

# ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

## СВИНЕЦ В ПОЧВАХ МЕХИКО: СОДЕРЖАНИЕ, ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ВАРИИРОВАНИЕ, ДОСТУПНОСТЬ ДЛЯ ЧЕЛОВЕКА

Н.С. Седов<sup>1</sup>, Н.А. Черных<sup>1</sup>, Ф.М. Ромеро<sup>2</sup>,  
О. Самора-Мартинес<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Экологический факультет  
Российский университет дружбы народов  
Подольское шоссе, 8/5, Москва, Россия, 113093

<sup>2</sup>Институт геологии  
Национальный университет Мексики  
Мехико, Мексика

Изучено распределение свинца в почвенном покрове одного из крупнейших мегаполисов мира — Мехико. Проведен сравнительный анализ содержания данного металла в почвах различных частей города и определена его доступность для организма человека. Установлено, что уровни содержания свинца на территории города варьируют в диапазоне 125—1186 мг/кг, что значительно превышает фоновые концентрации. Наибольшие количества элемента зафиксированы в центральных и южных районах города, что связано с длительностью и интенсивностью транспортной нагрузки. При этом данные районы характеризуются высокой степенью биологической доступности данного металла (от 60 до 100%).

**Ключевые слова:** загрязнение свинцом, городские почвы, пространственное варьирование, биодоступность, Мехико.

Среди разнообразных загрязняющих веществ, поступающих в окружающую среду, тяжелые металлы принадлежат к числу приоритетных. Это обусловлено, с одной стороны, масштабом загрязнения территорий данными элементами, с другой стороны, их способностью к аккумуляции в живых организмах. В городской среде одним из наиболее распространенных видов загрязнений является загрязнение свинцом в силу использования данного элемента в составе добавок к бензину. В настоящее время проведено множество исследований по содержанию соединений свинца в компонентах экосистем, однако проблема перехода Pb в организм человека не решена. Формы соединений свинца в почвах весьма разнообразны. Некоторые из них (ацетат свинца  $Pb(CH_3COO)_2 \cdot 3H_2O$ , закись  $Pb_2O$ , двуокись  $PbO_2$ ) легкодоступны и могут вовлекаться в биологический круговорот, усваивать-

ся человеком. Другие (например, сульфат свинца  $PbSO_4$ ) малодоступны для живых организмов [1].

В данной статье рассматривается проблема загрязнения свинцом почвенного покрова столицы Мексики — города Мехико, одного из самых загрязненных городов мира, а также поступление Pb в организм человека.

### Объекты и методы исследования

Мехико расположен почти в самом центре страны. Город раскинут на возвышенности в южной части Мексиканского нагорья и находится на высоте 2240 м над уровнем моря. Он занимает дно и склоны межгорной котловины, со всех сторон окаймленной горами вулканического происхождения (в 60 км на юго-восток находится крупный действующий вулкан Попокатепетль). Погодные условия столицы формируются под влиянием влажного субтропического климата. Средняя температура воздуха в январе составляет  $+12\text{ }^\circ\text{C}$ , в июле —  $+17\text{ }^\circ\text{C}$ , среднегодовое количество осадков — 750 мм. По причине высокого уровня загрязненности воздуха выхлопными газами в черте города над ним постоянно нависает густое облако смога. Город занимает лидирующее положение по численности населения. На данный момент проживает около 20 миллионов человек. Перенаселенность Мехико создает проблему высокой загруженности автомагистралей города, что негативно влияет на экологическое состояние окружающей природной среды.

Важнейшим моментом исследований тяжелых металлов является изучение их доступности для живых организмов. В мировой практике существует несколько подходов к изучению биодоступности тяжелых металлов для человека. Основных подходов два.

1. Традиционный подход дает очень достоверные данные. В основе лежат исследования на лабораторных животных. Основные подопытные животные — молодые свиньи, у которых биохимические процессы в пищеварительном тракте схожи с процессами в организме человека. Недостатком этого подхода является длительность исследований и высокая стоимость.

2. Для быстрых и массовых анализов все больше используют лабораторно-химические методы, имитирующие *in vitro* среду желудочно-кишечного тракта. В рамках этого подхода наиболее распространены два метода: последовательный метод, основанный на использовании пепсина и органических кислот [9], и метод SBRC для мышьяка, свинца и кадмия, основанный на использовании глицина [4].

