

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.501.7

**А.П. Иванов, А.П. Чайковский, Ф.П. Осипенко, И.С. Хутко, М.М. Король, В.Н. Щербаков,
В.П. Кабашников, А.И. Бриль, В.М. Попов, А.А. Ковалев, А.М. Самусенко, М.А. Другаченок**

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОЗОЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ В ПРОМЫШЛЕННОМ РЕГИОНЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛИДАРОВ

Излагается методология применения лидарных станций при проведении экологического обследования промышленного региона на примере района г. Солигорска (Беларусь). Лидары использовались для идентификации источников пылевых выбросов, для получения карт распределения массовой концентрации пыли и оценки скорости ее осаждения. По данным лидарных измерений была сделана оценка мощностей пылевых выбросов промышленных комбинатов и их отдельных технологических установок. Определен вклад распределенных источников загрязнения, таких как отвалы отработанных пород, строительные площадки и др.

На основании всего объема накопленной информации строилась математическая модель процесса переноса аэрозольного загрязнения в исследуемом районе, входными параметрами которой являлись измеренные мощности источников выбросов и метеорологические параметры. Результаты расчетов концентраций аэрозольной компоненты в приземном слое и интенсивность осаждения сравнивались с данными измерений. Модель реализована в виде программы для ПЭВМ и может использоваться для прогнозирования загрязнения атмосферы при изменении загрузки промышленных предприятий и вариациях метеорологических параметров.

1. Введение

Проведение мероприятий по снижению уровня загрязнения воздуха в промышленных регионах требует предварительного изучения источников загрязняющих выбросов, определения их мощности, исследования процессов трансформации и переноса загрязняющих веществ при различных метеорологических ситуациях. В промышленных зонах наряду со стационарными локализованными могут присутствовать распределенные, неоднородные и нестационарные источники загрязняющих выбросов. В масштабах промышленной зоны перенос загрязнения происходит в атмосферном пограничном слое. Методы и приборы, использующие отбор проб воздуха и последующий его анализ, являются обязательным элементом системы контроля загрязнения воздуха, но могут обеспечить систематическое получение данных на небольшом числе станций и, как правило, только в приземном слое атмосферы. По этим причинам применение лидарной техники, обеспечивающей дистанционный контроль всей толщи атмосферы с высоким временным и пространственным разрешением, имеет очевидное научное и экономическое обоснование.

В настоящей статье описывается методология применения лидарных станций в структуре мероприятий по комплексному экологическому обследованию промышленного региона на примере района г. Солигорска (Беларусь), которое было проведено в 1991–1995 гг. организациями Академии

наук, Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды, а также других ведомств Республики Беларусь. Внимание привлекается к особенностям методики измерений и анализа лидарных данных, их сопоставлению с результатами измерений другими методами и использованию для построения компьютерных моделей загрязнения воздуха в промышленном регионе.

2. Структура источников загрязнения воздуха Солигорского индустриального района

Солигорский промышленный район расположен в южной части Минской области. Центром района является г. Солигорск (52 тыс. человек), расположенный на правом берегу р. Случь в 140 км к югу от г. Минска. Основой промышленного потенциала района являются крупные залежи калийных солей (3,75 млрд. т) на глубинах 300–800 м. Четыре комбината обеспечивают получение более 5 млн. т удобрений в год в пересчете на 100% питательных веществ. Одновременно эти комбинаты являются источниками выбросов вредных веществ, что оказывает существенное влияние на экологическую обстановку в регионе. В состав выбросов входят газовые компоненты (оксиды азота, серы, углеводороды, аммиак и др.), а также большое количество пыли. Каждым комбинатом выбрасывается 800–1400 т/год пылевого загрязнения с высоким содержанием KCl и NaCl [1]. Схема расположения комбинатов представлена на рис. 1.

В структуру комбината входят обогатительная фабрика, шлакохранилище и солевые отвалы. Каж-

дая структурная единица имеет свои каналы выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду.

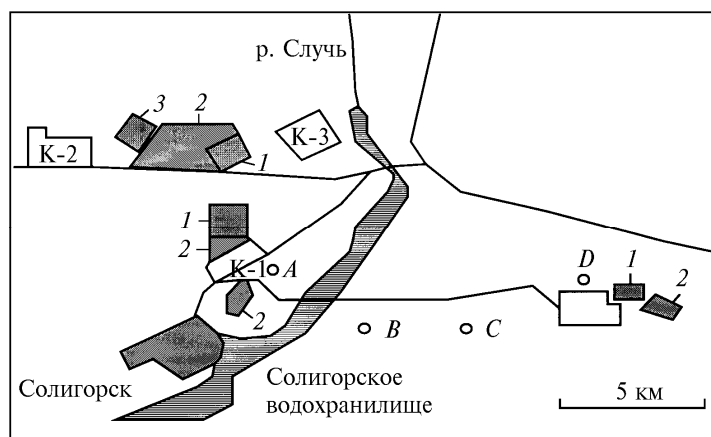


Рис. 1. Схема Солигорского промышленного района: 1 – солеотвалы, 2 – шлакохранилища; К-1, ..., К-4 – калийные комбинаты; А, В, С, D – места отбора проб аэрозоля на планшеты

Поднятая из шахты сильвинитовая руда поступает на обогатительную фабрику, где проводятся операции дробления руды, флотационного разделения KCl и $NaCl$, прессование, дробление, грануляция калийного удобрения. Образовавшаяся на первом этапе пыль выбрасывается через низкие, расположенные на крышах зданий трубы аспирационных установок. Пыль, образующаяся в последующих технологических операциях, в основном KCl , выбрасывается через высотные трубы комбината (40–120 м). Кроме того, на комбинатах расположены тепловые станции и котельные установки. Продукты сгорания топлива выбрасываются через высотные трубы (60–120 м).

