

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.501

И.Э. Пеннер, В.С. Шаманаев

НАЗЕМНО-САМОЛЕТНОЕ ЛАЗЕРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ДЫМОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Самолетным лидаром было проведено зондирование дымового шлейфа Гусиноозерской ГРЭС. Затем лидар был снят с самолета, и зондирование было продолжено в наземных условиях. Показано, что в стабильных погодных условиях длина шлейфа составляет не менее 10 км. На мощность сигналов лидара от необходимого дыма вблизи устья трубы, их флуктуационные и поляризационные характеристики существенно влияет качество работы котлоагрегатов электростанции, что позволяет использовать эти характеристики в оперативных целях экологического контроля.

Расширение возможностей лазерного зондирования аэрозольных промышленных выбросов может быть достигнуто путем использования как самолетного, так и наземного лидаров.

Здесь могут применяться оперативные <полицейские> наблюдения за загрязняющими объектами; более долговременные, усредненные наблюдения экологического характера и чисто научные атмосферно-физические исследования. Хорошая основа для этого имеется на самолете-лаборатории <Оптик-Э> [1]. Один лидар типа <Макрель-2> [2] установлен на самолете и зондирует атмосферу с его борта. Второй лидар этого же типа или более легкий, например, М2М [3], находится в грузовом отсеке самолета. В ходе экспериментов он в течение нескольких часов доставляется в требуемую точку наземных измерений.

Такая схема эксперимента была принята нами при зондировании аэрозольных выбросов Гусиноозерской ГРЭС (Бурятия) с разнесением на несколько дней самолетной и наземной частей измерений.

Для обоих лидаров использовалась единая система регистрации на базе ЭВМ <Электроника-60> и 7-разрядного аналого-цифрового преобразователя с временем квантования 10 нс.

При зондировании атмосферы с самолета в надир восстановление значений коэффициента рассеяния производилось на основе метода Клетта [4], когда на удаленном конце трассы зондирования задается априорно известная величина коэффициента рассеяния:

$$\sigma(H) = \frac{\exp [F(H) H^2 - F(H_m) H_m^2]}{\frac{1}{\sigma_m} + 2 \int_H^{H_m} \exp [F(x) x^2 - F(H_m) H_m^2] dx}, \quad (1)$$

где H – текущее расстояние от лидара; F – мощность принимаемого сигнала; H_m – расстояние до находящейся в конце трассы зондирования контрольной (опорной) точки, в которой априорно известно значение коэффициента рассеяния σ_m . В данном случае значение σ_m определялось из наземных измерений метеорологической дальности видимости S_m вблизи ГРЭС по канонической формуле

$$\sigma_m = 3,9/S_m.$$

При обработке результатов зондирования слабозамутненной атмосферы в направлении снизу вверх применялся итерационный алгоритм [5]. Его первая итерация представляет собой широко известную формулу, хорошо применимую в рассматриваемом случае небольшой дальности зондирования:

$$\sigma(H) = (F(H) H^2 / F(H_0) H_0^2) \sigma(H_0). \quad (2)$$

Здесь $\sigma(H_0)$ – контрольное значение коэффициента рассеяния, но уже в начале трассы зондирования в отличие от предыдущего случая. Оно также оценивалось по наземной горизонтальной дальности видимости в атмосфере.

Гусиноозерская ГРЭС расположена уединенно к юго-востоку от оз. Байкал и имеет две дымовые трубы. Труба 1-й очереди более ранней постройки равна 180 м. На нее нагружены котлоагрегаты с высокой степенью износа и устаревшими очистными сооружениями. Она составляет в атмосферу большую часть аэрозольных выбросов. Труба 2-й очереди имеет высоту 300 м и высокоэффективные очистные сооружения. Основным видом топлива является местный уголь. Для стабилизации режима горения в непредвиденных обстоятельствах используются мазутные горелки. Как одна из мер по очистке аэрозольно-газовых выбросов применяется их водяное орошение.

При проведении эксперимента в его наземной части режимы работы ГРЭС изменялись в достаточно широких пределах по не зависящим от ее персонала причинам. Широко варьировалась доля мазута в топливном балансе. Орошение регулировалось вплоть до его выключения.

При самолетном зондировании погодные условия были стабильными, режим работы электростанции нормальный. Самолет пилотировался визуально вдоль осевой линии шлейфа на высоте 800 м над уровнем ГРЭС.