Последовательный метод включает в себя и фазу воздействия на желудочный сок в кислой среде при pH 1,5 и фазу воздействия на кишечный сок при pH 7, для чего раствор нейтрализуется содой.

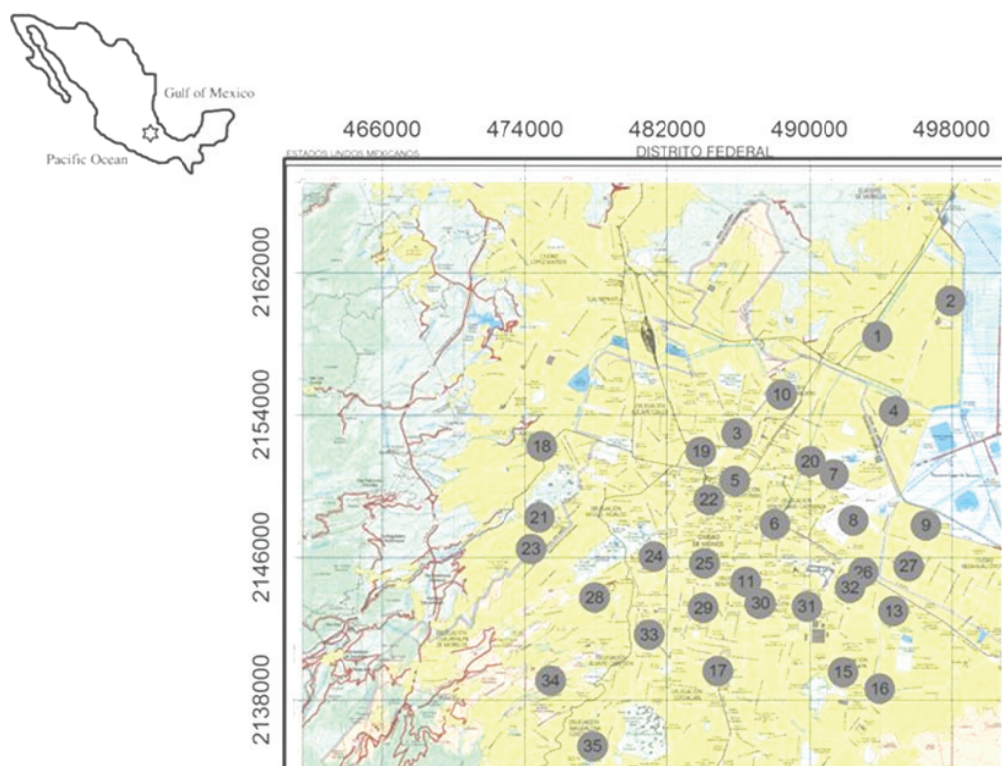
Метод SBRC включает в себя имитацию только желудочного сока при pH 1,5, что достигается добавлением соляной кислоты.

Оба метода химической симуляции были сопоставлены с данными экспериментов *in vivo* и продемонстрировали хорошую корреляцию.

В данной работе ускоренный анализ проводился более простым методом SBRC. Выбор этого метода обуславливался тем обстоятельством, что именно он предписан мексиканским нормативным документом Norma Oficial Mexicana

NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, определяющим правила обследования грунтов, загрязненных тяжелыми металлами, с целью их рекультивации.

Исследования по биодоступности свинца были проведены в городе Мехико в течение 2010—2011 гг. Для определения содержания свинца в почвах и его доступности для человека пробы почвы отбирались из различных районов города (рис. 1). Образцы фоновых почв были отобраны в пригородных районах г. Мехико, под естественной лесной растительностью.



**Рис. 1.** Карта отбора проб почвы в г. Мехико

Все отобранные образцы почв были доставлены в лабораторию экологической геохимии Института геологии Национального университета Мексики (*Universidad Nacional Autónoma de México*).

Перед проведением анализов образцы были высушены и просеяны стандартным ситом до размера  $< 250 \mu\text{m}$ , так как именно эта фракция является наиболее доступной для организма человека, особенно для детей.

Валовое содержание свинца в этой фракции определялось рентгеновским флуоресцентным методом при помощи портативного прибора PXRf “Niton XL3t” по методике USEPA6200 Environmental Protection Agency, USA.

Для приготовления вытяжки из почв использовали экстрагент, имитирующий желудочный сок человека, — к 1,9 л деионизированной воды добавляли 60,06 г глицина, раствор помещали на водяную баню ( $37 \text{ }^\circ\text{C}$ ), после чего добавляли соляную кислоту до уровня pH 1,50. Затем 1 г почвы заливали 125 мл полученного

раствора и помещали в специальный аппарат — экстрактор для перемешивания в течение 1 часа.