Солеотвалы, занимающие площадь в несколько квадратных километров, являются распределенными источниками пылевых выбросов. Посредством ветрового подъема мелкодисперсные солевые частицы с поверхности солеотвалов выносятся в атмосферу. Интенсивность этого процесса определяется состоянием поверхности и скоростью ветра.

На территории комбинатов и в окрестности производятся строительные, погрузочно-разгрузочные, транспортные работы, имеются другие предприятия, которые вносят свой вклад в выбросы аэрозольной компоненты. В комплексе все эти процессы создают пространственно неоднородную и динамичную картину полей загрязнения в районе комбинатов.

Кроме калийных комбинатов в г. Солигорске и его районе действуют свыше пятидесяти предприятий, являющихся существенно менее мощными источниками выбросов. В целом суммарная интенсивность выбросов вредных веществ в районе г. Солигорска составляет $100\text{--}530 \text{ т}/(\text{км}^2\cdot\text{год})$. При результирующей оценке состояния окружающей

среды этот район относят к зонам экологического кризиса и зонам экологической катастрофы [1].

3. Задачи лидарного контроля параметров атмосферы при экологическом обследовании промышленного региона

Лидарная техника в программе комплексного экологического обследования использовалась для определения уровня пылевого загрязнения воздушной среды. Задача состояла в идентификации источников пылевых выбросов, оценке их мощности, получении карт распределения массовой концентрации пыли и оценке скорости ее осаждения. Для анализа состава и концентрации аэрозоля одновременно с лидарными измерениями осуществлялся отбор проб пыли с последующим их химическим и гранулометрическим анализом, измерением бета-активности. Проводились измерения метеорологических параметров.

Сложная структура источников выбросов в промышленной зоне, динамичность параметров аэрозоля вследствие изменения скорости технологических процессов на предприятиях и вариаций метеорологической ситуации требуют проведения чрезвычайно большого объема экспериментальных измерений для описания процессов трансформации аэрозольных полей в регионе. Чтобы свести к разумным пределам время и стоимость проведения экспериментальных работ, ставилась задача измерить в натуральных условиях значения мощности выбросов только основных источников загрязнения атмосферы и получить карты распределения концентрации аэрозоля для ограниченного числа характерных зон промышленного района. На основании всего объема накопленной информации строилась компьютерная модель процесса переноса аэрозольного загрязнения в исследуемом

районе, входными параметрами которой являлись измеренные мощности источников выбросов и метеорологические параметры. Результаты расчетов концентраций аэрозольной компоненты сравнивались с данными измерений.

4. Аппаратура и методика восстановления параметров атмосферного аэрозоля по данным лазерного зондирования

Исследование динамики пространственного распределения концентрации аэрозольной компоненты атмосферы в промышленной зоне проводилось посредством передвижной лидарной станции (ПЛС). ПЛС представляет собой многофункциональный лидар, установленный в автомобильный фургон. В закрытом отсеке фургона оборудованы рабочие места для двух операторов, установлены управляющая ЭВМ, многоканальная система регистрации, система управления приводами и механизмами станции, другая аппаратура.

Во втором отсеке на подъемном устройстве смонтирована приемопередающая система лидара. В зависимости от комплектации рабочими длинами волн являются 694 или 532 и 1064 нм. Шестиканальная приемная оптическая система ПЛС обеспечивает реализацию многоволнового зондирования в режиме аналогового сигнала и счета фотонов. Предусмотрена возможность измерения деполаризации локационного сигнала.

Часть данных о пространственном распределении концентрации аэрозольной компоненты была получена посредством многоволнового лидара «Глория-М», работающего на 7 длинах волн в диапазоне 380–965 нм [2]. Однако основное назначение этого прибора состояло в измерениях спектров оптических параметров атмосферы, которые проводились для построения региональной оптической модели атмосферы в исследуемом регионе.

Алгоритм обработки данных лазерного зондирования был ориентирован на определение массовой концентрации атмосферного аэрозоля. Часть измерений была выполнена в режиме одноволнового зондирования на длине волны 532 или 694 нм. В других случаях проводилось многоволновое зондирование атмосферы с числом рабочих длин волн от 2 до 7. Во всех вариантах промежуточным этапом обработки являлся расчет показателя обратного аэрозольного рассеяния β на одной из референтных длин волн (532 или 694 нм). Именно для этих длин волн определялись отношения показателя обратного рассеяния и массовой концентрации аэрозоля при калибровке лидара.

