

**Загрязнение почвенного покрова соединениями металлов, мышьяка и сурьмы в районе воздействия предприятия топливно-энергетического комплекса**

© 2022. Д. Г. Сычева, магистрант,  
Н. Е. Кошелева, д. г. н., профессор,  
И. В. Тимофеев, к. г. н., н. с.,  
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,  
119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1,  
e-mail: l.msu@yandex.ru

Актуальность исследования обусловлена значительным объёмом токсичных выбросов от теплоэлектростанций (ТЭС), работающих на бурых углях, которые способны осаждаться из атмосферы и накапливаться в городских почвах. Для оценки воздействия выбросов ТЭС на загрязнение почв г. Гусиноозёрска (Республика Бурятия) из верхнего (0–10 см) слоя по регулярной сетке отобраны образцы. Методом ICP-MS и ICP-AES проанализировано содержание Zn, As, Cd, Bi, Pb, Cr, Co, Ni, Cu, Sb, Mo, V, W, Sr, Ag в 79 пробах почв, а также в бурых углях и золе Гусиноозёрской Государственной районной электростанции (ГРЭС), выбросы которой являются основным источником загрязнения. Концентрации Mo, W, Sr, Zn, V в бурых углях в 1,5–2,9 раза превышают кларки в углях мира, зола обогащена Mo, Sr, V, Cu, Co. Способность почв сорбировать тяжёлые металлы, As и Sb определяется их физико-химическими свойствами: слабощелочной реакцией среды, среднесуглинистым гранулометрическим составом и средним содержанием органического вещества (2,7%). Наиболее загрязнены почвы в промышленной и одноэтажной жилой зонах. В первой аккумулируются Cu, Ag, As, Sr, Co, V, Ni, Sb, которые связаны с выбросами ГРЭС и влиянием угольной пыли. Во второй накапливаются Sb, Cu, Sr, Zn, Ag, Cd, Pb, поступающие в почвы с золой-уносом ГРЭС, бытовым мусором и выбросами автотранспорта. Тяжёлые металлы, As и Sb образуют в почвенном покрове несколько локальных техногенных аномалий высокой и средней контрастности, которые занимают 7% площади города.

**Ключевые слова:** тяжёлые металлы, мышьяк, сурьма, городские почвы, экогеохимия, теплоэлектростанция, бурый уголь, зола-унос.

**Contamination of soil cover with compounds of metals, arsenic and antimony in the area of impact of fuel and energy complex**

© 2022. D. G. Sycheva ORCID: 0000-0001-8952-5820  
N. E. Kosheleva ORCID: 0000-0002-7107-5718  
I. V. Timofeev ORCID: 0000-0001-8817-1231  
Lomonosov Moscow State University,  
1, Leninskiye Gory St., Moscow, Russia, 119991,  
e-mail: l.msu@yandex.ru

The relevance of the study is caused by a significant amount of toxic emissions from thermal power plants (TPPs) operating on brown coal, which can precipitate from the atmosphere and accumulate in urban soils. To assess the impact of TPP emissions on soil pollution in the city of Gusinoozyorsk (Republic of Buryatia), samples were taken from the upper (0–10 cm) horizons on a regular grid. With the help of the ICP-MS and ICP-AES methods the content of Zn, As, Cd, Bi, Pb, Cr, Co, Ni, Cu, Sb, Mo, V, W, Sr, Ag were analyzed in 79 soil samples, as well as in brown coal and ash of Gusinoozyorsk TPP, whose emissions are the main source of pollution. Brown coals contain concentrations of Mo, W, Sr, Zn, V 1.5–2.9 times higher than the clarkes for coals of the world. Ash is enriched with Mo, Sr, V, Cu, Co compared to world clarkes. The ability of soils to adsorb heavy metals, arsenic and antimony is determined by their physicochemical properties: a slightly alkaline reaction, a medium loamy texture and an average content of organic matter (2.7%). The soils of the industrial operating and one-storey residential land use subzones are the most contaminated. In the first zone Cu, Ag, As, Sr, Co, V, Ni, Sb accumulate which are associated with emissions from the Gusinoozyorsk TPP and the influence of coal dust. In the second zone Sb, Cu, Sr, Zn, Ag, Cd, Pb accumulate which enter the soils with fly ash from the TPP, household waste and car emissions. Heavy metals and metalloids in the soil cover have formed several local anthropogenic anomalies of high and moderate contrast, which occupy 7% of the city's area.

**Keywords:** heavy metals, metalloids, urban soils, environmental geochemistry, thermal power plant, brown coal, fly ash.

Изучению влияния промышленных объектов и автотранспорта на городскую среду уделяется всё большее внимание. Особой опасности подвергается здоровье людей, проживающих в городах с мощным топливно-энергетическим комплексом, работающим на буром угле, поскольку большинство теплоэлектростанций (ТЭС) размещаются в черте города. Наибольшая концентрация вредных веществ приходится на зону в радиусе до 3 км [4], однако уровень воздействия выбросов на компоненты ландшафтов сильно варьирует в зависимости от технических характеристик ТЭС, топлива, розы ветров, рельефа и других физико-географических факторов. С пылегазовыми выбросами ТЭС в окружающую среду поступают соединения токсичных тяжёлых металлов и неметаллов (ТМН), представляющие значительную экологическую опасность [2]. Депонирующей средой для них выступают верхние горизонты городских почв; интенсивность их накопления зависит от физико-химических свойств почвенных горизонтов и ландшафтных условий.

