

С.А. Громов, В.А. Гинзбург

## МАКРОМАСШТАБНАЯ ОЦЕНКА АНТРОПОГЕННОЙ ЭМИССИИ СВИНЦА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

*Институт глобального климата и экологии Росгидромет и РАН, Москва*

Поступила в редакцию 3.03.99 г.

Принята к печати 30.03.99 г.

Расчитана эмиссия свинца от автотранспорта и от электростанций (ТЭС и ГРЭС), работающих на угле, на территории СССР в 1990 г. Выбросы от автотранспорта были определены по количеству сжигаемого бензина, содержащего свинец в качестве присадок (68–80% от общего количества потребленного бензина). Эмиссия свинца от электростанций была рассчитана по техническим и экономическим показателям работы оборудования станций и с использованием коэффициентов эмиссии свинца при сжигании различных видов топлива. Расчет коэффициентов эмиссии базировался на принципе баланса массы при сжигании топлива. Полученные результаты, хотя и содержат в себе некоторую неопределенность, являются приемлемыми для характеристики нагрузок загрязняющих веществ на больших территориях.

### Введение

Развитие современного мира невозможно представить себе без использования металлов, однако одновременно с этим все более насущной становится проблема утилизации отходов. Год от года через атмосферу в окружающую среду попадает все большее количество выбрасываемых предприятиями газов и аэрозолей, содержащих токсичные компоненты, которые, постепенно распространяясь в атмосфере, достигают территорий, удаленных на значительные расстояния от источников, и неизбежно попадают в трофические цепи животных и человека. Многие тяжелые металлы, благодаря их токсичности, признаны глобальными загрязняющими веществами. Их участие в биохимических циклах, накопление и перераспределение внутри отдельных компонент природной среды на фоне значительных антропогенных выбросов приводят к нарушению естественного баланса в биосфере и вызывают негативные последствия для окружающей среды и человека. В связи с этим большое внимание в последнее время стали уделять проблеме загрязнения тяжелыми металлами экосистем и биосферы в целом.

Одним из наиболее токсичных металлов, представляющим наибольшую опасность для окружающей среды, является свинец. Объемы поступления свинца в воздушную среду от антропогенных источников меньше, чем в водные акватории и в почву, однако атмосферная эмиссия тяжелых металлов приводит к экологическим проблемам не только на локальном, но и на региональном и глобальном уровнях за счет переноса от источника выброса к удаленным территориям, осаждения и аккумуляции в почве и в воде.

Свинец поступает в атмосферу с аэрозолями природного и антропогенного происхождения. Процентное распределение выбросов по основным источникам его поступления в атмосферу приведено на рис. 1 [1, 2]. Основным антропогенным источником свинца является автотранспорт. Согласно глобальным оценкам [1–5] 210–250 тыс. т свинца в год в форме высокодисперсного аэрозоля поступает в атмосферу при сжигании бензина авто-

транспортом, что составляет 62–76% от общего антропогенного выброса и почти в 18 раз превышает его природное поступление в атмосферу.

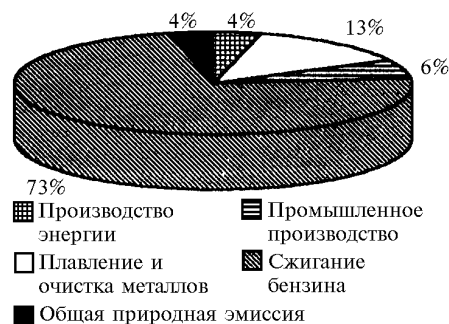


Рис. 1. Основные источники поступления свинца в атмосферу

Эмиссия Pb от предприятий электроэнергетики определяет около 4% суммарного потока, но, несмотря на то, что в атмосферу при сжигании топлива поступают микроколичества свинца, даже такие небольшие нагрузки могут представлять значительную опасность для природных экосистем и здоровья населения. Кроме того, за счет поступления в воздух из высоких дымовых труб (более 100 м) аэрозоли распространяются на большие территории и определяют глобальный и региональный фон загрязнения при дальнем переносе примесей в атмосфере. Однако в результате анализа существующих статистических данных [6–9] было обнаружено, что эмиссии тяжелых металлов от предприятий электроэнергетики уделяется недостаточно внимания и данные по объемам выбросов этих веществ явно занижены.