Алгоритм расчетов β основывается на решении системы локационных уравнений, связывающих интенсивность локационного сигнала $P(\lambda_i, l)$ на длине волны λ_i из области на расстоянии l по трассе зондирования и оптические параметры атмосферы:

$$P(\lambda_i, l) = A(\lambda_i, l) P_0(\lambda_i) l^{-2} \beta(\lambda_i, l) \exp\left\{-2 \int_0^l \varepsilon(\lambda_i, l') dl'\right\}. \quad (1)$$

Здесь $\beta(\lambda_i, l)$ и $\varepsilon(\lambda_i, l)$ – показатель обратного рассеяния и ослабления соответственно; $i = 1, \dots, n$, n – число рабочих длин волн; $A(\lambda_i, l)$ – аппаратная характеристика; $P_0(\lambda_i)$ – энергия зондирующего пульса. Оптические характеристики $\beta(\lambda_i, l)$ и $\varepsilon(\lambda_i, l)$ имеют две составляющие:

$$\beta(\lambda_i, l) = \beta_a(\lambda_i, l) + \beta_m(\lambda_i, l); \quad (2)$$

$$\varepsilon(\lambda_i, l) = \varepsilon_a(\lambda_i, l) + \varepsilon_m(\lambda_i, l). \quad (3)$$

Здесь символы a и m обозначают аэрозольную и молекулярную компоненты соответственно. Значения $\beta_m(\lambda_i, l)$ и $\varepsilon_m(\lambda_i, l)$ рассчитываются на основании данных метеорологических измерений. Чтобы обеспечить замкнутость системы уравнений (1)–(3), необходимо дополнительно ввести соотношения, связывающие параметры $\beta_a(\lambda_i, l)$ и $\varepsilon_a(\lambda_i, l)$. Была использована методика оптимальной линейной оценки [3], в которой показатель аэрозольного ослабления определяется посредством линейной формы

$$\varepsilon_a(\lambda_i) = \sum_{j=1}^n c_{i,j} \beta_a(\lambda_j). \quad (4)$$

Коэффициенты $c_{i,j}$ определялись с учетом априорной информации об исследуемом аэрозоле в соответствии с алгоритмом, описанным в [4]. При одноволновом зондировании методика эквивалентна априорному заданию лидарного отношения для частиц атмосферного аэрозоля. При переходе к многоволновому зондированию информационное содержание набора параметров $\beta_a(\lambda_i, l)$ позволяет построить соотношения вида (4), обеспечивающие достаточную точность оценки $\varepsilon_a(\lambda_i, l)$ при весьма общих предположениях о структуре аэрозольных частиц. При $n = 7$ ошибка оценки составляет порядка 15% [5].

Решение системы уравнений (1)–(4) проводилось в соответствии с алгоритмом, изложенным в [6]. Рассчитанные значения $\beta_a(\lambda_i, l)$ для референтной длины волны 532 или 694 нм использовались для оценки массовой концентрации аэрозоля M посредством простого соотношения

$$M = \mu(\lambda_i) \beta_a(\lambda_i). \quad (5)$$

Следуя обычной практике, значения параметра μ определялись по результатам калибровочных измерений, когда вблизи трассы зондирования по стандартной методике [7] проводился отбор проб аэрозоля на фильтры с последующим их взвешиванием. Погрешность оценки массовой концентрации этим методом в краткосрочных пробах может

составлять до $0,1 \text{ мг/м}^3$ [8]. Среднее значение μ для длины волны 694 нм составило $20 (\text{мг}\cdot\text{км}\cdot\text{стр})/\text{м}^3$, относительное отклонение – порядка 60%. Известно, что значение параметра μ существенно зависит от вида аэрозоля, влажности воздуха и является величиной вариабельной [9–11]. По этим причинам мы стремились совмещать калибровку с измерениями пространственного распределения концентрации аэрозоля. В этом случае, при однородной структуре аэрозоля, погрешность оценки массовой концентрации приближается к погрешности реперных измерений. При изменении микроструктуры частиц погрешность определения M возрастала вследствие разброса коэффициента μ в указанных выше границах.

Важной задачей экспериментальных работ являлось исследование потоков аэрозольной компоненты в атмосфере. Чтобы оценить величину потока аэрозоля через некоторую границу, в дополнение к пространственному распределению массовой концентрации необходима информация о поле ветра. В наших расчетах поле ветра считалось горизонтально однородным. Вертикальное распределение скорости ветра задавалось посредством эмпирической модели [12–14] (см. в разд. 6). Исходными величинами являлись данные метеорологических измерений метеостанцией, а также измерения скорости и направления ветра непосредственно вблизи лидарной станции на уровне порядка 10 м. В тех случаях, когда в районе работ имелись доступные высотные объекты, мы проводили измерения скорости ветра также на более высоких уровнях. Работы чаще всего проводились в вечернее время при безразличной или слабоустойчивой стратификации атмосферы.

5. Экспериментальные исследования аэрозольных полей в промышленной зоне

Измерения распределения массовой концентрации аэрозольного загрязнения посредством лидарных станций проводились в районах всех четырех калийных комбинатов. На рис. 2, а представлена схема эксперимента по зондированию аэрозоля в районе комбината «Калий-2».

