имеющее аналогов в мире, и нетронутые хозяйственной деятельностью огромные территории, покрытые богатой растительностью, и здесь же сконцентрированы крупные промышленные центры, выбрасывающие в атмосферу и воду практически всю гамму загрязнителей. Своеобразен и климат региона, поскольку на климатические условия оказывает влияние взаимодействие общей циркуляции атмосферы над Восточной Сибирью с циркуляцией воздуха в котловине Байкала [2]. Более того, Байкал уязвим с точки зрения антропогенных воздействий и потому, что он обладает колоссальной площадью водосбора (570 тыс. км² [2]), а следовательно, все загрязнения, выброшенные в регионе или привнесенные трансграничными потоками и осаждаемые на подстилающую поверхность или аккумулярованные растительностью, затем с осадками при таянии снегов или при лесных пожарах могут попадать в акваторию озера. Отсюда следует, что значительный объем загрязнений попадает в озеро через атмосферный канал. Именно эти обстоятельства легли в основу при планировании наших геофизических экспериментов с применением самолета-лаборатории [3].

При этом мы руководствовались теми соображениями, что изучение явлений регионального масштаба, очевидно, требует либо многоточечных измерений, либо использования высококомобильных средств, способных в ограниченное время охватить обширные территории.

Применение самолета-лаборатории

Учитывая, что понимание процессов переноса и трансформации газов и аэрозольных частиц невозможно без знания их пространственно-временной изменчивости (в рамках устойчивых воздушных масс на первый план выходит их вертикальная изменчивость), в качестве основного носителя измерительной аппаратуры был выбран самолет.

Необходимо отметить, что в этом регионе усилиями Лимнологического института СО РАН ведутся многоплановые исследования Байкала практически по всем экологически значимым факторам, успешно развивается сеть приземных станций контроля аэрозольных частиц и регулярно проводятся экспедиционные измерения в приземном слое атмосферы по всей акватории озера [4]. Институт солнечно-земной физики СО РАН осуществляет прием и анализ спутниковой информации. Эти обстоятельства многократно усиливают возможность успешной интерпретации получаемых результатов комплексных экспериментов и выработки практических рекомендаций.

Экспериментальные исследования

Для оценки качества атмосферного воздуха и переноса примесей в атмосфере Байкальского региона (в ряде полетов помимо измерения параметров атмосферы было осуществлено картирование мутности воды) нами в 1991, 1995 и 1996 гг. был осуществлен ряд летних экспериментов над оз. Байкал и прилегающими территориями.

В ходе экспериментов использовалась самолет-лаборатория Ан-30 «Оптик-Э», состав аппаратуры и набор регистрируемых параметров которой детально описаны в [5].

В сентябре 1991 г. по инициативе ПГО «Бурятгеология» и совместно с ним Институт оптики атмосферы СО РАН провел комплексное обследование состояния воздушного бассейна Прибайкалья и оз. Байкал. Цель работы заключалась в исследовании распределения примесей над указанной территорией и оценке возможностей загрязнения воды озера через атмосферный канал. Поскольку подробные данные этого эксперимента опубликованы в [6], здесь отметим только основные моменты.

В 1991 г. обследованию подверглась территория площадью около 250 000 км². Маршруты самолета выбирались так, чтобы они пересекали основное (западно-восточное) направление переноса воздуха, проходили над оз. Байкал и по долинам крупных рек (Селенга, Джида, Уда, Баргузин). Расстояние между маршрутами было в пределах 90–180 км. Маршруты, в свою очередь, делились на участки, длина которых определялась продолжительностью отбора проб газов и аэрозоля и составляла 120–150 км. Все маршруты выполнялись на высотах 400 и 900 м над рельефом местности, включая котловину озера и долины рек. Полеты выполнялись из аэропортов Иркутска и Улан-Удэ.

На основании выполненных измерений в ПГО «Бурятгеология» было построено по 50 карт для каждой высоты, на которые наносились данные об одном газе или элементе из состава аэрозоля.