При решении проблемы формирования регионального уровня загрязнения воздуха тяжелыми металлами провести экспериментальную оценку влияния каждого из источников невозможно. Поэтому встает вопрос об использовании оценочных методов определения концентраций микроэлементов в выбросах. В данной статье обсуждаются методы и приводятся результаты расчетов

выбросов свинца при сжигании угля на электростанциях и бензина автотранспортом.

### Выбросы свинца от предприятий электроэнергетики

К сожалению, в настоящее время не существует единой разработанной методики по расчету выбросов тяжелых металлов от промышленных предприятий. Поэтому для решения задачи о расчете выбросов тяжелых металлов при сжигании угля на предприятиях электроэнергетики был разработан и использован метод, основанный на балансе массы элемента при сжигании угля, т.е. на разнице масс элемента, поступившего в печь с углем, удаленного из печи со шлаками и уловленного золоулавливателем.

При сжигании топлива в котельных установках на электростанциях часть золы, имеющейся в исходном угле, уходит в шлаки и удаляется из котла, часть покидает камеру сжигания в виде летучей золы и попадает на золоулавливающие электрофильтры. Эффективность электрофильтров, применявшихся на электростанциях в СССР, изменяется от 85 до 99% при средней эффективности 92%. Таким образом, не вся зола осаждается на золоулавливающем оборудовании, а в зависимости от его эффективности от 1 до 15% летучей золы выбрасывается в виде твердых частиц в атмосферу вместе с перегретыми газами. Соответственно значительная доля токсичных микроэлементов, содержащихся в золе ископаемых углей, при сжигании топлива осаждается на твердых частицах и выбрасывается в атмосферу.

Величиной, характеризующей поступление элемента в атмосферу при сжигании топлива, является коэффициент эмиссии  $k$ , зависящий от вида используемого топлива и технологии сжигания и определяющий массу отдельного загрязняющего вещества в выбросе на единицу используемого сырья. Следовательно, для электростанций, работающих на угле, необходимо учитывать тип печей, очистительных установок и дымовых труб. Трудность расчета баланса массы элемента при сжигании топлива на ТЭС заключается в том, что, во-первых, используемые угли, а значит и летучая зола, достаточно разнообразны по своему химическому составу, а во-вторых, используются разнообразные технологии сжигания угля.

В СССР в 1990 г. под управлением Минэнерго действовало около 300 электростанций. Оценка деятельности этих предприятий и их воздействия на окружающую среду крайне трудно поддается какой-либо классификации или унифика-

ции, так как данные об оборудовании, используемом топливе, методах его сжигания и очистке выбросов практически отсутствуют или представлены в виде отдельных указаний и ссылок в различных справочниках и отчетах. На основе анализа существующих статистических и технологических данных было установлено, что основным способом сжигания топлива, применяемым на территории СССР, была пылеугольная топка с жидким или твердым (сухим) шлакоудалением. Следует отметить, что метод шлакоудаления является одним из принципиальных отличий различных технологий. В частности, это проявляется в распределении шлака и летучей золы, которое при сухом (твердом) шлакоудалении составляет 10–15% шлака на 85–90% золы, а при жидком шлакоудалении 30–40% на 60–70% соответственно. Для удобства дальнейшего использования обозначим в общем виде коэффициенты, показывающие доли золы угля, попадающие в летучую золу и шлак, через  $K_1$  и  $K_2$  соответственно.

Учитывая, что распределение золы и шлака является характерным параметром для каждой из технологий сжигания, и используя простые аналитические формулы, на основе литературных экспериментальных данных [10] о концентрации тяжелых металлов в золе исходного угля ( $C_{\text{coal ash}}$ ), в шлаках ( $C_{\text{slag}}$ ) и в летучей золе ( $C_{\text{fly ash}}$ ) были вычислены доли металла, попадающие в шлак ( $A$ ) и в летучую золу ( $B$ ):

$$A = K_2 \times C_{\text{slag}} / C_{\text{coal ash}}, B = K_1 \times C_{\text{fly ash}} / C_{\text{coal ash}}. \quad (1)$$