Данная проблема актуальна для России и всего мира. Изучение химического состава золашлакоотвалов бурых углей Канско-Ачинского месторождения свидетельствует о концентрации в золе В, Мо, As, Ge, Be, Pb, Zn, Sn, W [3]. Зола ТЭС «Никола Тесла» (Сербия) обогащена Mg, Al, Mn, As, Zn, Cr и другими ТМН, негативно влияющими на здоровье людей [4]. Влияние золы-уноса ТЭС в городах Костолац (Сербия) и Гацко (Босния и Герцеговина) проявилось в загрязнении почв Ni, Cu и Cr [5]. Бурые угли, используемые на теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) г. Улан-Батор (Монголия), обогащены в десятки раз по сравнению с кларками Pb, As, Mo, а также Cu, Sr, Cd и Ni [6].

Цель работы – на основе данных геохимической съёмки оценить эколого-геохимическое состояние почвенного покрова г. Гусиноозёрска в Республике Бурятия, где расположена крупнейшая в регионе Государственная районная электростанция (ГРЭС). В качестве топлива на ней используются бурые угли местных Загустайского, Баин-Зухерского, а также Окино-Ключевского месторождения, находящегося в 154 км к юго-востоку от Гусиноозёрской ГРЭС. Электрическая мощность станции составляет 1190 МВт, в 2021 г. ГРЭС выработала 3668,1 млн кВт·ч электроэнергии.

#### Объект и методы исследования

Город Гусиноозёрск расположен в Гусиноозёрской межгорной котловине, на

северо-восточном берегу оз. Гусиное, которое используется как пруд-охладитель ГРЭС. Территория относится к зоне каштановых почв сухой степи, Тувинско-Южно-Забайкальской провинции. В почвенном покрове доминируют каштановые почвы в сочетании с лугово-каштановыми, лугово-болотными и луговыми [7]. В городе распространены антропогенно-трансформированные урбо-каштановые почвы. Сильно преобразованные почвы образуют группу урбанозёмов, профиль которых включает один или несколько горизонтов урбик [8]. На территории города выделены пять функциональных зон: промышленная действующая и недействующая, жилые с много- и малоэтажной застройкой, малоиспользуемые территории (пустыри).

Промышленный топливно-энергетический узел состоит из Гусиноозёрской ГРЭС, угольных шахт и транспортных предприятий с железнодорожной станцией Загустай. Недействующая промзона представляет собой обширную территорию с недостроенными или закрывшимися предприятиями, среди которых радиозавод, кирпичный завод, завод по обработке металлических изделий, а также Гусиноозёрское буроугольное месторождение на юге города. Сюда загрязняющие вещества поступают в основном с продуктами разрушения зданий и других строительных конструкций, поэтому загрязнение почв имеет реликтовый характер.

Верхний (0–10 см) слой почв города опробовался летом 2019 г. по регулярной сетке с шагом 500–600 м согласно методике [9]. Фоновые почвы, развитые в сходных ландшафтных условиях, но вдали от техногенных источников загрязнения, опробованы в 2–2,5 км к западу и северо-западу от города. Всего отобрано 79 проб почв, включая 7 фоновых.

Физико-химические свойства почв, влияющие на их сорбционную способность, определяли в Эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ: рН водной вытяжки – потенциометрическим методом, гранулометрический состав – на лазерном гранулометре (Fritsch, Германия), содержание органического углерода ( $C_{орг}$ ) – методом Тюрина. Валовое содержание ТМН в пробах почв, угля и золы ГРЭС определяли масс-спектральным и атомно-эмиссионными методами с индуктивно-связанной плазмой в ИПТМ РАН. Для подробного анализа выбрано 15 элементов: Zn, As, Cd, Pb, Cr, Co, Ni, Cu, Sb, Mo, V, W, Sr, Bi и Ag.

Особенности микроэлементного состава бурых углей и золы Гусиноозёрской ГРЭС выявлялись путём сравнения с мировыми кларками [10]. Содержание ТМН в фоновых почвах  $C_{\phi}$  сравнивали с кларками  $K_1$  верхней части континентальной коры [11], а также с региональным средним значением  $K_2$  для Центральной Бурятии [12] путём расчёта кларков концентрации  $KK = C_{\phi}/K_{1(2)}$  при  $C_{\phi} \geq K_{1(2)}$  или рассеяния  $KP = K_{1(2)}/C_{\phi}$  при  $C_{\phi} < K_{1(2)}$ . Интенсивность накопления ТМН в городских почвах разных функциональных зон оценивалась с помощью коэффициентов концентрации относительно фоновых почв:  $K_c = C_i/C_{\phi}$  при  $C_i \geq C_{\phi}$  или рассеяния  $K_p = C_{\phi}/C_i$  при  $C_i < C_{\phi}$ , где  $C_i$  – содержание ТМН в городских образцах, мг/кг. Полиэлементное загрязнение почвенного покрова определялось по суммарному показателю:  $Z_c = \sum K_c - (n - 1)$ , где  $n$  – число ТМН с  $K_c > 1$ , который имеет пять уровней: низкий ( $Z_c < 16$ ), средний (16–32), высокий (32–64), очень высокий (64–128) и максимальный ( $> 128$ ) [13].

Коэффициенты экологической опасности  $K_o = C_i/\text{ПДК(ОДК)}$  вычислялись для V, As, Cd, Pb, Zn, Ni, Cu, Sb, у которых существуют утверждённые предельно допустимые (ПДК) или ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) в почвах (СанПиН 1.2.3685-21).