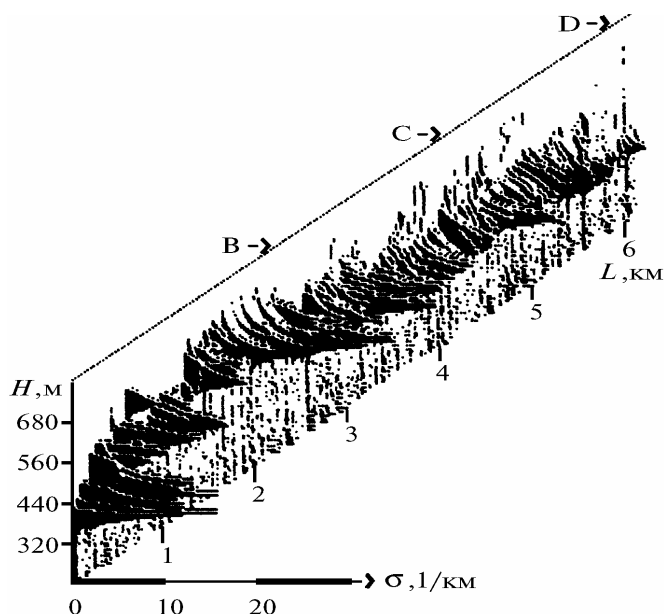


Рис. 1. Пространственный профиль коэффициента рассеяния σ вдоль оси дымового шлейфа ГРЭС. H – барометрическая высота над уровнем местности. L – расстояние от источника дыма вдоль шлейфа. Высота полета 800 м

На рис. 1 представлен двумерный профиль коэффициента рассеяния в шлейфе. Он построен по 160 вспышкам лазера за 50-секундный отрезок времени. Зондирование начато на удалении 280 м от устья трубы 1-й очереди. Видно, что примерно через 1 км струя дыма поднялась до высоты 500–600 м, на которой и распространялась вдоль ветра. Через 6 км самолет удалился от шлейфа из-за гористого рельефа местности. В это время дымовой след все еще наблюдался и визуально, и по показаниям лидара.

На рис. 2 приведены лидарные профили, соответствующие локальным попаданиям в точки B и C шлейфа. Разрез D соответствует <чистой> атмосфере вне шлейфа. Он показывает, что в вертикальном направлении атмосфера почти не стратифицирована по коэффициенту рассеяния. Была или нет в это время температурная инверсия – неизвестно. В то же время тот факт, что высота оси шлейфа почти не менялась, заставляет предположить наличие какого-то задерживающего слоя.