При известном содержании элемента в исходном угле на основании формулы

$$R_{\text{el}} = M(1 - A - B), \quad (2)$$

где  $M$  – масса элемента в исходном угле, было рассчитано количество элемента ( $R_{\text{el}}$ ), выбрасываемого с золой уходящих газов без учета эффективности очистительных сооружений. Для расчета коэффициента реальной эмиссии элемента необходимо ввести дополнительно эффективность очистительного оборудования ( $\eta$ ):

$$k_{\text{el}} = R_{\text{el}} \times (1 - \eta). \quad (3)$$

При расчете, по данным [10], средние значения  $A$  и  $B$  для свинца получаются равными соответственно 0,04 и 0,35, а  $R_{\text{el}} = 0,61M$ . Результаты расчета эмиссии свинца для различной эффективности очистительного оборудования приведены в табл. 1.

Таблица 1

Средний годовой выброс (т/г.) свинца для электростанций с различной мощностью

Параметр	Мощность, МВт					Всего
	> 1200	800–1200	400–800	200–400	< 200	
Количество станций данной мощности	31	5	40	48	4	128
Общая масса используемого угля, Мт	81,2	6,2	38,3	21,5	0,6	147,7
Произведенная энергия, млрд кВт·ч	377,9	26,0	110,7	62,7	3,4	580,7
Средний годовой выброс Pb от одной электростанции данной мощности при различной эффективности очистительного оборудования, т/год						
	85	11,55	5,43	4,20	1,97	0,67
	92	11,18	5,26	4,09	1,91	0,65
	99	10,63	5,0	3,89	1,82	0,62

### Оценка выбросов свинца от автотранспорта

Разработанные в СССР методики по расчету выброса вредных веществ, в том числе и свинца, автомобильным транспортом основаны на использовании удельных выбросов на единицу пробега автомобилей разных классов [11–13]. Их использование удобно и оправдано при оценке выбросов на небольшой (ограниченной городом, поселком и т.д.) территории, где можно собрать достаточно надежные данные по транспортной активности. К сожалению, уже на масштабах области достоверность необходимой для расчета статистической информации вызывает сомнения. Для получения крупномасштабных оценок выбросов свинца наиболее удобны расчеты по потреблению топлива с применением факторов эмиссии. При этом учитывается тот факт, что свинец не является продуктом сгорания бензина, а входит в состав в виде присадок и выбрасывается в воздух пропорционально потреблению бензина. Данный подход достаточно давно используется при оценке эмиссии свинца от автотранспорта за рубежом и в нашей стране [1, 14, 15]. Именно он был применен в данной работе.

Исходными материалами по потреблению автомобильного бензина являлись данные топливного баланса на территории СССР (по республикам, краям и областям), согласно которым общее потребление автомобильного бензина в 1990 г. составило 61271 тыс.т. Для расчета фактора эмиссии свинца в атмосферу необходимо знать его содержание в бензине и поведение в двигателе при работе автомобиля.

Практически все зарубежные авторы предполагают, что в целом в воздух поступает 75% содержащегося в бензине свинца [1, 16]. Согласно экспериментальным исследованиям, около 80% массы свинца, содержащегося в бензине, выбрасывается с выхлопными газами в воздух, остальное оседает на электродах, изоляторах и в выхлопной системе автомобилей. Эти данные достоверны для автомобилей с пробегом до 15000 км (первый год работы). В дальнейшем при эксплуатации выброс свинца с отработанными

газами повышается до 90% от содержащегося в бензине из-за уменьшения осаждения в выхлопных устройствах и частичного отслоения накоплений [11, 17].

В СССР в 1990 г. парк автомобилей составлял 51 на 1000 жителей, т.е. 14,8 млн. единиц ( $A_f$ ) [18]. В 1989 г. было произведено 1217,6 тыс. автомобилей ( $A_f$ ), имеющих в общем пробег в 1990 г. менее 15 тыс. км [19], следовательно, средневзвешенный коэффициент выхода свинца из транспортного средства (если принять сменяемость автопарка в 1990 г. в одинаковой пропорции во всех регионах) составляет

$$K_e = [0,9(A_f - A_f) + 0,8A_f]/A_f = 0,89. \quad (4)$$

Свинец с выхлопными газами выносится в виде частиц, до 80% которых имеют диаметр менее 5 мкм и долго не оседают на поверхность [11, 20]. Следовательно, для определения доли выброса, участвующего в атмосферном переносе и рассеянии, необходимо ввести коэффициент осаждения  $K_a = 0,8$ .