Для описания пространственной структуры загрязнения почв составлены карты распределения элементов-приоритетных загряз-

нителей и суммарного показателя  $Z_c$  в пакете ArcGIS 10.1 методом сплайн-интерполяции.

**Результаты и обсуждение**

**Содержание ТМН в буром угле и золе.** Угли, сжигаемые на Гусиноозёрской ГРЭС, обогащены  $\text{Mo}_{2,9}\text{W}_{2,3}\text{Sr}_{2,0}\text{Zn}_{1,9}\text{V}_{1,5}$  (нижний индекс – величина  $KK$ ) относительно кларков в углях [10]. В отобранной с фильтра золе ГРЭС по сравнению с углём в 1,7–8,4 раза выше содержание всех ТМН, кроме As, который выбрасывается в воздух в основном в парообразном состоянии [14]. Наиболее сильно концентрируются  $\text{V}_{8,4}\text{Sr}_{6,4}\text{Mo}_{6,0}$  (табл. 1). Относительно глобальных кларков зола ГРЭС обогащена  $\text{Mo}_{2,5}\text{Sr}_{2,1}\text{V}_{2,0}\text{Cu}_{1,3}\text{Co}_{1,2}$  и значительно обеднена  $\text{Bi}^{21,5}\text{As}^{15,0}\text{Sb}^{7,1}$  (верхний индекс – величина  $KP$ ).

Для выяснения дальнейшей судьбы элементов-примесей при сжигании углей рассчитано их теоретическое содержание в золе, равное отношению содержания элемента в углях к их зольности, равной 20–21%. По сравнению с рассчитанными значениями Sr, Zn, Ag, Cu, Pb, Cd, As, Sb в золе имеют более низкую концентрацию, что свидетельствует об их конденсации на аэрозолях и рассеивании с дымовыми газами.

**Физико-химические свойства верхних горизонтов почв.** Фоновые почвы имеют нейтральную реакцию среды, супесчаный и легкосуглинистый гранулометрический состав.

**Таблица 1 / Table 1**

Геохимические характеристики углей и золы Гусиноозёрской ГРЭС и фоновых почв  
Geochemical characteristics of coals and ash of the Gusinoozyorsk TPP and background soils

Показатель, мг/кг Indicator, mg/kg	Sr	Zn	Cu	V	Cr	Pb	Co	Mo	Sb	Bi	As	Ni	W	Ag	Cd
Среднее в угле ГРЭС Mean for coal of TPP	241	35	15	33	10	7,4	4,0	6,3	0,4	0,12	6,5	9,2	2,8	0,036	0,09
Среднее в золе ГРЭС Mean for ash of TPP	1545	82	96	277	59	23	31	38	0,7	0,2	3,2	53	5,3	0,2	0,2
Кларк бурых углей [12] Clarke for brown coal	120	18	15	22	15	6,6	4,2	2,2	0,8	0,8	7,6	9	1,2	0,09	0,2
Кларк золы [12] Clarke for coal ash	740	110	74	140	82	38	26	15	5,0	4,3	48	52	6,0	0,6	1,1
Фоновые почвы Background soils	259	80	12	41	21	27	5,7	2,6	0,7	0,3	4,9	13	3,1	0,01	0,2
Кларк верхней части земной коры [8] Upper Earth's crust Clarke	270	75	27	106	92	17	15	1,1	0,8	0,2	5,6	50	2	0,05	0,1
Региональное среднее [1] Regional mean	300	70	15	60	40	20	10	1	–	–	2	20	–	0,01	1
$KK$ в фоновых почвах $KK$ in background soils	–	1,1	–	–	–	1,4	–	2,6	–	–	2,5	–	–	1	–
$KP$	1,2	–	1,3	1,5	1,9	–	1,8	–	–	–	–	1,5	–	–	5

Таблица 2 / Table 2

Физико-химические свойства верхнего (0–10 см) слоя почв Гусиноозёрска (средние значения, в скобках – пределы колебаний) / Physicochemical properties of the topsoils (0–10 cm) in the city of Gusinoozyorsk (average values, in brackets – minimum and maximum values)

Функциональная зона (число проб) Land use zone (number of samples)	Содержание физической глины, % Physical clay content, %	pH	Удельная электро- проводность, мкСм/см Specific conductivity, μS/cm	C <sub>орг.</sub> , % Organic carbon, %
Промышленная действующая (8) Industrial operating (8)	29 (16–47)	7,6 (4,5–8,6)	766 (137–990)	2,7 (1,1–4,3)
Промышленная недействующая (4) Industrial inactive (4)	31 (18–39)	8,1 (7,7–8,7)	295 (178–411)	3,0 (1,8–4,4)
Селитебная многоэтажная (7) Multi-storey residential (7)	31 (23–48)	8,4 (8,1–8,7)	257 (112–448)	1,8 (1,0–2,6)
Селитебная одноэтажная (19) One-storey residential (19)	27 (19–39)	8,0 (7,0–9,1)	527 (95–2320)	4,3 (1,1–7,5)
Пустыри (27) Wasteland (27)	32 (19–56)	8,2 (6,2–10,4)	671 (58–4880)	2,6 (0,9–6,0)
Постагрогенная (5) Post-agrogenic (5)	22 (13–46)	8,2 (7,0–8,9)	595 (95–906)	3,6 (1,9–5,4)
Среднее по городу (79) Mean over the city (79)	30 (13–56)	8,1 (4,5–10,4)	676 (58–7920)	2,7 (0,9–6,0)
Фоновая территория (7) Background area (7)	26 (16–30)	7,3 (6,7–8,9)	192 (121–292)	2,0 (0,6–3,4)

Среднее содержание C<sub>орг.</sub> в верхних горизонтах составляет 2,0%, удельная электропроводность водной вытяжки (ЕС) – 192 мкСм/см (табл. 2).