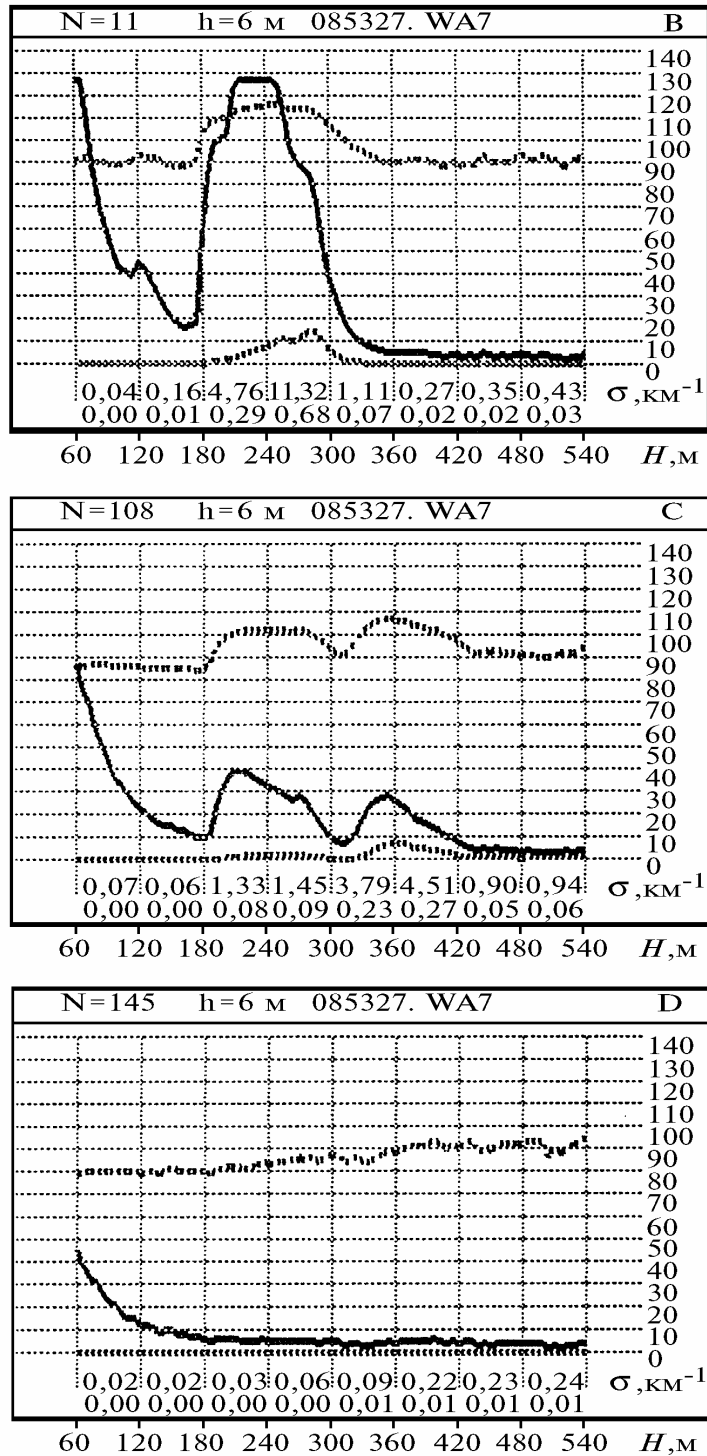


Рис. 2. Локальные вертикальные разрезы шлейфа для точек B и C, выделенных стрелками на рис. 1. Точка D находится вне шлейфа и используется для сравнения. Сплошная кривая – сигнал $F(H)$; справа для него приведена шкала в единицах кода АЦП. Нижняя штриховая кривая – профиль $\sigma(H)$; для него внизу указаны абсолютные значения, усредненные по 60-метровым интервалам вдоль луча. Верхняя штриховая кривая – профиль $F(H)H^2$ в относительных единицах

Из рисунков видно, что на дистанции примерно 6 км шлейф существует как единое целое. Оптическая плотность шлейфа $\tau_{ш}$ вычислялась в тех геометрических границах, в которых коэффициент рассеяния выше, чем в окружающей атмосфере. Вдоль исследованной линии по-

лета $\tau_{ш} = 0,4 \pm 0,25$. Геометрическая толщина шлейфа по вертикали составляла (100 ± 80) м. Отметим, что пространственное распределение $\tau_{ш}$ вдоль шлейфа имеет пульсирующий характер («клубы дыма»). На данном 6-километровом отрезке для локальных максимумов $\tau_{ш}$ удалось выделить короткую периодическую составляющую длиной (290 ± 110) м и длинную – порядка 2,5 км. В целом вдоль шлейфа его вертикальная оптическая толщина спадает со скоростью около $0,04 \text{ км}^{-1}$. Если за критерий наличия шлейфа принять двухкратное превышение в нем оптической плотности над окружающей атмосферой, то экстраполяция за пределы исследованного 6-километрового участка дает общую длину шлейфа $11 \div 13$ км. (Интересно, что сохранение струйного характера дымовых аэрозолей отмечалось, по нашим самолетным данным, на расстоянии, равном примерно 30 км от источника дыма [6]). Такой закон распространения аэрозолей позволяет предположить, что и след из выпадающих частиц будет также иметь форму достаточно узкой полосы.

Если авиалидарный анализ позволил нам оценить крупномасштабные характеристики шлейфа, то зондирование его начального участка в течение достаточно длительного времени дает возможность судить о характере функционирования котлоагрегатов. (Характер дымовой струи фиксировался видеокамерой).

Отметим одну особенность, свойственную зондированию дымов вблизи устья. Это высокая оптическая плотность выбросов из трубы 1-й очереди ГРЭС. В этом случае вклад многократного рассеяния в сигнал столь велик, что становится невозможным восстановление профиля коэффициента рассеяния в дыме. Поэтому было принято решение анализировать просто величину сигнала от дыма в относительных единицах кода АЦП на глубинах 6 и 24 м от его физической границы. В этих же точках измерялась и деполяризация эхосигнала как отношение его кроссполяризованного компонента к поляризованному.