Выбросы при сжигании бензина обусловлены широким применением свинцовых присадок, являющихся антидетонационными агентами, для получения автомобильного бензина с высоким октановым числом. Согласно литературным данным [21–23] был сделан расчет для 1990 г. количества потребляемого топлива (тыс. т) по каждой марке бензина отдельно, а затем его части, подвергнутой этилированию. При этом было проведено уточнение процента бензина, содержащего свинец, для марки АИ. Результаты представлены в табл. 2 (в скобках приведен процент этилированной части для данной марки).

Общее содержание свинца в потребленном бензине на территории бывшего СССР в 1990 г., рассчитанное по данным табл. 2, составляет  $Q = 10781$  т (при средней плотности бензина 0,74 кг/л, являющейся ненормируемой величиной [24]). Общий выброс свинца в атмосферу на территории СССР в 1990 г. при потреблении бензина составляет

$$Q_a = Q \cdot K_e \cdot K_a = 7676 \text{ т}. \quad (5)$$

Таблица 2

Структура потребления бензина в СССР в 1990 г.

Марка Бензина	Признак	Содержание свинца, г/л	Потребление, тыс. т	
			всего	в т.ч. этилированный
А-72	Неэтилированный	0,013	3554	0 (0%)
А-76	Неэтилированный	0,013	49139	35396,6 (72)
	Этилированный	0,17		
АИ-93	Неэтилированный	0,013	8578	4548,5 (53)
	Этилированный	0,37		
АИ-95	Неэтилированный	0,013		
Сумма			61271	39945,1 (65)

Пространственное распределение эмиссии свинца от транспорта по территории СССР проводилось по квадратам 150×150 км расширенной сетки ЕМЕП пропорционально интенсивности движения. Для этого в квадратах сетки была оценена интенсивность транспортных потоков в баллах, определяемая по густоте и важности автомобильных дорог [25] (табл. 3).

Для каждого административного региона пространственное распределение потребления топлива производилось по формуле

$$Q_s = Q_r \cdot B_i \cdot P_i / \left( \sum_j B_j \cdot P_j \right), \quad (6)$$

где  $Q_s$  и  $Q_r$  – потребление бензина на территории ячейки внутри региона и в регионе в целом,  $B_i$  – транспортный балл;  $P_i$  – процент покрытия  $i$ -й ячейки территорией, относящейся к региону; индекс  $j$  показывает суммирование по всем ячейкам, покрывающим территорию региона. Факторы эмиссии свинца на территории СССР различаются вследствие разных пропорций используемых марок

топлива в регионах. Практически полное отсутствие данных и оценок в этом отношении заставило предположить, что вся неэтилированная часть бензина (за исключением марки А-72), более чистая с экологической точки зрения и используемая для современных двигателей, вне зависимости от марки топлива потребляется в квадратах

с интенсивностью транспортной активности  $B = 3 \div 5$  баллов, а весь высокооктановый АИ-93 – в квадратах с  $B = 4 \div 5$ . На основе этих предположений были рассчитаны средневзвешенные значения факторов эмиссии для квадратов с разной интенсивностью транспортной активности. Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 3

**Критерии оценки плотности автомобильных дорог**

Балл (B)	Критерии
0	Данные по этой территории отсутствуют или в данном квадрате отсутствуют какие-либо дороги с твердым покрытием
1	Существуют хотя бы 1–2 дороги общегосударственного или республиканского значения, но отсутствуют магистральные дороги общегосударственного значения
2	Присутствует хотя бы 1 магистральная дорога общегосударственного значения или негустая сеть прочих дорог общегосударственного и республиканского значений
3	Присутствие 1–2 магистральных дорог общегосударственного значения, дополняемое негустой сетью прочих дорог общегосударственного и республиканского значений, или густая сеть дорог общегосударственного и республиканского значений при отсутствии магистральных дорог
4	К одному городу сходятся 1–2 магистральные дороги общегосударственного значения и прочие дороги общегосударственного и республиканского значений или присутствие 1 магистральной дороги общегосударственного значения с густой сетью дорог общегосударственного и республиканского значения
5	К крупному городу сходятся 2 и более магистральных дорог общегосударственного значения и прочие дороги общегосударственного и республиканского значений или в одном квадрате существует два-три небольших центра схождения магистральных дорог общегосударственного значения и прочих дорог общегосударственного и республиканского значений