Почвы Гусиноозёрска разнообразны по гранулометрическому составу, содержание физической глины составило 13–56%. Реакция среды в верхних горизонтах изменяется от слабощелочной в промышленной действующей зоне до щелочной в селитебной многоэтажной, что связано с осаждением строительной пыли и растворением содержащихся в почве обломков бетона, черепицы и кирпича [15]. Повышенные значения pH в почвах промышленной недействующей зоны обусловлены поступлением карбонатной пыли, образующейся при выветривании разрушенных зданий. Наиболее низкое значение (pH 4,5) выявлено на юге города вблизи терриконов Гусиноозёрского бурогоугольного разреза, что можно объяснить окислением сульфидов железа и других металлов, присутствующих в углеродсодержащих отвалах, и их переходом в подвижные оксидные и водорастворимые сульфатные формы [1].

Электропроводность почвенного раствора превышает значения фона в 3,5 раза, что указывает на засоление. Наибольшее значение ЕС (7920 мкСм/см) обнаружены на пойме р. Загустай, к которой примыкают отвалы вскрышных пород Загустайского месторождения. Русло

частично перекрыто материалом отвалов, из-за чего поток воды перераспределяется по пойме, заболачивая её и привнося большое количество солей [16]. Максимальное содержание C<sub>орг.</sub> (до 7,5%) приурочено к селитебной одноэтажной зоне, что связано с внесением органических удобрений на приусадебных участках. В зоне одноэтажной застройки содержание C<sub>орг.</sub> минимально (1–2,6%) – здесь отсутствуют зелёные насаждения и почва слабо задернована.

Таким образом, техногенная трансформация городских почв усиливает их фиксирующую способность по отношению к ТМН. Они могут закрепляться на щелочном геохимическом барьере в результате аккумуляции сульфатных форм ТМН, поступающих из отвалов Гусиноозёрского бурогоугольного разреза. Повышенное содержание физической глины усиливает роль сорбционного барьера в накоплении ТМН, а органическое вещество связывает халькофильные Cu, Pb, Cd, формируя органоминеральный барьер [17].

**Содержание ТМН в фоновых и городских почвах.** В верхнем слое фоновых почв относительно кларков верхней части континентальной коры накапливаются Mo<sub>2,4</sub>, Cd<sub>2,0</sub>, Pb<sub>1,6</sub>, W<sub>1,6</sub>, Bi<sub>1,5</sub> и рассеиваются Ag<sup>5,0</sup>, Cr<sup>4,4</sup>, Ni<sup>3,8</sup>, V<sup>2,6</sup>, Co<sup>2,6</sup>, Cu<sup>2,3</sup>, содержание Sb, Bi, Sr и Zn близко к кларкам. По сравнению с региональным фоном почвы обогащены

Mo<sub>2,6</sub>As<sub>2,5</sub>Pb<sub>1,4</sub>, концентрации Zn и Ag имеют околочларковские значения, а содержание остальных ТМН ниже регионального фона.

В почвах Гусиноозёрска содержание Cu, Ag, As, Sr, Co, Ni, V, Sb, Mo, Cr, Zn, Pb превышает фоновые значения, но значения K<sub>c</sub>, как правило, меньше 2. Наибольшим накоплением отличаются Sr<sub>2,2</sub>Cu<sub>1,7</sub>As<sub>1,6</sub>, которые поступают в почвы с выбросами летучей золы от Гусиноозёрской ГРЭС (рис. 1). Наиболее сильно загрязнены почвы промышленной действующей

зона и селитебной зоны одноэтажной застройки, которые находятся под техногенным воздействием уже многие десятилетия. Почвы селитебной зоны многоэтажной застройки загрязнены минимально – коэффициенты накопления K<sub>c</sub> ≤ 1,6 для всех элементов.

В промышленной действующей зоне аккумулируются Cu<sub>2,4</sub>Ag<sub>2,1</sub>As<sub>2,0</sub>Sr<sub>1,9</sub>Co<sub>1,7</sub>V<sub>1,6</sub>Ni<sub>1,6</sub>Sb<sub>1,6</sub>, что связано с выбросами ГРЭС и угольной пыли, разносимой с поверхности открытого углекислотного хранилища на территории ГРЭС.