Концентрацию свинца в полученной вытяжке определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии по методике USEPA 7421 Environmental Protection Agency, USA. Таким образом, данный анализ позволяет оценить, сколько свинца может перейти в организм человека при попадании в желудок загрязненных частиц почвы. Биодоступность свинца вычисляется по формуле

$$\text{Биодоступность (\%)} = \left( \frac{\text{концентрация в вытяжке}}{\text{концентрация в почве}} \right) \cdot 100.$$

### Результаты исследования

В табл. 1 приведено среднее содержание химических элементов в почвах фоновых районов в пригороде Мехико.

Таблица 1

**Содержание химических элементов в почвах под естественной лесной растительностью**

| № образца           | Pb    | Se  | As  | Hg  | Ba  | Cd  | Cr  | V   | Zn  | Mn   | Mo  | Ni  | Co   | Zr  | Sr   | W   | Sb  |
|---------------------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|------|-----|-----|
|                     | мг/кг |     |     |     |     |     |     |     |     |      |     |     |      |     |      |     |     |
| Soil 1—5            | 19    | lod | lod | lod | lod | lod | lod | lod | 74  | 753  | lod | 75  | 235  | 221 | 413  | lod | lod |
| Soil 6—10           | 66    | lod | lod | lod | lod | lod | lod | lod | 108 | 550  | 5   | lod | 128  | 102 | 198  | lod | lod |
| Soil 11—15          | 72    | lod | 11  | lod | lod | lod | lod | lod | 100 | 465  | lod | lod | lod  | 150 | 257  | lod | lod |
| Soil 16—20          | 77    | lod | 12  | lod | lod | lod | lod | lod | 138 | 285  | 6   | lod | lod  | 103 | 184  | lod | lod |
| Soil 21—25          | 39    | lod | lod | lod | lod | lod | lod | lod | 84  | 567  | lod | lod | lod  | 182 | 397  | lod | lod |
| HCP <sub>0,95</sub> | 8,3   | —   | 2,1 | —   | —   | —   | —   | —   | 9,0 | 16,7 | 1,5 | —   | 15,4 | 8,2 | 25,7 | —   | —   |

При проведении анализа образцов загрязненных почв были получены следующие результаты (табл. 2).

Таблица 2

**Содержание свинца в почвах г. Мехико и его биодоступность**

| Образец | Pb (мг/кг)    |                   | Pb-биодоступность, % |
|---------|---------------|-------------------|----------------------|
|         | валовой (FRX) | биодоступный (AA) |                      |
| 1       | 250           | 223               | 89                   |
| 2       | 201           | 171               | 85                   |
| 3       | 345           | 253               | 73                   |
| 4       | 204           | 181               | 89                   |
| 5       | 1186          | 1016              | 86                   |
| 6       | 316           | 277               | 88                   |
| 7       | 240           | 193               | 81                   |
| 8       | 174           | 143               | 82                   |
| 9       | 183           | 170               | 93                   |
| 10      | 317           | 190               | 60                   |
| 11      | 552           | 333               | 60                   |
| 12      | 233           | 213               | 91                   |
| 13      | 382           | 383               | 100                  |
| 14      | 259           | 241               | 93                   |
| 15      | 253           | 233               | 92                   |
| 16      | 125           | 145               | 100                  |

Окончание таблицы

| Образец             | Pb (мг/кг)    |                   | Pb-биодоступность, % |
|---------------------|---------------|-------------------|----------------------|
|                     | валовой (FRX) | биодоступный (AA) |                      |
| 17                  | 322           | 201               | 62                   |
| 18                  | 167           | 136               | 81                   |
| 19                  | 197           | 196               | 100                  |
| 20                  | 210           | 171               | 82                   |
| 21                  | 356           | 278               | 78                   |
| 22                  | 283           | 230               | 81                   |
| 23                  | 486           | 383               | 79                   |
| 24                  | 239           | 199               | 83                   |
| 25                  | 271           | 206               | 76                   |
| 26                  | 211           | 139               | 66                   |
| 27                  | 248           | 249               | 100                  |
| 28                  | 208           | 177               | 85                   |
| 29                  | 518           | 442               | 85                   |
| 30                  | 311           | 268               | 86                   |
| 31                  | 315           | 296               | 94                   |
| 32                  | 282           | 272               | 96                   |
| 33                  | 397           | 326               | 82                   |
| 34                  | 638           | 392               | 61                   |
| 35                  | 487           | 330               | 68                   |
| HCP <sub>0,95</sub> | 13,6          | 28,0              | —                    |

На рис. 2 приведена карта Мехико с уровнями содержания свинца в почвах города.