Таблица 4

**Результаты расчета параметров эмиссии свинца от автотранспорта**

Транспортная активность	Потребление бензина, тыс. т	Наличие неэтилированного бензина	Коэффициент эмиссии, г/т	Общий выброс свинца, т
1–2	16789,6	нет	160,0	2686
3	21306,6	да	72,8	1551
4–5	23174,8	да	148,4	3439

**Результаты и выводы**

В результате проведенных расчетов были получены данные о выбросах свинца в атмосферу на территории СССР в 1990 г. от двух основных антропогенных источников: сжигание бензина автотранспортом и сжигание

угля электростанциями. В данной статье основное внимание уделяется распределению выбросов свинца по различным экономическим районам России, которое отражено на рис. 2 и 3. Для региона Сибири (рис. 4) приведено распределение выбросов свинца по административным районам.

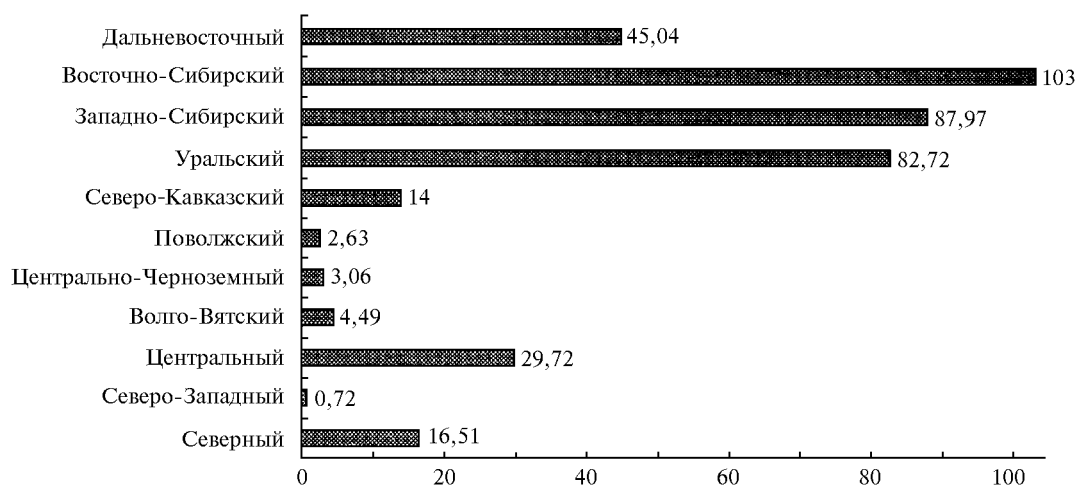


Рис. 2. Распределение выбросов свинца от сжигания угля на предприятиях электроэнергетики по экономическим регионам России (т/г.)