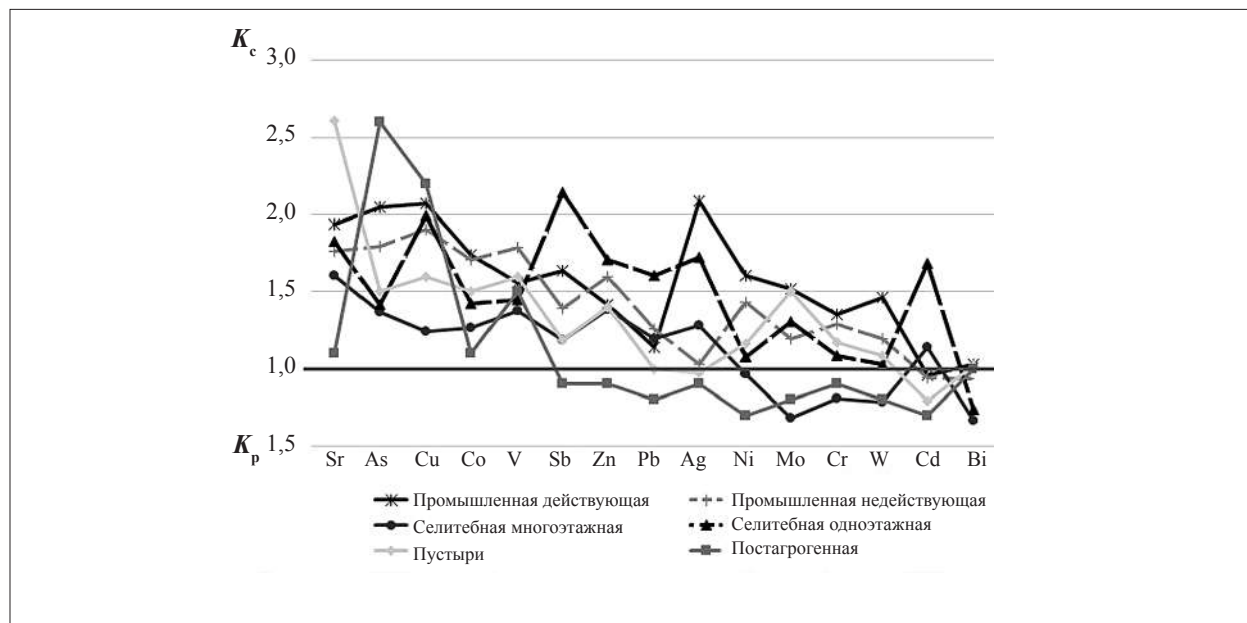


Рис. 1. Геохимические спектры почв в функциональных зонах Гусиноозёрска  
Fig. 1. Geochemical spectra of soils in the land use zones of the city of Gusinoozersk

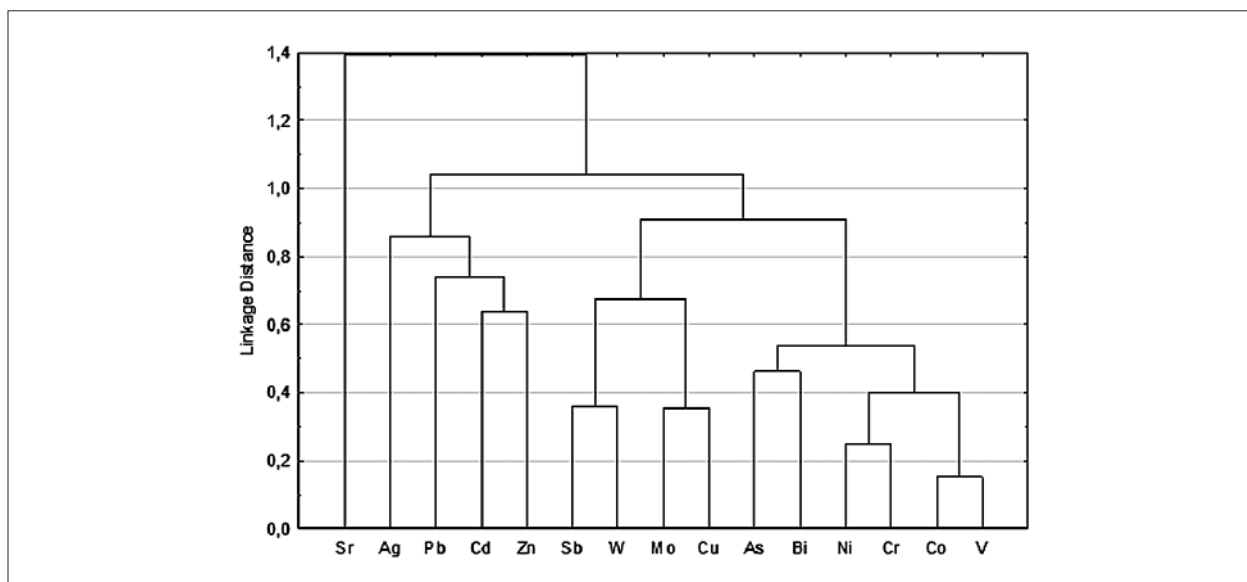


Рис. 2. Парагенетические ассоциации ТМН в верхнем слое почв Гусиноозёрска (алгоритм complete linkage, мера сходства d = 1 – Pearson's r)  
Fig. 2. Paragenetic associations of heavy metals, arsenic and antimony in the topsoils of the city of Gusinoozersk (amalgamation rule: complete linkage, distance measure: d = 1 – Pearson's r)