В пределах периметра обогатительной фабрики на схеме указано расположение высотных труб комбината, через которые производятся выбросы пыли из различных технологических установок. Массив лидарных данных, полученный при сканировании направления зондирования по углу места и азимуту, отражал пространственное распределение массовой концентрации аэрозоля $M(r)$ в зоне комбината. Каждый эксперимент длился 3–6 ч, и измерительный цикл повторялся 2–4 раза. В процессе обработки экспериментальных данных строились карты распределения концентрации аэрозоля M по горизонтальным и вертикальным сечениям. Карты распределения концентрации пыли по горизонтальным сечениям использовались для выявле-

ния зон, где превышались допустимые уровни загрязнения атмосферы. Распределения M по вертикальным сечениям, проекции которых на горизонтальную плоскость отмечены на рис. 2, а цифрами 1–6, и результаты измерения скорости и направления ветра в приземном слое были исходными данными для оценки потоков аэрозольной компоненты в атмосфере и мощности источников выбросов. Эксперименты по зондированию атмосферы в районах других комбинатов проводились по аналогичной схеме.

Результаты исследований степени загрязнения атмосферы в районах калийных комбинатов были представлены в виде карт пространственного распределения массовой концентрации пыли по горизонтальному сечению на высоте 10–15 м (см. рис. 2). Данные измерений предварительно усреднялись за период 3–6 ч. Таким образом сглаживались короткопериодные изменения структуры аэрозольных полей, вызванные флуктуациями мощности выбросов и изменениями направления ветра. Карты распределения массовой концентрации аэрозоля были построены для окрестностей каждого из четырех комбинатов. Измерения повторялись в течение 1992–1994 гг. при различных вариантах включения технологических установок и степени загрузки предприятий. Изучение этого экспериментального материала показало, что в направлениях ветрового переноса на расстояниях до 2–3 км существуют зоны устойчивого превышения санитарных норм (среднесуточная ПДК = $0,15 \text{ мг/м}^3$ [8]). Проведенные измерения позволили оценить уровни загрязнения и границы отдельных зон.

При рассмотрении карт концентрации аэрозоля обнаруживались зоны, источники загрязнения которых трудно было определить. Вероятным объяснением является значимый вклад вторичного ветрового подъема пыли, осаждающейся в промышленной зоне комбината. Предположение о существенной роли данного механизма пылеобразования было сделано в [13] на основании анализа изменений соотношения ионного (K, Na, Cl) состава пыли.

Расчет мощности выбросов аэрозольной компоненты проводился на основе анализа распределений концентрации аэрозоля по вертикальным сечениям. В районе каждого комбината, в соответствии с требуемой детальностью разрешения и расположением источников выбросов, определялись азимутальные углы, задававшие ориентацию плоскостей вертикальных сечений, в которых измерялись распределения массовой концентрации аэрозоля.

На рис. 2 штриховыми линиями показаны проекции плоскостей вертикальных сечений соответствующего номера в районе калийных комбинатов № 2 и 4. Карты распределений концентрации аэрозоля в плоскостях сечений посредством изолиний

представлены на рис. 3. Совокупность концентрических линий (рис. 3, б) является сечением следа выброса из высотной трубы комбината. Трансформация распределений концентрации аэрозоля

от сечения 6 (рис. 3, б) до сечения 3 (рис. 3, а) обусловлена включением новых источников выбросов при переходе от наветренной к подветренной стороне комбината.