На рис. 1 приведены интегральные показатели [6] содержания газов в воздушном бассейне Прибайкалья на высотах 400–600 м над уровнем воды оз. Байкал. При расчете этих показателей учитывались следующие газы: NH₃, NO, NO₂, SO₂, O₃, CO, CO₂, Cl₂, ацетон, ацетилен, бензин, бензол, ксилол, толуол.

Из рисунка видно, что газовые составляющие поступают на акваторию озера от Иркутской промзоны в его южной части, где отсутствуют горные хребты, а затем распространяются по всей территории вдоль его восточного побережья.

Для построения рис. 2, представляющего интегральные показатели содержания элементов в составе частиц аэрозоля, использовались данные по следующим элементам и ионам: F⁻, Cl⁻, Br⁻, Hg²⁺, As⁵⁺, Zn²⁺, Cd²⁺, Fe, Mn, Mg, Pb, Cr, Sn, Ni, Al, Ti, Cu, V, Mo, Co, Ca, Si, Ba, Be, B, Sb. Из рис. 2 видно, что распределение аэрозоля над озером и окрестностями по сравнению с газами менее однородно.

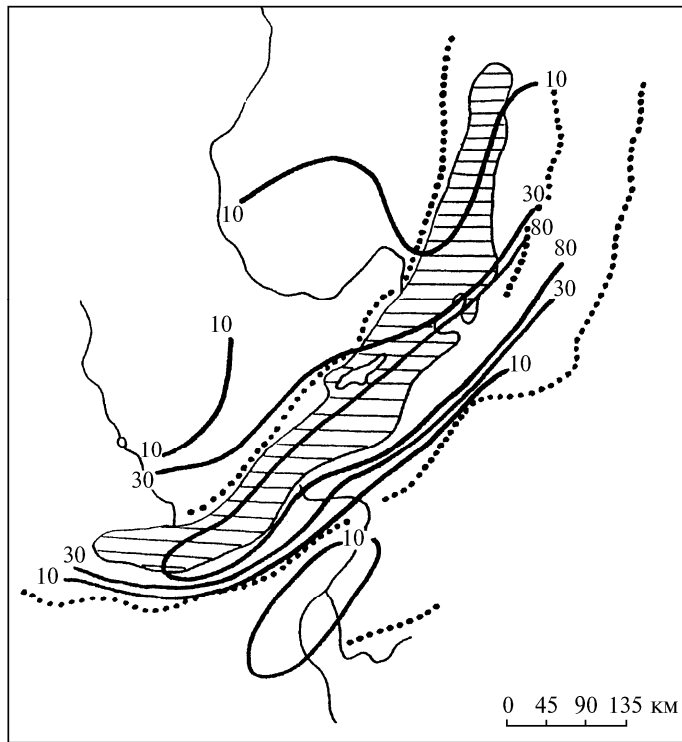


Рис. 1. Интегральный показатель загрязнения воздуха газами на высоте 400–600 м

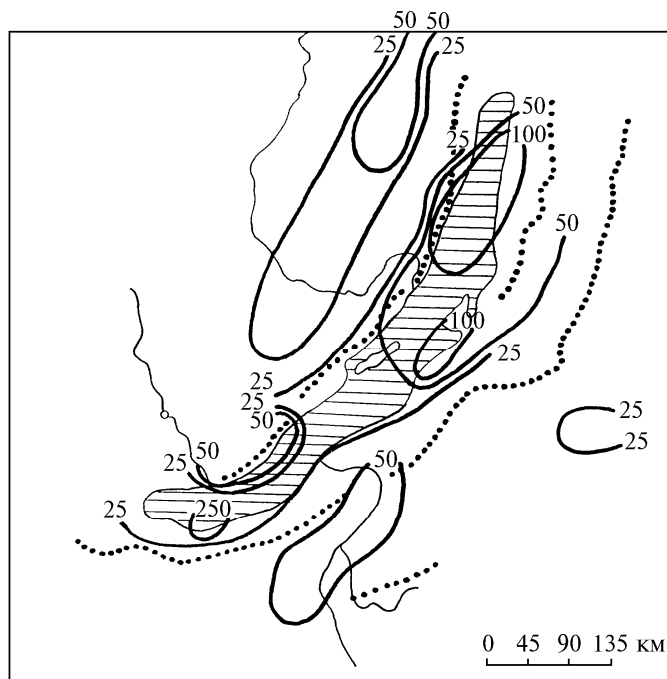


Рис. 2. Интегральный показатель загрязнения воздуха токсичными элементами на высоте 400–600 м

Высокие значения интегральных показателей содержания элементов в составе частиц аэрозоля над северными районами озера (см. рис. 2), где не имеется собственных источников антропогенного аэрозоля, невозможно объяснить, если исключить из рассмотрения круговую циркуляцию воздуха в котловине озера [7].