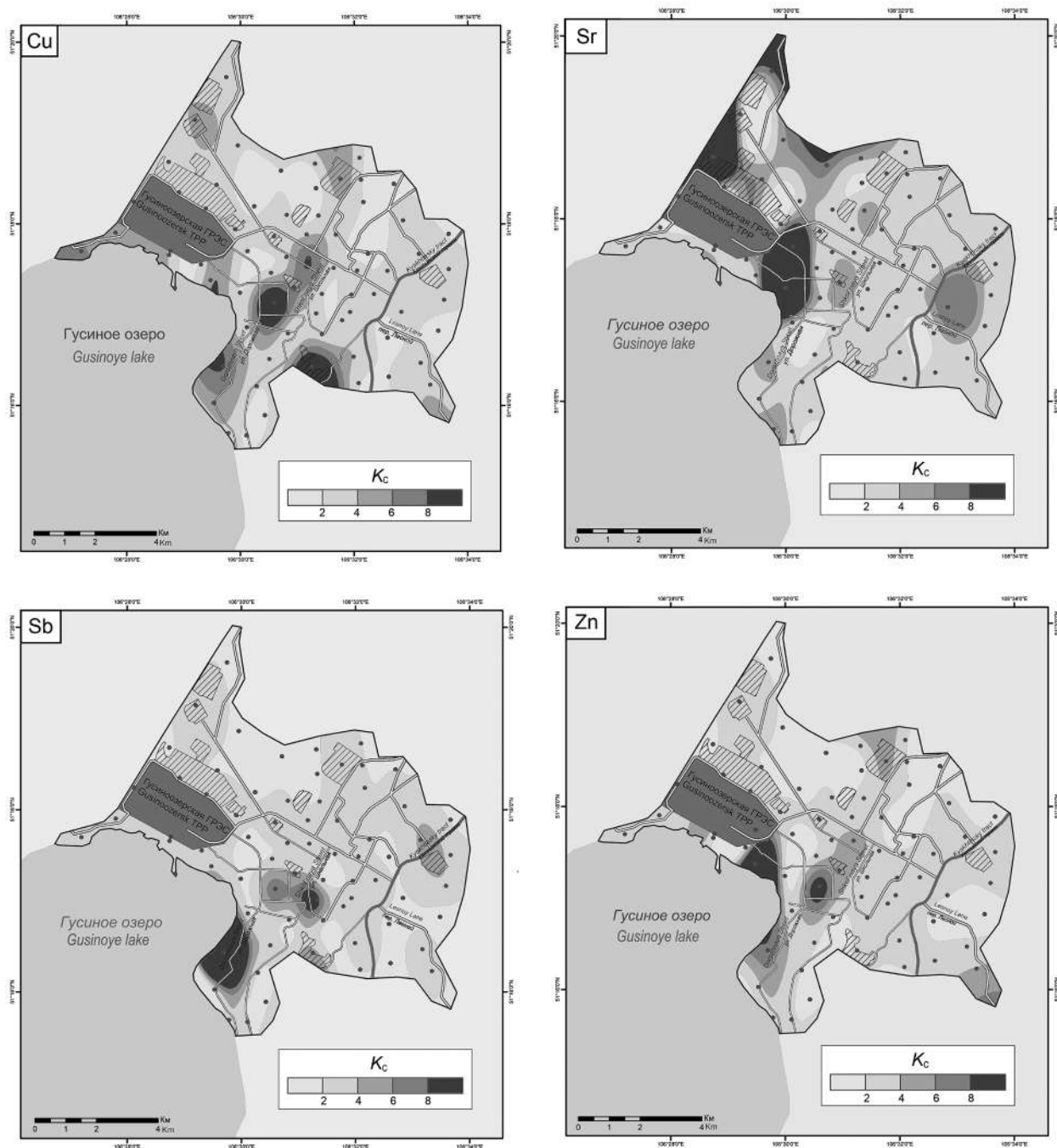


Рис. 3. Распределение Cu, Sr, Sb и Zn в верхнем слое почв г. Гусинозёрска  
 Fig. 3. Distribution of Cu, Sr, Sb, and Zn in the topsoils of the city of Gusinoozyorsk

В жилой зоне одноэтажной застройки наибольшее накопление отмечено у  $Sb_{2,1}Cu_{2,0}Sr_{1,8}Zn_{1,7}Ag_{1,7}Cd_{1,7}Pb_{1,6}$ . Источниками этих элементов могут быть летучая зола ГРЭС, бытовые отходы, а также продукты эксплуатации автотранспорта: в выхлопных газах содержатся Pb, Cu, Sr; в моторном масле – Zn, Pb, Cu, Sb, Mo; при истирании шин в окружающую среду поступают Cd, Zn, Pb, Co, Ni, Cr, Cu, Sb; при истирании тормозных колодок – Cu, Sb, Zn, Pb и др. [9, 13, 18].

**Ассоциации ТМН в городских почвах.** Для выделения парагенетических ассоциаций ТМН, поступающих в почву из общих техногенных источников и обнаруживающих сходные тенденции к миграции и аккумуляции в различных ландшафтно-геохимических условиях, в пакете STATISTICA 10 проведён кластерный анализ (рис. 2). В верхних горизонтах почв выделены три ассоциации: две полиэлементных V-Co-Cr-Ni, Cu-Mo-W-Sb и пара Zn-Cd.

Первая ассоциация с наиболее сильными корреляционными связями ( $r = 0,46-0,84$ ) включает ТМН, поступающие в основном из природно-техногенных источников, это продукты разрушения строительных материалов природного происхождения и выдуваемые частицы почвы. Менее тесные корреляционные связи внутри ассоциации Cu-Mo-W-Sb ( $r = 0,33-0,64$ ) обусловлены разными источниками этих элементов: выбросами автотранспорта, золой-уносом ГРЭС и бытовыми отходами. Zn-Cd ( $r = 0,36$ ) поставляют в основном автотранспорт, дополнительное влияние оказывают другие локальные источники.