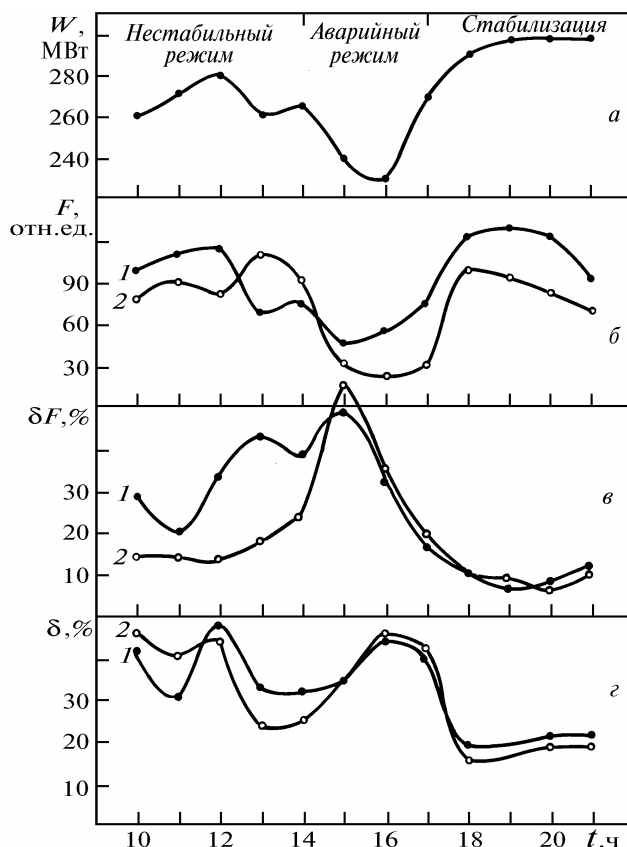


Рис. 3. Временная взаимосвязь параметров лидарного сигнала и режима работы для 1-й очереди ГРЭС: *a* – выходная мощность электрогенераторов W , МВт; *b* – мощность эхосигнала лидара F в единицах кода АЦП; *c* – среднеквадратическое отклонение δF мощности лидарного сигнала; *d* – величина деполяризации лазерного сигнала. Кривые 1 и 2 – результаты измерений на глубинах 6 и 24 м от физической границы шлейфа; t – местное время, ч

Рис. 3 представляет собой результат слежения за дымом из этой <плохой> трубы в течение 12 ч. Данные в каждой измерительной точке построены по 180 вспышкам лазера. На рис. 3, а показана суммарная электрическая мощность, вырабатываемая генераторами, и краткая характеристика работы всего энергетического блока. Из рис. 3, б видно, что мощность эхосигнала от дыма удовлетворительно коррелирует с вырабатываемой ГРЭС энергией. Для сигнала от наружной стороны дыма коэффициент корреляции равен 0,78, для его внутренней зоны – 0,51.

Причина такой связи очевидна: мощность станции пропорциональна количеству сжигаемого топлива, т.е. и массовой концентрации выбрасываемого аэрозоля, и коэффициенту рассеяния. Разные коэффициенты корреляции зависят, скорее всего, от совокупности причин: от изменения соотношения угля и мазута в топливе, различной интенсивности орошения дымовых газов водой и, наконец, от влияния многократного рассеяния света.

Тем не менее видно, что даже из столь несложных лидарных измерений по отклонению мощности сигнала от среднего (номинального) режима можно дистанционно контролировать общие изменения работы электростанции. Более того, приведенные на рис. 3, в, г характеристики сигналов позволяют сделать вывод о возможности отслеживать и качество работы котлоагрегата. Действительно, его стабильному режиму работы, начиная с 18 ч и далее, соответствуют невысокие флуктуации мощности эхосигнала на обеих глубинах, со стандартным отклонением около 10%. В период наибольшей нестабильности в работе котлов (14÷17 ч) флуктуации сигнала от дыма в центральной части струи превосходят 50%. Предположительной причиной этого является влияние режимов горения угольной пыли и мазута в факелах котлов на турбулентные процессы в выбрасываемой аэрозольно-газовой смеси. Построенные гистограммы относительной частоты появления тех или иных значений отраженной мощности показали, что они распределены по нормальному закону, хотя и с различной дисперсией, как это и видно из кривых.