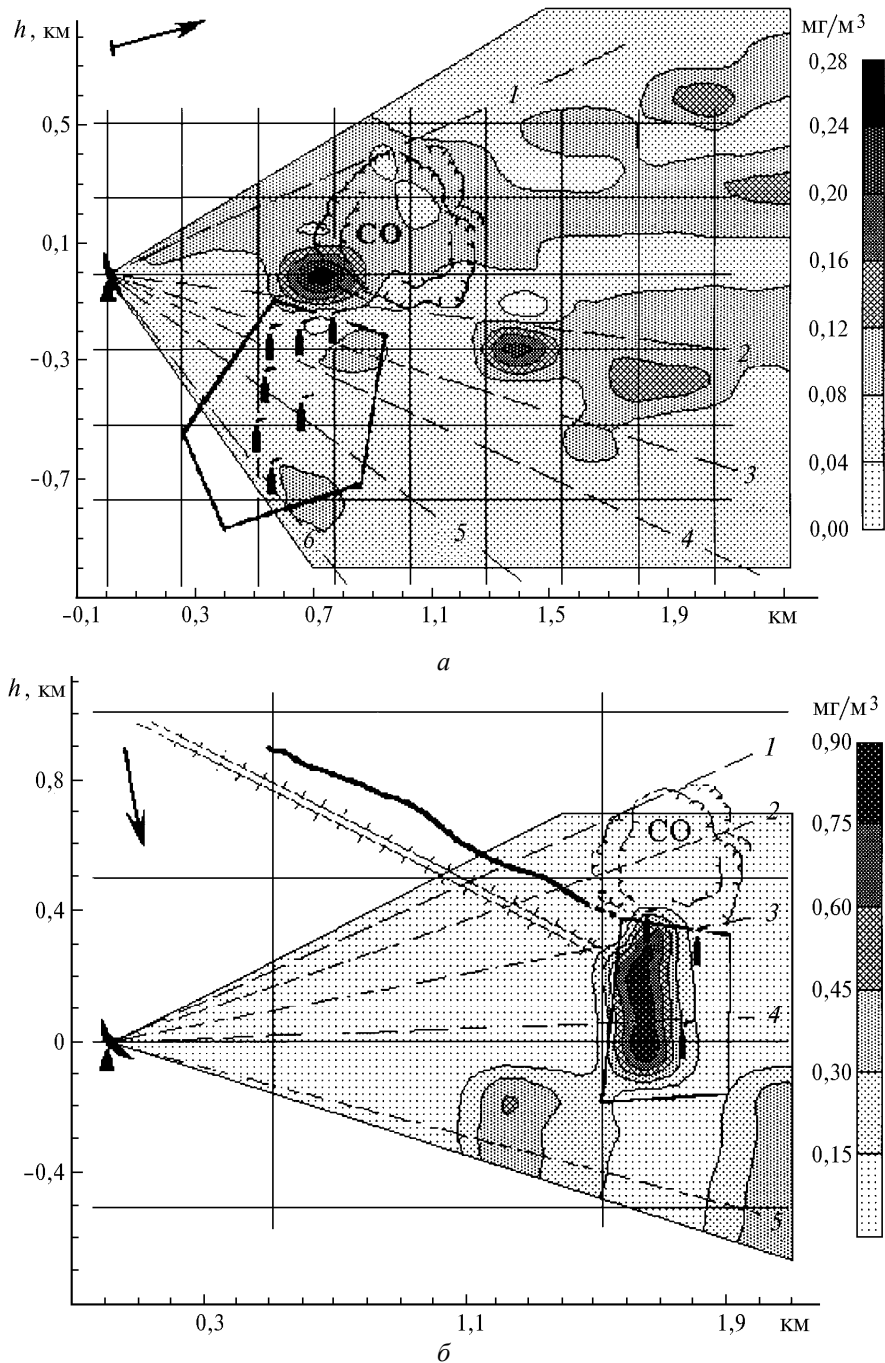
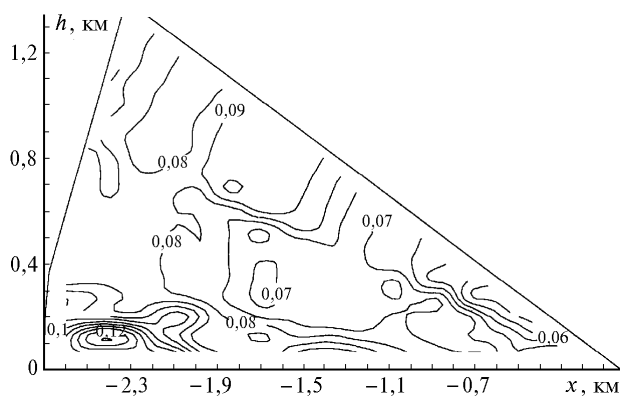


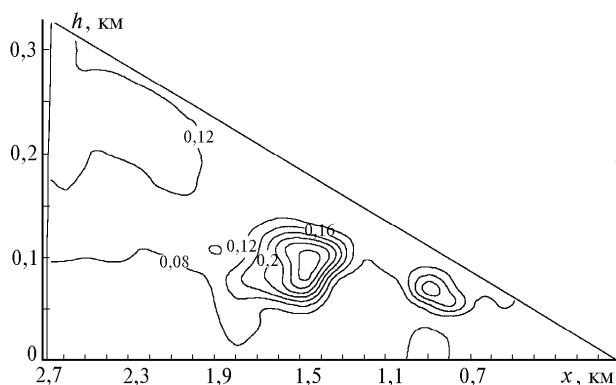
Рис. 2. Распределение массовой концентрации аэрозоля в районах калийных комбинатов (горизонтальное сечение): а – «Калий-2», 09.07.93; б – «Калий-4», 05.07.93. Стрелка – направление ветра; СО – солеотвалы; 1–6 – проекции вертикальных сечений

Для серии измерений строилась модель вертикального распределения скорости ветра (см. разд. 6) и определялись потоки аэрозольной компоненты через выделенные плоскости. Мощности выбросов источников, находящихся между выделенными плос-

костями, определялись как разность потоков между соответствующими сечениями. В результате мы получали оценку суммарной мощности выбросов пыли комбинатом, а также определяли вклад отдельных его объектов.



а



б

Рис. 3. Распределение массовой концентрации аэрозоля в районе комбината «Калий-2», 09.07.93: а – сечение 3, б – сечение 6 (см. рис. 2, а)

Следует отметить, что подобное детальное изучение трансформации аэрозольного поля над территорией комбината возможно было провести только при небольшой загрузке технологических установок. В противном случае высокая оптическая плотность аэрозольных шлейфов не позволяла провести лидарные измерения. Кроме этого здесь могут проявляться эффекты трансформации микроструктуры аэрозоля после выбросов из факелов труб [10].

В табл. 1 приведены результаты оценок суммарной мощности выбросов пыли калийными комбинатами, выполненных по изложенной выше методике. Расчетные значения предельно допустимых выбросов с учетом особенностей технологических процессов на предприятиях и их номинальной загрузки составляют для комбинатов величины, приведенные в колонке 5 табл. 1. В период измерений летом и осенью 1993 г. загрузка комбинатов была минимальной, что и объясняет существенно меньшие величины мощностей выбросов, измеренных в эксперименте. Проводя повторные лидарные измерения в той же последовательности через промежуток времени порядка одного часа, мы обычно получали разницу оценок порядка 15–30%. Постепенное снижение мощно-

сти выбросов комбината «Калий-1» отражает процесс вывода из эксплуатации технологических установок. Чрезвычайно высокая мощность выбросов комбинатом «Калий-2» 08.07.93 в 22 ч, вероятно, связана с нарушением технологических условий производства.