**Техногенные аномалии ТМН.** Анализ геохимических карт Гусиноозёрска (рис. 3) показал, что отдельные ТМН образуют локальные полиэлементные аномалии высокой контрастности. В центральной части города с усадебной застройкой обнаружены аномалии  $Sb_{13}Mo_6Cd_4Cu_4W_{3,6}Co_{2,5}V_{2,2}$  на ул. Мичурина и  $Cu_6Zn_5Sb_{3,6}Pb_{2,7}$  на ул. Рабочая, которые, вероятно, обусловлены свалками бытовых отходов [16]. Ещё одна аномалия  $Mo_{17}Cu_6W_3Pb_{2,7}Sb_{2,4}As_{2,4}$  сформировалась на юге города, где катионогенные Cu, W, Pb и Sb выносятся из отвала кислых вскрышных пород Гусиноозёрской угольной шахты и накапливаются на щелочном барьере в днище балки.

На северо-западе города, вблизи кирпичного завода, в верхнем слое почв выявлена аккумуляция  $As_{4,4}Co_{3,2}V_{2,4}W_{2,1}$ , на северо-востоке –  $Ni_{2,2}Sb_{2,2}Cr_{2,1}V_{2,1}W_{2,0}Co_{2,0}$ , что можно объяснить сжиганием бурого угля при печном отоплении и воздействием выбросов автотранспорта [9, 13, 18]. На западе города, рядом со станцией очистки сточных вод, повышено содержание  $As_{2,8}Ag_{2,2}Cu_{1,9}Sb_{1,8}$ . Очистные сооружения не полностью удаляют металлы из стоков, воды на выходе, как правило, обогащены Ag, Cu, Cr и другими ТМН [9, 14].

**Оценка экологической опасности загрязнения городских почв ТМН.** Уровень загрязнения верхнего слоя городских почв в среднем низкий ( $Z_c = 8$ ). Большая часть (57%) территории (почти вся селитебная многоэтажная, постагрогенная и значительная часть зоны пустырей) имеет минимальный уровень загрязнения ( $Z_c < 8$ ). Низкое загрязнение ( $Z_c = 8-16$ ) выявлено на 36% территории в промышленной и жилой одноэтажной зонах (рис. 4). На 4% городской территории – в частном секторе на ул. Рабочая и на пойме р. Загустай – уровень загрязнения почв ТМН средний, на 3% – на ул. Мичурина и вблизи отвала Гусиноозёрского месторождения – опасный.

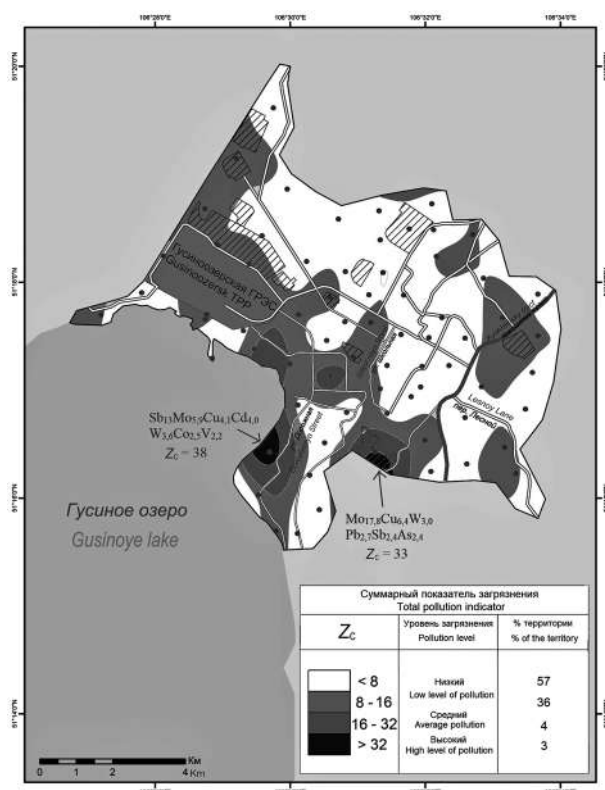


Рис. 4. Суммарное загрязнение ТМН почвенного покрова г. Гусиноозёрска  
Fig. 4. Total contamination with heavy metals, arsenic and antimony of the soil cover in the city of Gusinoozyorsk

Полиэлементное загрязнение почв уменьшается в ряду функциональных зон: промышленная действующая (средний  $Z_c = 10,2$ ) > селитебная с одноэтажной застройкой (9,2) > промышленная недействующая (8,1) > пустыри (7,9) > селитебная с многоэтажной застройкой (5,0) > постагрогенная (4,7). Эта последовательность отражает уровень техногенной нагрузки, который определяется концентрацией элемента в выбросах и длительностью воздействия на почву.

Сравнение содержания отдельных ТМН в почвах Гусиноозёрска с ПДК и ОДК показало, что для всей территории города характерна низкая степень опасности загрязнения. Наибольшую опасность представляет As, превышение норматива которого в 1,2–3,7 раза обнаружено на 17% территории города с максимальным превышением в зоне пустырей. Для Zn, Pb и Sb ОДК/ПДК превышено на 1–4% площади. Загрязнение почв V, Cd, Ni и Cu отсутствует.

### Заключение

Исследование состава бурых углей Загустайского, Баин-Зухерского и Окино-

Ключевского месторождений показало, что по сравнению с кларками углей они обогащены Mo, W, Sr, Zn, V. В золе Гусиноозёрской ГРЭС наибольшие концентрации обнаружены у Mo, Sr, V, Cu. Сжигание бурого угля на Гусиноозёрской ГРЭС и в частном секторе при печном отоплении приводит к накоплению в городских почвах Sr, Cu, As. Значительное влияние на загрязнение почв оказывают выбросы автотранспорта и локально – свалки бытовых отходов. Наибольшее загрязнение Cu, Ag, As, Sr, Co, V, Ni, Sb почв обнаружено в промышленной действующей зоне Гусиноозёрска.