Из этих фактов следует, что примеси, поступающие на территорию оз. Байкал в системе западно-восточного переноса от Иркутской промышленной зоны, затем попадают в систему круговой циркуляции и разносятся по всей его акватории. Кроме того, направление циркуляции вдоль восточного берега способствует тому, что загрязнениями заполняются долины рек, впадающих в озеро с восточной стороны, о чем можно судить по повышенным значениям интегральных показателей в долинах рек Баргузин и Селенга. Последнее обстоятельство фиксировалось даже визуально в ходе полетов.

Отметим, что в период данного эксперимента основной перенос воздуха осуществлялся из Иркутской промзоны. Однако при другом типе циркуляции не исключено поступление загрязнений из Бурятии и Читинской области.

В 1995 г. работы на Байкале были продолжены. В первых двух полетах самолет работал по периметру озера вдоль береговой линии над поверхностью воды. Причем первый полет проходил на высоте 400 м, а второй осуществлялся с переменной высотой, приблизительно повторяющей высоту окружающего рельефа. Третий полет практически весь был посвящен работе над Байкальским целлюлозно-бумажным комбинатом. В этом эксперименте совместное применение нефелометра и бортового лидара позволило провести картирование распределения аэрозоля по периметру озера от высоты полета до поверхности воды [8]. Фрагмент пространственного распределения коэффициента рассеяния (в случае субмикронных частиц эта величина пропорциональна удельному объему [9]) для восточного побережья приведен на рис. 3.