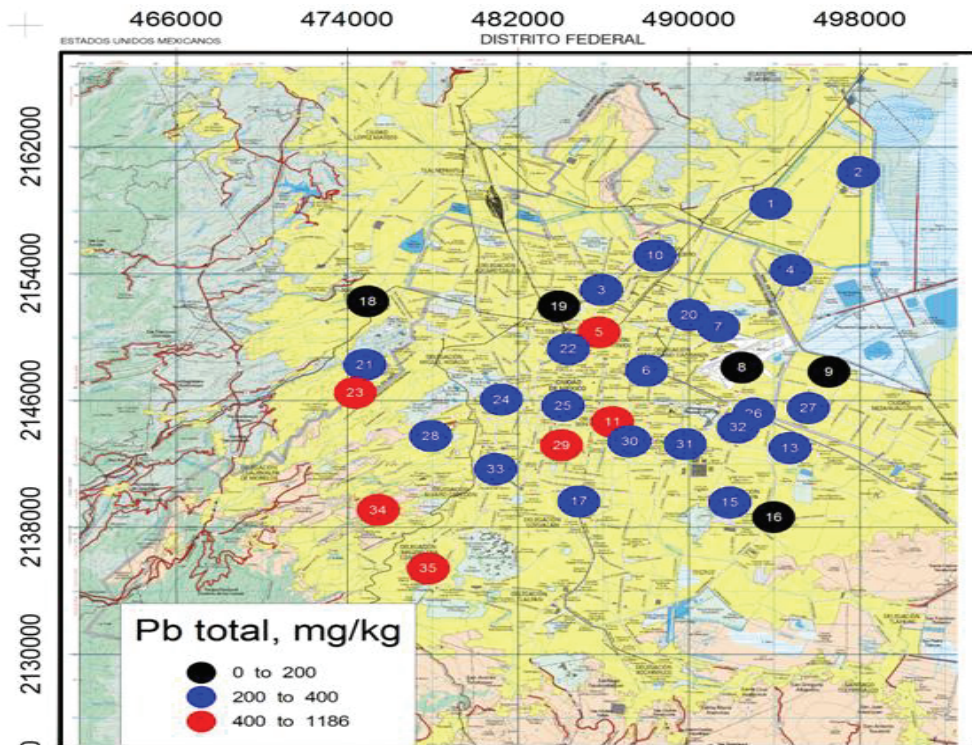
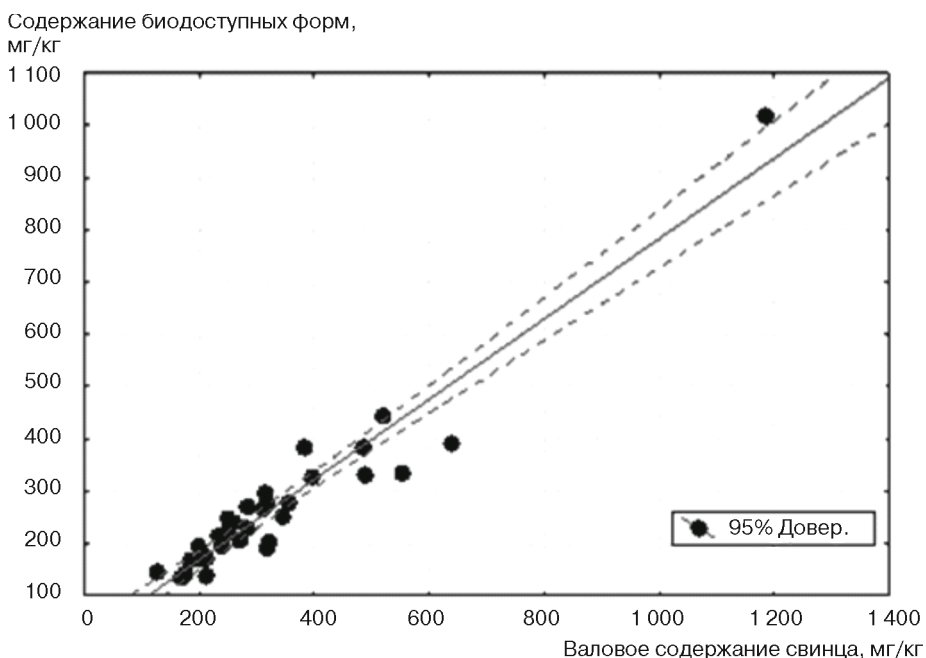