Еще одна полезная в этом плане характеристика сигнала – деполяризация δ , которая стабилизируется на уровне 20% после 18 ч. В течение же предшествующего периода значение δ достигает 30÷50%, непостоянно во времени и не коррелирует явно с макропараметрами котлоагрегата. Погрешность измерения значений δ не превышала 10–15%. Качественная сторона этого явления находит объяснение также без особенного затруднения: вариации режимов горения ведут к непостоянству размеров и формы дымовых частиц. От них, в свою очередь, зависит величина деполяризации рассеянного излучения, хотя и сложным образом.

Для целей экологического контроля будет достаточным чисто эмпирический подход, а именно: замерив значение δ при стабильной работе ГРЭС, по его отклонениям можно судить в дальнейшем о качестве работы топок.

Для сравнения было проведено зондирование этим же лидаром дыма из <хорошей> трубы 2-й современной очереди ГРЭС. Наклонная дистанция до точки попадания в колонку дыма составляла 630 м, что на 30 м выше устья трубы высотой 300 м. Стабильность ситуации на этой трубе иллюстрирует рис. 4, где приведены данные, разделенные интервалом в несколько часов. Поскольку дым был слаб (визуально практически не виден) то удалось восстановить профиль коэффициента рассеяния в дыме по наклонному сечению колонки. Оптическая толщина в этих случаях составила 0,08 и 0,06.

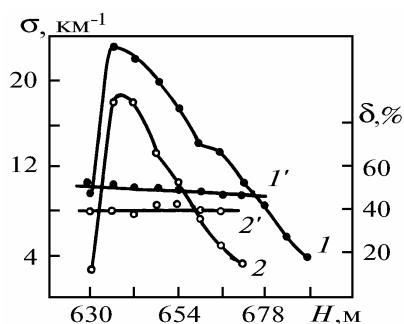


Рис. 4. Наклонное сечение дымового шлейфа над трубой 2-й очереди ГРЭС: 1 и 2 – профили коэффициента рассеяния σ с интервалом в несколько часов; 1' и 2' – соответствующие профили деполяризации

Поведение профилей деполяризации является классическим для частиц неправильной формы и невысокой концентрации. Значение δ практически постоянно по сечению шлейфа и имеет высокое абсолютное значение: 40–45% при вычислительной погрешности определения, равной 10–15%.

Важно отметить интересный физический момент. Для частиц дыма, прошедших достаточно мощные очистные сооружения, характерно более высокое значение деполяризации, чем для частиц из трубы 1-й очереди с явно неудовлетворительной фильтрацией, т.е. с гораздо большими размерами.

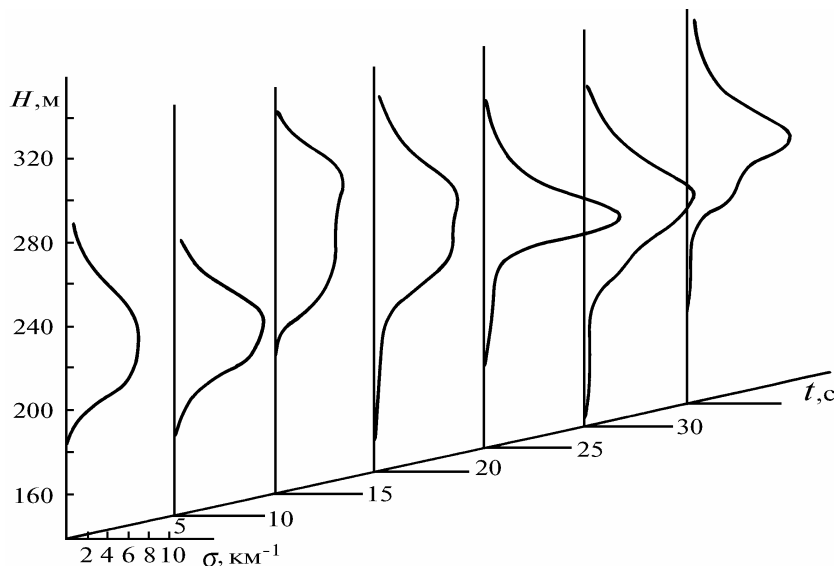


Рис. 5. Вертикальные сечения стелющегося дымового шлейфа на удалении 230 м от трубы. H – высота от поверхности Земли; t – текущее время от начала зондирования