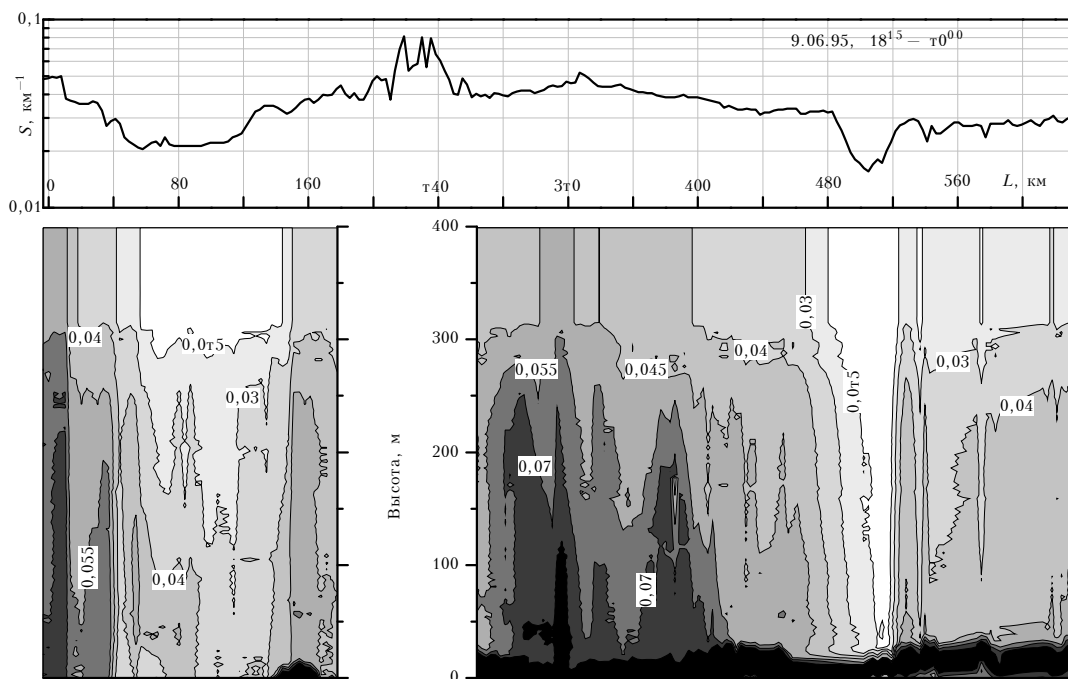


Рис. 3. Фрагмент пространственного распределения коэффициента аэрозольного рассеяния для восточного побережья оз. Байкал. (В верхней части рисунка приведены данные нефелометра для высоты полета самолета 400 м, внизу — результаты лидарных измерений)

Из представленных данных видно, что в целом атмосфера над Байкалом в период эксперимента была слабо замутнена аэрозолем (на всех высотах аэрозольный коэффициент рассеяния всего в несколько раз превышал значения молекулярного рассеяния чистого воздуха). Однако сложный характер пространственного распределения содержания аэрозоля еще раз подтверждает необходимость применения высококомобильных средств при постановке и проведении исследований, связанных с оценкой качества окружающей среды.

Отсюда вполне понятно, что следует ожидать и значительных вариаций содержания различных элементов в пробах, собранных вдоль трассы полета на 12 отрезках протяженностью около 100 км каждый. В процессе эксперимента было собрано более 300 проб для последующего химического анализа. Пока еще преждевременно говорить о полной картине распределе-

ния химических веществ, поскольку для сопоставления данных, получаемых различными методами, мы обратились к нашим коллегам в различных научных центрах (Томске, Иркутске, Новосибирске, в США и в Бельгии). В настоящее время анализ проведен сотрудниками Томского политехнического университета [10], а остальные фильтры еще находятся в обработке. Поэтому здесь ограничимся лишь некоторыми моментами, на которые следует обратить внимание.

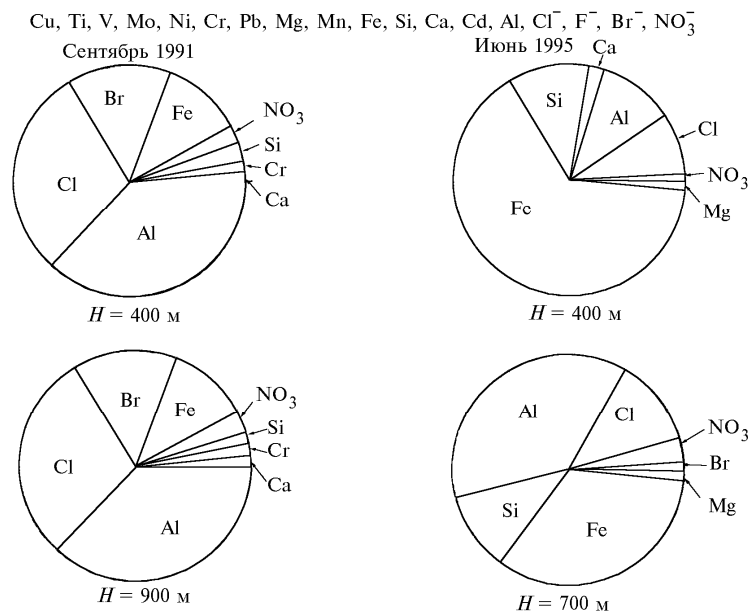


Рис. 4. Относительное содержание ряда элементов и ионов в пробах аэрозоля, собранных по периметру Байкала