В почвенном покрове сформировались несколько полиэлементных аномалий ТМН высокой и средней контрастности, которые занимают 7% площади города. Однако 93% городской территории характеризуется минимальным и низким уровнями загрязнения. Случаи нарушения санитарно-гигиенических нормативов Zn, Pb и Sb единичны, за исключением As, норматив которого превышен в 1,2–3,7 раза на 17% территории города.

*Исследование выполнено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды». Полевые и лабораторные работы проведены при поддержке РФФИ (проект № 17-29-05055-офи\_м, обработка данных – при поддержке НИР по разработке интегрированной (интегральной) оценки антропогенного воздействия и состояния окружающей среды озера Байкал (договор № 8/Д-2021 от 14.12.2021).*

## References

1. Kasimov N.S. Ekogeochemistry of landscapes. Moskva: IP Filimonov M.V., 2013. 208 p. (in Russian).
2. Verma S., Masto R., Gautam S., Choudhury D., Ram L., Maiti S., Maity S. Investigations on PAHs and trace elements in coal and its combustion residues from a power plant // Fuel. 2015. V. 162. P. 138–147. doi: 10.3390/min8020054
3. Ogorodnikova E.N., Baraboshkina T.A., Nikolaeva S.K. Features of the mineral composition ash dump – products technogenesis // Vestnik Rossijskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2011. No. 3. P. 20–24 (in Russian).
4. Popovic A., Relic D., Djordjevic D. Trace and major elements in ash of “Nikola Tesla A” power plant (III) – associations of elements in passive cassette ash // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2015. V. 37. No. 14. P. 1487–1494. doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.10.007
5. Savic D., Nisic D., Malic N., Dragosavljevic Z., Medenica D. Research on power plant ash impact on the quality of soil in Kostolac and Gacko coal basins // Minerals. 2018. V. 8. No. 2. P. 54–70. doi: 10.1080/15567036.2011.615804
6. Kosheleva N.E., Kasimov N.S., Sorokina O.I., Gulin P.D., Bazha S.N., Enkh-Amgalan S. Geochemistry of Ulaanbaatar landscapes // Izvestiya rossiyskoy akademii nauk. 2013. No. 5. P. 109–124 (in Russian). doi: 10.15356/0373-2444-2013-5-109-124
7. Ubugunov L.L., Ubugunova V.I., Badmayev N.B., Gyninova A.B., Ubugunov V.L., Balsanova L.D. Soils of Buryatia: diversity, taxonomy and classification // Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyajstvennoy akademii im. V.R. Filippova. 2012. V. 2. P. 45–52 (in Russian).
8. Gerasimova M.I., Stroganova M.N., Mozharova N.Y., Prokofeva T.V. Anthropogenic soils (genesis, geography, remediation) / Ed. G.V. Dobrovolskiy. Moskva: Oykumena, 2003. 266 p. (in Russian).
9. Demetriades A., Birke M. Urban geochemical mapping manual: sampling, sample preparation, laboratory analysis, quality control check, statistical processing and map plotting. Brussels: EuroGeoSurveys, 2015. 162 p. doi: 10.1016/j.gexplo.2017.10.024
10. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. Toxic and potentially toxic elements of fossil coals. Ekaterinburg: PH UrO RAS, 2005. 655 p. (in Russian).
11. Kasimov N.S., Vlasov D.V. Clarkes of chemical elements as comparison standards in ecogeochemistry // Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 5, geogr. 2015. No. 2. P. 7–17 (in Russian).
12. Belogolovov V.F. Geochemical atlas of Ulan-Ude. Ulan-Ude: Buryat. kn. izd-vo, 1989. 52 p. (in Russian).
13. Kasimov N.S., Vlasov D.V., Kosheleva N.E., Nikiforova E.M. Geochemistry of the landscapes in Eastern Moscow. Moskva: APR, 2016. 320 p. (in Russian).
14. Environmental geochemistry / Eds. Yu.E. Saet, B.A. Revich, E.P. Yanin, R.S. Smirnova, I.L. Basharkevich, T.L. Onischenko, L.N. Pavlova, N.Ya. Trefilova, A.I. Achkasov, S.Sh. Sarkisyan. Moskva: Nedra, 1990. 335 p. (in Russian).
15. Greinert A., Fruzińska R., Kostecki J. Urban soils in Zielona Góra // Technogenic soils of Poland. Toruń: Polish Society of Soil Science, 2013. P. 31–54.
16. Voloshin A.L. Causes and some aspects of the present decrease in the water content of the rivers of Western Transbaikalia // Proc. of the IX Intern. conf. “Rivers of Siberia and the Far East”. Ulan-Ude, 2015. P. 124–128 (in Russian).
17. Kosheleva N.E., Kasimov N.S., Vlasov D.V. Factors of the accumulation of heavy metals and metalloids at geochemical barriers in urban soils // Eurasian Soil Science. 2015. V. 48. No. 5. P. 476–492. doi: 10.7868/S0032180X15050032
18. Hulskotte J.H.J., Roskam G.D., Denier van der Gon H.A.C. Elemental composition of current automotive braking materials and derived air emission factors // Atmospheric Environment. 2014. V. 99. P. 436–445. doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.10.007