Таблица 1

Мощности выбросов калийными комбинатами

Комбинат	Дата измерения	Время измерения начало/конец	Мощность выбросов, т/г.	Мощность выбросов (ПДВ) [1], т/г.
«Калий-1»	24.06.93	21–40/23–10	662	1327
	28.06.93	22–30/24–00	508	–
	29.06.93	21–55/23–57	315	–
	30.06.93	21–34/23–40	243	–
	01.07.93	22–10/23–30	79	–
«Калий-2»	08.07.93	20–47/21–15	950	1443
	08.07.93	21–20/22–36	4813	–
	09.07.93	20–05/22–40	300	–
«Калий-3»	01.10.93	17–30/20–00	81	1043
«Калий-4»	05.07.93	22–12/23–59	662	785
	07.07.93	20–40/23–30	465	–

Особый интерес представляла оценка интенсивности ветрового выноса аэрозоля из отвалов отработанных пород, поскольку необходимо было выяснить значимость данного канала засоления окружающей территории. Лидарные измерения показали, что при небольших скоростях ветра не наблюдается значительного увеличения концентрации аэрозоля над поверхностью отвалов. Тем не менее вследствие большой площади отвалов, составляющих для каждого комбината несколько квадратных километров, их суммарный вклад может быть значительным. Лабораторные исследования интенсивности сдува пыли с образцов породы позволили выяснить зависимость этой величины от некоторых характеристик состояния образца и скорости воздушного потока [14]. Однако возможная погрешность оценки значений мощности выбросов такого источника оставалась большой, поскольку велика неопределенность в выборе параметров, определяющих реальные условия на исследуемом объекте.

Лидарные исследования, направленные на оценку мощности выноса аэрозоля из отвалов породы, были проведены в районе комбината «Калий-4». Данный комбинат находится вдали от города и других локализованных источников загрязнения, которые могли бы существенно исказить результаты. Измерения были выполнены 05.07.93 г. Ветер имел направление вдоль линии от отвалов к комбинату (рис. 2, б). Скорость ветра была 2–3 м/с. Распределение концентрации аэрозоля измерялось в плоскости сечений 1 и 2, охватывающих 1/2 площади отвалов. Разность потоков дала оценку мощности выбросов, составляющую 6% от суммарной мощности комбината.

6. Математическое моделирование процесса переноса аэрозоля

Значительный объем выбросов пыли в атмосферу на калийных комбинатах, а также большая высота труб, через которые они производятся, обуславливают влияние этих выбросов на экологическую обстановку на большой территории. Провести измерения и получить экспериментальные данные, достаточно подробно характеризующие пространственно-временную изменчивость полей загрязнений при различных метеорологических ситуациях, представляется трудоемким и дорогим мероприятием. Поэтому важной составной частью комплексной работы по экологическому обследованию региона являлась обработка математической модели процесса переноса загрязнения.

Распространение загрязняющих веществ в атмосфере определяется усредненным движением среды как целого, диффузией за счет турбулентности и гравитационным оседанием частиц. Совместное описание этих процессов проводилось на основе уравнения турбулентной диффузии для концентрации примеси $M(x, y, z)$, где ось x совпадает с направлением ветра, а ось z направлена вертикально вверх. Мощность источника примеси и скорость поглощения примеси на подстилающей поверхности учитывались в граничных условиях. Учитывая, что поперечное (вдоль оси y) распределение концентраций определяется, в основном, флуктуациями направлений ветра, концентрацию примесей можно приближенно представить в виде [15]:

$$M(x, y, z) = p(x, y) q(x, z). \quad (6)$$

Задача сводится к численному решению двумерного уравнения диффузии для проинтегрированной вдоль оси y концентрации $q(x, z)$ и последующему умножению на известную из эксперимента [15, 16] функцию $p(x, y)$, определяющую поперечное распределение концентраций. В приземном слое (ПС) атмосферы, простирающемся до 10–50 м, высотные зависимости скорости ветра $u(z)$ и коэффициента турбулентной диффузии $k(z)$ определяются по теории Монина–Обухова [12], согласно которой

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u^*}{\chi z} \phi(\xi), \quad k_z(z) = \frac{\chi u^* z}{\phi(\xi)}, \quad (7)$$

$$\phi = \begin{cases} 1 + \beta \xi, & \xi \geq 0 \\ (1 - \gamma \xi)^{-1/4}, & \xi \leq 0 \end{cases}, \quad \xi = z/L, \quad L = -\frac{TC_p \rho (u^*)^3}{\chi g H}, \quad (8)$$

где u^* – скорость трения; y – постоянная Кармана; ϕ – универсальная функция, ее аппроксимация дается выражением (8); β и γ – константы, $\beta = 6$, $\gamma = 16$; T и ρ – приземные температура и плотность воздуха; C – теплоемкость воздуха; H – турбулентный вертикальный поток тепла; g – ускорение свободного падения;

L – длина Монина–Обухова, количественная характеристика степени устойчивости атмосферы.