На рис. 4 представлены круговые диаграммы относительного содержания элементов и ряда ионов для всех проб, собранных по периметру озера на двух высотах в 1991 и 1995 гг. При построении диаграмм из списка элементов и ионов, приведенных вверху рисунка, учитывались лишь те, относительное содержание которых в пробах превышало 1 %. Как видим из этого рисунка, в анализируемом аэрозоле заметно присутствие элементов, которые могут иметь почвенное происхождение (Fe, Si, Al, Ca) или поступать в атмосферу от предприятий теплоэнергетики. Следует отметить, что наблюдаемые соотношения содержания Fe и Si указывают на преобладающий вклад выбросов тепловых станций. Ощутимое наличие ионов NO_3 указывает на антропогенные источники, поставляющие в атмосферу пары аэрозолеобразующих соединений. В настоящее время, до получения данных из всех научных центров, не удается объяснить высокое содержание Al, но следует отметить, что и в 1991, и в 1995 гг. максимальные значения этого элемента наблюдались на всех высотах на севере восточного побережья Байкала, что вряд ли может быть отнесено к ошибкам химического анализа или небрежностям при заборе проб. При анализе данных 1991 г. у специалистов вызывал сомнение обнаруженный нами факт заметного присутствия хлора во всех пробах. Эксперимент 1995 г. подтвердил эти результаты, причем в этом случае анализ на хлор был проведен в Томском политехническом университете и независимо в Лимнологическом институте СО РАН.

Как уже отмечалось, применение самолета-лаборатории позволяет не только проводить измерения атмосферных параметров, но и исследовать некоторые свойства подстилающей поверхности. В частности, в период экспериментов 1991 и 1996 гг. с помощью бортового лидара были получены карты прозрачности воды. Одна из реализаций пространственного распределения условной прозрачности по диску Секки приведена на рис. 5. Карта построена по данным лидарного зондирования с борта самолета, проводившегося 21–22 сентября 1991 г. Полет проходил на высоте 300 м по периметру озера на удалении 1–5 км от береговой линии. Зондирование осуществлялось с частотой посылок импульсов 1 Гц, что при скорости полета около 300 км в час позволяло добиться пространственного разрешения по трассе приблизительно 80–100 м. Регистрация обратнорассеянного излучения из-под воды осуществлялась с разрешением 1,1 м.

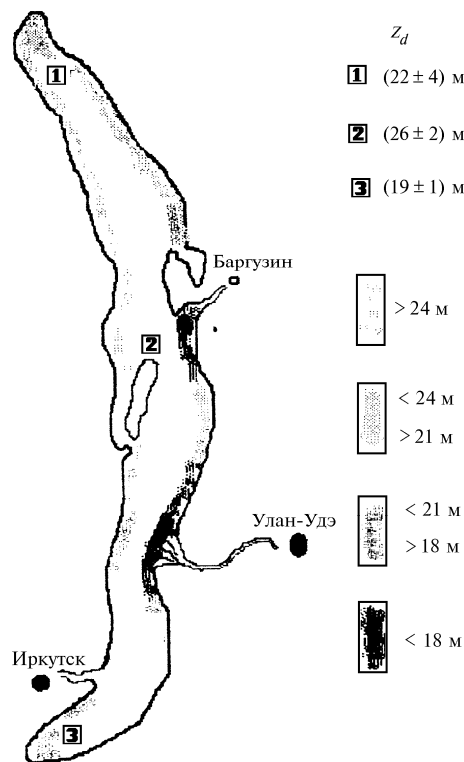


Рис. 5. Карта условной прозрачности воды (в единицах глубины видимости диска Секки)

Из профилей эхосигналов от приповерхностных вод (глубины от 3 до 25 м) методом логарифмической производной вычислялся показатель ослабления ε воды:

$$\varepsilon = \frac{n}{2(z_2 - z_1)} \ln \left(\frac{F_1(z_1) (H + z_1/n)^2}{F_2(z_2) (H + z_2/n)^2} \right),$$

где z_1, z_2 – глубины взятия отсчетов; n – показатель преломления воды; $F_1(z_1), F_2(z_2)$ – значения амплитуд сигналов на этих глубинах; H – высота полета самолета над водой.