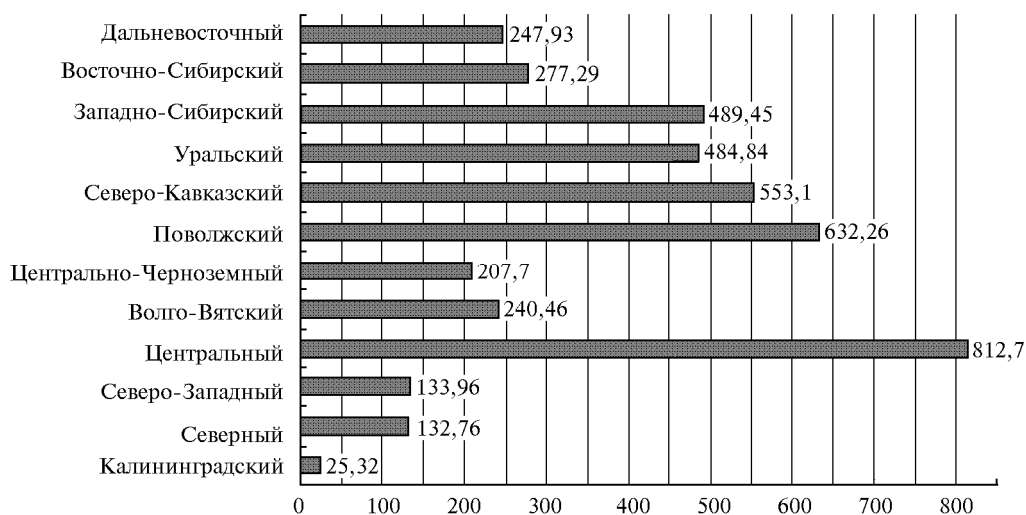


Рис. 3. Распределение выбросов свинца от автотранспорта по экономическим регионам России (т/г.)

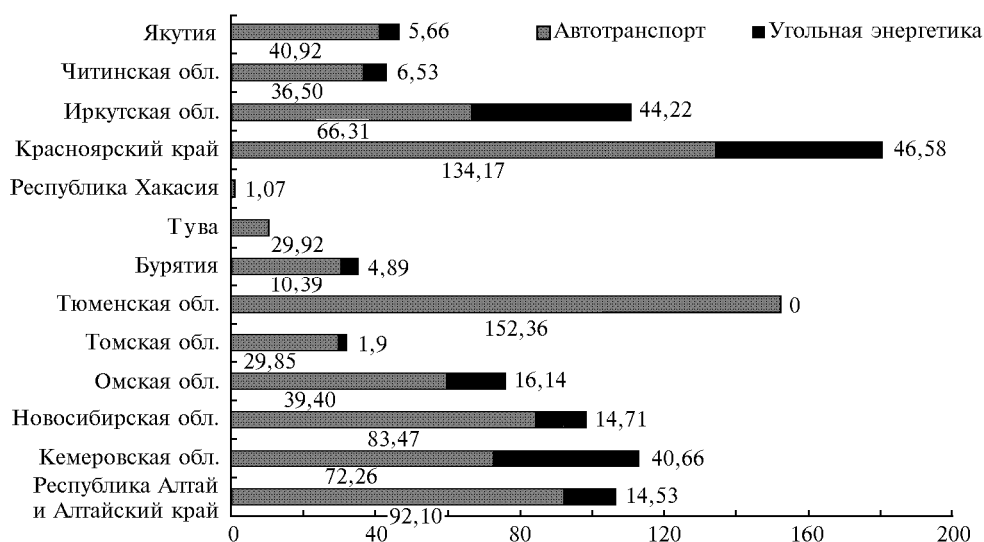


Рис. 4. Распределение выбросов свинца от автотранспорта и угольной энергетики по административным регионам Сибири (т/г.)

Выброс свинца от сжигания углей на электростанциях при средней эффективности очистительного оборудования 92% составил в 1990 г. 630,7 т для всей территории СССР. На территорию России приходится 390 т, из них около 190 т приходится на Западно-Сибирский и Восточно-Сибирский регионы. Распределение выбросов по экономическим регионам России представлено на рис. 2. От предприятий электроэнергетики больше всего свинца попадает в атмосферу на территории Восточно-Сибирского, Западно-Сибирского и Уральского регионов. Выбросы свинца от автотранспорта на территории СССР на 1990 г. составили 7,7 тыс. т, из них в России 4,23 тыс. т, на территории Западно-Сибирского и Восточно-Сибирского регионов – всего 766 т, а наибольший выброс свинца от автотранспорта приходится на Центральный регион России (см. рис. 3).

Полученные результаты, безусловно, содержат в себе некоторую неопределенность и не могут рассматриваться как абсолютно верные. Однако на основе сравнения с существующими статистическими данными [7,9,18] можно утверждать, что приведенные в статье методики расчета антропогенной эмиссии свинца являются приемлемыми

для аналитической оценки макромасштабной эмиссии, а полученные с их помощью результаты адекватно отражают реальную ситуацию.

Работа выполнена при финансировании Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 97-56-4666 и фонда Дж. и К. Маккартуров (исследовательский грант 1996 г.).