Для определения скорости ветра и коэффициента диффузии на высотах, превышающих ПС, использовались универсальные профили, полученные Л.Н. Бызовой с сотрудниками [16–19] на основе данных многолетних измерений метеопараметров на 300-метровой высотной мачте и результатов численного моделирования структуры атмосферного пограничного слоя (АПС). Температурная стратификация атмосферы, от которой существенно зависят высотные распределения $u(z)$ и $k(z)$, определялась по таким метеохарактеристикам, как высота и балл облачности, дальность видимости и скорость ветра на высоте флюгера, а также по времени суток и календарному дню [20].

На рис. 4 представлено сопоставление лидарного эксперимента и результатов расчета распределения по осям y и z концентрации частиц, выбрасываемых трубой калийного комбината. В результате измерений было установлено, что на расстоянии 0,5–1 км от трубы максимальная концентрация составляет приблизительно 2 мг/м^3 при характерном поперечном размере в направлении y и z порядка 100 и 20 м соответственно.

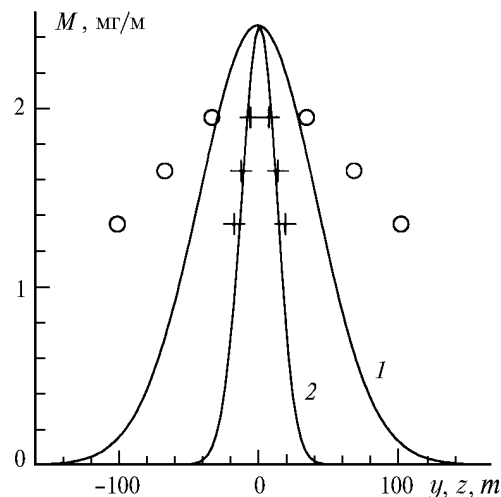


Рис. 4. Сопоставление рассчитанных и измеренных распределений концентрации частиц в струе по оси y (соответственно кривая 1 и маркеры O) и по оси z (кривая 2 и маркеры +)

Расчет распределения примеси от точечного источника проводился в плоскости, перпендикулярной направлению ветра на расстоянии 700 м от трубы [14]. Высота трубы была равна 100 м, скорость ветра на высоте флюгера была 2,8 м/с, радиус частиц считался равным 1 мкм. Стратификация атмосферы предполагалась слабоустойчивой, что соответствует вечерним условиям проведения эксперимента. Как видно на рис. 4, результаты расчета достаточно хорошо согласуются с данными лидарных измерений распределения концентрации пыли в факеле.

Описанная методика расчета рассеяния примесей от отдельных источников использовалась при

разработке компьютерной модели оценки и прогноза состояния воздушного бассейна Солигорского района. Входные параметры модели рассеяния примесей включают метеоданные и характеристики источников выбросов – мощности выбросов различных компонент из труб и значения потоков соляных (NaCl) частиц с поверхности солеотвалов. Мощности выбросов из труб определялись на основе технических характеристик отдельных установок комбинатов, информации о загрузке комбинатов, предоставленной в ПО «Беларуськалий», и результатов экспериментальных измерений. Средний размер соляных частиц находился по данным натуральных экспериментов [13].

Для верификации модели использовались результаты измерений приземной концентрации и плотности выпадения соляной пыли. Для сбора образцов выпадений использовались марлевые планшеты. Концентрация пыли измерялась с помощью изокинетических пробоотборников. Планшеты устанавливались вдоль дороги, соединяющей 1-й и 4-й комбинаты; места установки планшетов обозначены на схеме (см. рис. 1) буквами *A, B, C, D*. Образцы выпадений накапливались в течение трех суток, причем марля на планшетах менялась каждые сутки. Ткань с планшетов и фильтры пробоотборников изолировались, и с помощью ионно-селективных электродов определялись концентрации ионов K, Na и Cl, которые отражают значения скоростей выпадения и концентраций пыли NaCl и KCl.

Таблица 2

Рассчитанные и измеренные усредненные плотности выпадения элементов K и Na (мкмоль/м²-сут)

Пункт	K		Na	
	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет
<i>A</i>	5,5	10,6	116	215
<i>B</i>	1,6	1,3	87	10
<i>C</i>	1,0	0,85	109	7
<i>D</i>	0,86	2,8	90	191

При проведении сопоставлений с экспериментальными данными расчеты выполнялись для ситуаций с временным интервалом 3 ч (интервал, с которым измеряются метеоданные) с последующим усреднением для 3 суток. Результаты измерений и расчетов приведены в табл. 2. Следует отметить удовлетворительное согласие расчетов и экспериментов для K (KCl). Для Na (NaCl) приемлемое согласие отмечается лишь в пунктах измерения, расположенных рядом с источниками пыли (солеотвалами). Несовпадение рассчитанных и измеренных пространственных распределений концентраций и плотностей выпадения NaCl может быть обусловлено наличием невыявленного источника поступления пыли NaCl, имеющего, вероятно, распределенный характер.

7. Заключение

Использование лидарной аппаратуры в исследовании процессов пылевых выбросов, формирования полей аэрозольного загрязнения, его переноса и выпадения обеспечило получение экспериментальных данных о параметрах источников выбросов и структуре аэрозольных полей промышленного региона, которые другим способом получить невозможно или чрезвычайно дорого. Однако только комплексный характер проведенных исследований позволил получить результаты, которые непосредственно должны учитываться при проведении мероприятий по улучшению экологической обстановки в регионе: были определены мощности конкретных источников выбросов, выявлены зоны высокой концентрации загрязнения, дана оценка значимости атмосферного канала в засолении почвы окружающих сельхозугодий.