Затем по эмпирическому соотношению [11] находилась условная прозрачность – дальность видимости диска Секки $z_d = 3,35/\varepsilon$, систематические измерения которым проводятся на Байкале с 1990 г. Вычисленные значения условной прозрачности усреднялись по трассе на отрезках длиной 12 км и в градиентном виде наносились на карту. На рис. 5 квадратами обозначены контрольные площадки размером 20×20 км, над которыми осуществлялся многократный пролет самолета.

Вполне естественно, что, работая над Байкалом, мы проводили детальный облет шлейфов выбросов Байкальского целлюлозно-бумажного комбината, где были взяты пробы непосредственно в центре выбросов и на периферии. С помощью лидара удалось проследить картину распространения загрязнений от срезов труб до тех границ, где значения концентраций этих загрязнений сливаются с «фоновыми» значениями, а это не один десяток километров по горизонтали и несколько сот метров по вертикали. Полученные результаты, несомненно, будут полезны при апробации и тестировании моделей переноса примесей от БЦБК и при оценке негативных воздействий, но в этой статье мы ограничимся только рис. 6, где показана панорама шлейфа выбросов, восстановленная по данным бортовой видеокамеры (компьютерная реконструкция панорамы осуществлялась сотрудниками ИОА СО РАН В.П. Галилейским и А.М. Морозовым).

Приводя этот снимок, мы не претендуем на участие в спорах о целесообразности присутствия на берегу Байкала этого предприятия. Но нельзя не согласиться с очень убедительным высказыванием директора Лимнологического института члена-корреспондента РАН М.А. Грачева на одном из заседаний комиссии по Байкалу при Президиуме СО РАН: «Даже исходя из нормальных гуманитарных (эстетических) соображений, Байкал и предприятия на его берегу несовместимы».

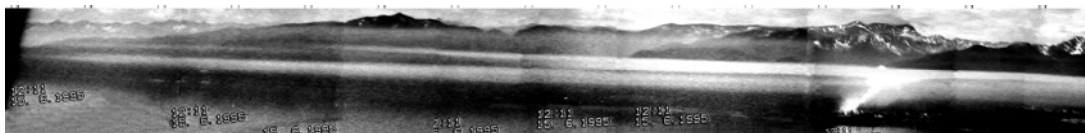


Рис. 6. Панорама выбросов БЦБК

В данном случае мы приводим этот рисунок для того, чтобы визуальнo подтвердить наличие сложной циркуляции воздуха, осуществляющей перенос примеси вдоль береговой линии. Также на этом кадре отчетливо видно, что наличие температурной инверсии препятствует выносу загрязнений в высокие слои атмосферы и в сочетании с бризовой циркуляцией в прибрежной зоне способствует их осаждению на близлежащие участки поверхности, а следовательно, увеличивает вероятность их попадания в воды Байкала.

Приводя этот фрагмент видеосъемки, хотелось бы обратить внимание и на один методический аспект. Большинство задач, связанных с картированием распределения различных примесей в атмосферном воздухе, требует либо подробного прохода по пространству для взятия проб, либо применения дистанционных средств зондирования искомой характеристики. В том и другом случаях получение полной трехмерной картины распределения примеси в пространстве сопряжено с необходимостью сбора и обработки чрезвычайно огромного объема информации.