Проводилось также измерение, когда лидар зондировал атмосферу вертикально вверх на удалении 230 м от трубы 1-й очереди и 575 м от трубы 2-й очереди. Обе они находились в створе с лидаром, но основную долю выбросов обеспечивала, безусловно, 1-я очередь. Обработка эхо-сигналов производилась по формуле (2). Стабильный ветер способствовал тому, что достаточно размытый шлейф проходил над точкой измерения. Семейство вертикальных профилей коэффициента рассеяния приведено на рис. 5. Каждый профиль получен усреднением по 5 вспышкам, t – текущее время. За 30 с измерений максимум коэффициента рассеяния в шлейфе составил $(8,8 \pm 2,3) \text{ км}^{-1}$, а его вертикальная толщина – $(63 \pm 11) \text{ м}$. Нижняя граница находилась на $(200 \pm 15) \text{ м}$.

Отметим, что на высоте 120 м находился слой с наиболее чистым воздухом, где $\sigma = 0,2 \text{ км}^{-1}$. Вблизи земли по горизонтали вдоль следа шлейфа $\sigma = 0,4 \text{ км}^{-1}$, в то время как в перпендикулярном направлении в <невозмущенной> атмосфере $\sigma = 0,2 \text{ км}^{-1}$. Налицо проявление седиментации, но ее особенности сами по себе ставят ряд вопросов. Один из них – это упомянутый минимум коэффициента рассеяния, т. к. при непрерывной седиментации его не должно быть. Второй – поведение деполяризации, которая от приземного $\delta = (0,12 \pm 0,05)$ возрастает с градиентом $4,25 \text{ км}^{-1}$ до $\delta = (0,45 \pm 0,08)$ на высоте 80 м. Затем она резко спадает и в толще шлейфа равна 0,05. Это меньше, чем в окружающей атмосфере, и говорит об обводненности дымовых частиц. Тем интереснее нижний 200-метровый слой воздуха, в котором стратификация коэффициента рассеяния сложным образом связана с динамичной микроструктурой аэрозолей (и которая, к сожалению, не измерялась) и с их деполяризующей способностью.

Таким образом, рассмотрение представленных выше данных позволяет сделать следующие основные выводы.

Вполне обоснованным, полезным и возможным является использование на самолете лидара для одновременных наземно-самолетных исследований аэрозольных загрязнений.

По данным о мощности, флуктуациях и поляризации лидарных сигналов от дымов вблизи устья трубы ГРЭС можно судить о качестве работы котлоагрегатов.

В условиях стабильного ветрового режима дымовой шлейф как отдельно существующее аэрозольное образование может распространяться не менее чем на 10 км.

1. Зуев В.Е., Белан Б.Д., Кабанов Д.М. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 10. С. 1012–1021.
2. Абрамочкин А.И., Занин В.В., Пеннер И.Э. и др. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N 2. С. 92–96.
3. Абрамочкин А.И., Пеннер И.Э., Шаманаев В.С. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. N 3. С. 332–334.
4. Klett J.D. // Appl. Opt. 1985. V. 24. N 11. P. 1638–1643.
5. Веретенников В.В., Наац И.Э., Самохвалов И.В., Шаманаев В.С. // Лазерное зондирование атмосферы. М.: Наука, 1976. С. 98–103.
6. Белан Б.Д., Бурков В.В., Панченко М.В. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 2. С. 186–192.

Институт оптики атмосферы
СО РАН, Томск

Поступила в редакцию
1 ноября 1993 г.

I. E. Penner, V. S. Shamanaev. **Ground-Based and Airborne Laser Sounding of Power Plant Stack Plumes.**

In this paper we present some results of lidar sounding of a stack plume from Gusinoozersk power plant. First, sounding have been carried out with an airborne lidar then this same lidar was dismounted from the aircraft and used for ground – based sounding of the stack plume. It was shown in these experiments that under stable weather conditions the plume is, at least, ten kilometers long. The intensity of lidar return signals from dry smoke aerosol in the region just above the stack mouth, as well as fluctuation and polarization characteristics of these signals are strongly affected by the quality of heat production process in the power plant boilers. This circumstance allows us to suppose that measurements of these characteristics of lidar returns can be used for the purposes of operative ecological monitoring of atmospheric emissions from power plants.