Эффективность использования лидарной технологии в экологическом обследовании может существенно возрасти, если будут решены некоторые методические и технические вопросы лазерного зондирования. Для оценки мощностей выбросов и исследования процессов переноса загрязнения важно получить действительную картину распределения скорости и направления ветра в пограничном слое атмосферы. Реальным способом решения этой задачи может быть тот же метод лазерного зондирования: доплеровский лидар или метод корреляционного анализа. Другим направлением совершенствования лидарной методологии в задачах экологического мониторинга аэрозольной компоненты может быть полномасштабное применение многоволновых поляризационных лидаров. В этом случае может быть повышена точность оценки массовой концентрации аэрозоля, проведена его классификация, расширены границы применения лидарного метода при зондировании оптически плотных аэрозольных слоев посредством коррекции вклада многократного рассеяния.

1. Матвеев А.В., Лиштван А.А., Ковалев А.А. и др. Экологорадиационный паспорт административного района (на примере Солигорского района). Минск. 1994. 76 с. (Препринт/Республиканский научно-технический центр дистанционной диагностики природной среды «Экомир», N 25).
2. Бородавка А.Н., Гитлин Е.М., Губский В.И. и др. // Каталог приборов. Минск: Наука и техника, 1988. С. 28–29.
3. Chaikovsky A.P., Shcherbakov V.N., Tauroginskaya S.B. // 17th International Laser Radar Conference. Abstracts of Paper. Japan. 1994. P. 18–19.
4. Таурогинская С.Б., Чайковский А.П., Щербаков В.Н. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 10. С. 1388–1397.
5. Иванов А.П., Чайковский А.П., Осипенко Ф.П. и др. // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 1994. Т. 30. N 3. С. 411–416.
6. Мильке Б., Щербаков В.Н. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. N 3. С. 308–313.
7. Руководство по контролю загрязнения атмосферы / Руководящий документ 5204 186-89. М.: Госкомгидромет СССР – Минздрав СССР. 1991.

8. Андрюков В.П., Пудовкина И.Б. // Метеорология и гидрология. 1993. N 1. С. 101–107.
9. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей / В.Е. Зуев, Б.В. Кауль, И.В. Самохвалов и др. Новосибирск: Наука, 1986. 188 с.
10. Матвиенко Г.Г. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 1–2. С. 242–264.
11. Балли Ю.С., Разенков И.А. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. N 2. С. 169–188.
12. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Ч. 1. М.: Наука, 1965. 639 с.
13. Бриль А.И., Другаченок М.А., Кабашиков В.П. и др. Исследование ветрового распространения соляной пыли в Солигорском промышленном районе. Минск, 1993. 50 с. (Препринт /РНТЦ «Экомир», N 12).
14. Бриль А.И., Кабашиков В.П., Ковалев А.А. и др. Разработка математической модели процессов поступления, рассеяния и осадения аэрозольных и газообразных примесей в воздушном бассейне Солигорского промышленного района. Минск, 1994. 56 с. (Препринт/РНТЦ «Экомир», N 20).
15. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 448 с.
16. Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 341 с.
17. Бызова Н.Л., Шнайман В.Л., Бондаренко В.Н. // Метеорология и гидрология. 1988, N 11. С. 75–83.
18. Типовые характеристики нижнего 300-метрового слоя атмосферы по измерениям на высотной мачте / Под ред. Н.Л. Бызовой. М.: Гидрометеиздат, 1982. 67 с.
19. Бызова Н.Л., Кулижникова Л.К. // Метеорология и гидрология. 1996. N 5. С. 60–69.
20. Атмосфера: Справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 508 с.

Институт физики Академии наук Беларуси
 Институт радиобиологии Академии наук Беларуси
 РНТЦ «Экомир»

Поступила в редакцию
 6 мая 1997 г.

Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды, Минск, Беларусь

A.P. Ivanov, A.P. Chaikovskiy, F.P. Osipenko, I.S. Khutko, M.M. Korol, V.N. Shcherbakov, V.P. Kabashnikov, A.I. Bril, V.M. Popov, A.A. Kovalev, A.M. Samusenko, M.A. Drugachenok. **Aerosol Atmosphere Pollution Investigation at an Industrial Region with Lidar Employment.**

Methods of lidar stations' application while carrying out ecological investigation of an industrial region (Soligorsk as an example) are presented. The lidars were used for dust ejection sources identification, for receiving maps of distribution of dust mass concentration and estimation of its precipitation rate. On the basis of lidar measurements, the dust ejections' power of industrial enterprises and their separate technological installations are estimated. Contribution of distributed polluting sources, such as exhausted rock disposal areas, construction sites, etc. is defined.

Taking into account all accumulated information, a mathematical model of aerosol pollution transferring process in the region investigated has been created. The incoming parameters of the model were the measured power of ejection sources and meteorological parameters. The results of calculating aerosol concentration in the near ground layer and of precipitation rate have been compared with the measurements. The model is realized in the form of PC program and may be applied to prediction of atmosphere pollution at change of capacity of industrial enterprises and meteorological parameters.