При планировании различного рода полевых экспериментов наиболее важной задачей является проблема оптимального комплексирования доступных методов и технических средств. Особенно важно правильно сформировать комплекс и спланировать пространственную и временную частоту съема информации при использовании такого дорогостоящего средства, как самолет-лаборатория. Полученный нами опыт исследования крупномасштабных процессов, которые доступны для визуального наблюдения (например, шлейфы промышленных предприятий и т.д.), позволяет рекомендовать применение видеосъемки не только в роли вспомогательного метода, но и в качестве важного элемента всего мобильного комплекса. В частности, сочетание видеосъемки, лидарных и нефелометрических данных позволило провести оценку суммарного содержания аэрозоля в выбросах БЦБК для конкретных периодов зондирования [12].

Заключение

Приведенные примеры, на наш взгляд, убедительно доказывают, что при постановке комплексных экспериментов самолет-лаборатория, позволяющая проводить исследования в атмосфере в масштабах целого региона, является наиболее важным средством, поскольку ее возможности адекватны масштабам явлений, понимание которых необходимо для корректного изучения экологических проблем.

От имени коллектива самолета-лаборатории сердечно благодарим авторитетные научные фонды (МНФ и РФФИ), Президиум СО РАН, которые материально поддержали эти работы (грант Международного научного фонда NY 2000 (1995) и грант Международного научного фонда и правительства Российской Федерации NY 2300 (1995) «Самолетное исследование влияния антропогенных источников и лесных пожаров на климатическое и экологическое состояние региона оз. Байкал», грант РФФИ (1995) 95-05-16562, Экспедиционный грант СО РАН «Самолетное зондирование атмосферы»).

1. Байкал – природная лаборатория для исследований изменений окружающей среды и климата: Тезисы докладов. Т. 1. Иркутск, 1994. 71 с.
2. Байкал: Атлас. СО РАН, ФС ГК России, М., 1993. 160 с.
3. Белан Б.Д., Зуев В.Е., Панченко М.В. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 1–2. С. 131–156.
4. Ходжер Т.В., Потемкин В.Л., Оболкин В.А. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 8. С. 1059–1066.
5. Зуев В.Е., Белан Б.Д., Кабанов Д.М. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. № 10. С. 1012–1021.
6. Белан Б.Д., Зуев В.Е., Ковалевский В.К. и др. // Метеорология и гидрология. № 10. 1996. С. 39–50.
7. Зуев В.Е., Антонович В.В., Белан Б.Д. // Доклады РАН. Т. 325. № 6. С. 1146–1150.
8. Kokhanenko G.P., Terpugova S.A., Penner I.E., Tumakov A.G., Shaman-aev V.S. // Abstracts of Reports at 15-th Annual Meeting of American Association for Aerosol Research. Orlando, Florida. Oct. 14–18, 1996. P. 123.

9. Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Свириденков М.А. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1981. Т. 17. № 1. С. 39–49.
10. Belan B.D., Panchenko M.V., Semenova O.I., Tolmachev G.N. // IV Russian-French Seminar on the Application of Neutrons and Synchrotron Radiation for Condensed Matter Investigations. Novosibirsk–Irkutsk, June 25–July 3, 1996.
11. Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. Новосибирск: Наука, 1979. С. 100–105.
12. Панченко М.В., Белан Б.Д. // II Заседание Рабочей группы проекта «Аэрозоли Сибири»: Тезисы докл. Томск, 1995. С. 73–74.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
21 января 1997 г.

M. V. Panchenko, B. D. Belan, V. S. Shamanayev. Investigation of Lake Baikal Environment with Airplane-laboratory of the Institute of Atmospheric Optics SB RAS.

Ecological investigations of Lake Baikal conducted by researchers of the IOA SB RAS for salvaging its environment are reviewed in the paper. The major attention is paid to analysis of the airplane-laboratory use.

The presented examples show it to play very important role in complex study of the atmosphere in regional scale, since the possibility of the airplane-laboratory is adequate to the scale of the object under study.