1. *Расуна J.M.* Atmospheric lead emission in Europe in 1982: NILU Report 18/88, 1988. 16 p.
2. *Nriagu J.* // Industrial Ecology and Global Change. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. P. 277–287.
3. *Ровинский Ф.Я., Громов С.А., Бурцева Л.В., Парамонов С.Г.* // Метеорология и гидрология. 1994. N 10. С. 5–14.
4. *Chemical pollution: a global overview.* 1992. Geneva, UNEP.
5. *Свинец в окружающей среде.* / Под ред. В.Т. Измерова. М.: Наука, 1987. 180 с.
6. *Шеховцов А.А., Звонов В.И., Чижов С.Г., Веселова Г.Н.* // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. ВИНТИ. 1994. Вып. 3. С. 1–28.
7. *Шеховцов А.А., Жильцов Е.В., Чижов С.Г.* Влияние отраслей экономики Российской Федерации на состояние природной среды в 1993–1995 гг. // М.: Метеорология и гидрология. 1997. 329 с.

8. Яценко-Хмелевская М.А., Цибульский В.В., Миляев В.Б. // Журн. экологической химии. 1994, 3(1). С. 3–15.
9. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Российской Федерации в 1994 г. М.: Изд-во Минприроды, 1995.
10. Егоров А.П., Лактионова Н.В., Попинако Н.В., Новоселова И.В. // Теплоэнергетика, 1979. N 2. С. 22–25.
11. Применение этилированных бензинов на автотранспорте и расчет выбросов свинца в окружающую среду / И.Л. Варшавский и др. М.: НТЦ «Москворечье», 1990. 41 с.
12. Методические указания по расчету выбросов вредных веществ автотранспортом. М.: Гидрометеониздат, 1983. 24 с.
13. Методика определения массы выбросов загрязняющих веществ автотранспортными средствами в атмосферный воздух. М.: Наука, 1993. 21 с.
14. Gromov S., Emelina E. Lead emission evaluation over the European part of the former Soviet Union // Sci. Total Envir. 1994. V. 158. P. 135–137.
15. Варшавский И.Л. // Материалы секции НТС Госкомприроды Российской Федерации. Протокол от 12 декабря 1990 г.
16. PARCOM–ATMOS Emission factors manual. Emission factors for air pollutants 1992. / Ed. P.F.J. van der Most. C. Veldt. 1992.
17. Соколов И.П. Эколого-экономические оценки на автотранспорте в условиях рынка и нового природоохранного законодательства. СПб.: Росгидромет, 1992. 34 с.
18. Народное хозяйство СССР в 1990 г.: Статистический сборник. М.: Финансы и статистика, 1991.
19. Автотранспорт и окружающая среда: Справочник / Л.А. Ахметов и др. Ташкент, 1990. 213 с.
20. An investigation of atmospheric lead particles from motor vehicles, mining and other sources. / H. Bloom et al. // In: Proc. of Intern. Clean Air Conference. 1978. P. 565–589.
21. Кружнов В.А. Организация природоохранной деятельности на автомобильном транспорте. М.: НИИАТ, 1990. С. 37–42.
22. Козлов И.Т. Экономика и экология использования низкооктановых бензинов в двухтопливных системах автомобиля / М.: Экотехнология и ресурсосбережение, 1993.
23. Панков Н. // Автомобильный транспорт. 1993. N 7. С. 16–17.
24. ГОСТ 2084–77. Автомобильные бензины.
25. Атлас автомобильных дорог СССР, 1990.

*S.A. Gromov, V.A. Ginzburg. Macro-scale Estimate of Pb Anthropogenic Emission on Territory of Russia.*

Lead emissions on the territory of Russia in 1990 are calculated. Emissions from vehicles were estimated based on the data on the leaded petroleum consumption in Russia (68–80% from the total consumption of petroleum). Total lead emission from vehicles on the territory of the former Soviet Union in 1990 were estimated as 7,7 thousand tonnes from which 4,23 thousand tonnes were emitted in Russia and less than 766 tonnes – in Siberia. Lead emissions from coal combustion at power plants were calculated using emission coefficients based on the technical and economical parameters of the plant's operation and fuel composition. The theory of mass balance was used for the calculation of emission coefficients.