Рис. 2. Уровни содержания свинца в почвах г. Мехико

Сравнение содержания свинца в почвах города Мехико и фоновых образцах указывает на значительное загрязнение городских почв данным элементом. Максимум превышения отмечается в почвах центральных и южных районов города — более чем в 15 раз. Наименьшие значения зарегистрированы в почвах восточных районов — превышение составляет 1,5 раза. Разброс валовых содержаний свинца находится в диапазоне от 125 мг/кг до 1186 мг/кг. Количество биодоступных форм также высокое; регрессионный анализ демонстрирует положительную корреляцию между содержаниями доступных и валовых форм (рис. 3).

$$Pb_{\text{биодоступная}} = 15,078 + 0,76793 \cdot Pb_{\text{валовая}}$$

$$\text{Коэффициент корреляции } (r) = 0,95929.$$

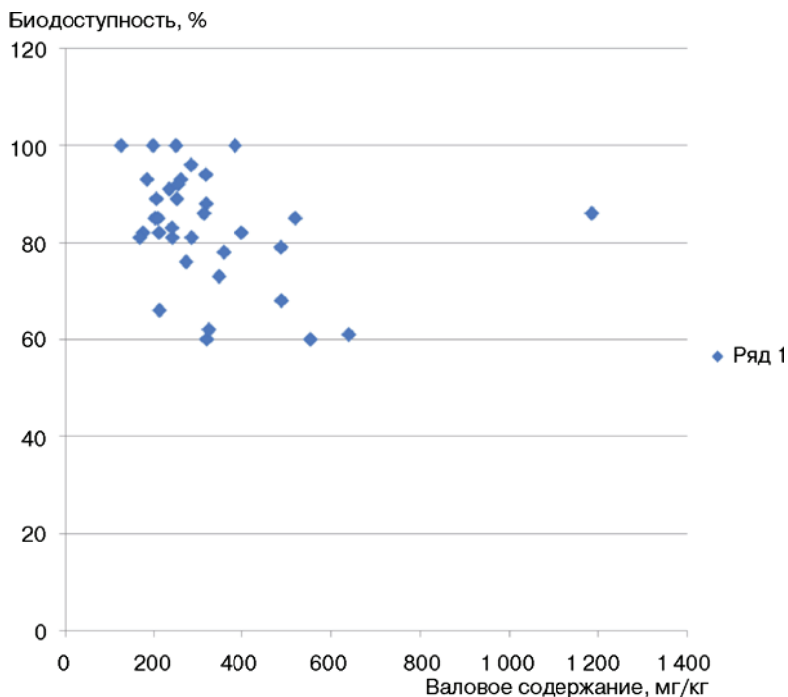


**Рис. 3.** Зависимость между валовым содержанием и содержанием биодоступных форм свинца в почвах города

Биодоступность свинца во всех отобранных образцах городских почв значительная — от 60 до 100%. На рис. 4 видно, что зависимость биодоступности от валового содержания свинца не выявлена. Минимальные и максимальные значения встречаются как при низких, так и при высоких значениях валового содержания свинца.

Проведенные исследования показали, что город Мехико сильно загрязнен свинцом, содержание элемента в почвах во много раз превышает фоновые значения. Наиболее загрязнена центральная часть города, что объясняется наиболее плотным потоком автотранспорта в этой части города. При этом центр Мехико расположен в самой низкой части котловины, где плохо удаляется воздушное загрязнение. Помимо центральной части, загрязнены также западный и юго-западный районы.





**Рис. 4.** Зависимость биодоступности свинца от валового содержания в почвах

Высокие показатели биодоступности свинца связаны с тем, что большая часть элемента попадает в городскую среду с выхлопными газами автомобилей в аэрозольной форме, впоследствии закрепившись в почве в соединении с органическим веществом или оставшись в обменной форме на глинистых минералах. Эти формы легкодоступны для организма человека. Интересно, что показатели биодоступности в городских почвах гораздо более высокие, чем в почвах и отложениях, загрязненных отходами металлургической промышленности. Исследования в штате Сан Луис Потоси показали, что при высоких валовых концентрациях (более 400 мг/кг) биодоступность варьирует в пределах 2,4—20,5%, так как, в отличие от Мехико, форма поступления в окружающую среду — твердые минеральные частицы, представленные галенитом ( $PbS$ ) и англезитом ( $PbSO_4$ ) [8].

Полученные данные могут служить основой для разработки мероприятий по защите населения Мехико от свинцового загрязнения. Очевидно, что перемещение больших объемов загрязненных грунтов весьма дорого и трудновыполнимо. Возможно, следует ориентироваться не на полное удаление или изоляцию грунтовых масс, содержащих соединения свинца, а на уменьшение их биодоступности. Один из способов снижения концентраций доступных форм свинца в почвах города Мехико — химическая мелиорация, перевод в малорастворимые формы.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Давыдова С.В. Доклад о свинцовом загрязнении окружающей среды и его влиянии на здоровье населения, Госкомитет РФ по охране окружающей среды // Зеленый мир. — 1997. — 5.
- [2] Изомеров И.Ф. К проблеме воздействия свинца на организм человека // Медицина труда и пром. экология. — 1998. — 2. — С. 1—4.

- [3] Drexler JW, Brattin WJ. An in vitro procedure for estimation of lead relative bioavailability: With validation // Hum Ecol Risk Assess — 2007. — 13. — P. 383—401.
- [4] Kelley M.E., Brauning S.E., Schoof R.A., Ruby M.V. Assessing Oral Bioavailability of Metals in Soil. Battelle Press. — Columbus, Ohio, Battelle Press, 2002.
- [5] Method 6200 (Environmental Protection Agency, USA.): Portable X-ray Fluorescence Spectrometry for the determination of elemental concentrations in soil and sediment". Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods. URL: <http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/6200.pdf>
- [6] Method 7421 (Environmental Protection Agency, USA): Lead (Atomic Absorption, Furnace Technique). Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods. URL: <http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/7421.pdf>
- [7] Morton-Bermea O., Hernández-Álvarez E., González-Hernández G., Romero F., Lozano R., Beramendi-Orosco L.E. Assessment of heavy metal pollution in urban topsoils from the metropolitan area of Mexico City // Journal of Geochemical Exploration. — 2009. — 101. — P. 218—224.
- [8] Romero F.M., Villalobos M., Aguirre R., Gutierrez M.E. Solid-Phase Control on Lead Bioaccessibility in Smelter-Impacted Soils // Arch. Environ. Contam. Toxicol. — 2008. — 55. — P. 566—575.
- [9] Ruby M.V., Davis A., Link T.E., Schoof R., Chancy R.L., Freeman G.B., Bergstrom P. Development of an *in Vitro* Screening Test To Evaluate the *in Vivo* Bioaccessibility of Ingested Mine-Waste Lead // Environ. Sci. Technol. — 1993. — 27. — P. 2870—2877.
- [10] Ruby M.V., Davis A., Link T.E., Schoof R., Eberle S., Sellstone Ch.M. Estimation of Lead and Arsenic bioavailability using a physiologically based extraction test // Environ. Sci. Technol. — 1996. — 30(2). — P. 422—430.

## **LEAD IN SOILS OF MEXICO: CONTENT, SPATIAL VARIATION, AVAILABILITY FOR HUMANS**

**N.S. Sedov<sup>1</sup>, N.A. Chernykh<sup>1</sup>, F.M. Romero<sup>2</sup>,  
O. Zamora-Martínez<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Ecological Faculty  
Peoples' Friendship University of Russia  
*Podolskoe shosse, 8/5, Moscow, Russia, 113093*

<sup>2</sup>Instituto de Geología  
Universidad Nacional Autónoma de México  
*Mexico city, Mexico*

The distribution of lead in the soil cover of one of the largest cities in the world — Mexico. A comparative analysis of the content of this metal in soils of different parts of the city and its availability is determined for the human body. Found that lead levels in the city vary in the range of 125—1186 mg/kg, significantly higher than background concentrations. The largest number of elements recorded in the central and southern areas of the city, which is associated with the duration and intensity of traffic load. At the same time these areas are characterized by a high degree of bioavailability of the metal (60 to 100%).

**Key words:** lead contamination, urban soils, spatial variation, bioavailability, Mexico.