

Геология, география и глобальная энергия. 2022. № 3 (86). С. 89–105.
Geology, geography and global energy. 2022; 3(86):89–105 (In Russ.).

Научная статья

УДК 550.4.02

doi 10.54398/20776322_2022_3_89

**МИКРОЧАСТИЦЫ КАК ФАКТОР, ОКАЗЫВАЮЩИЙ ВЛИЯНИЕ НА АККУМУЛЯЦИЮ
ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВЕ, ДОРОЖНОЙ ПЫЛИ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ**

**Юрий Александрович Федоров^{1✉}, Виктория Игоревна Чепурная²,
Дмитрий Николаевич Гарькуша³, Ирина Владимировна Доценко⁴,
Анна Владимировна Михайленко⁵, Юрий Витальевич Попов⁶,
Ирина Юрьевна Гаврилова⁷**

^{1,2,3,4,5,6}Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

⁷Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия

¹fedorov@sfedu.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-7411-3030>

²vcchepurnaya@sfedu.ru

³gardim@sfedu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5026-2103>

⁴dotsenko@sfedu.ru

⁵avmihaylenko@sfedu.ru

⁶popov@sfedu.ru

⁷irinavashhenko1997@mail.ru

Аннотация. С помощью современных инструментальных методов исследован гранулометрический и вещественный состав, а также содержание Zn и Cu в компонентах элементарных ландшафтов, представленных почвами, дорожной пылью, отложениями у уреза воды и донными отложениями Ростовской области. Они были представлены природными и техногенными образованиями. Валовое содержание Zn варьировалось независимо от места отбора проб в диапазоне от 31,1 до 120,9 мг/кг (в среднем 74,2 мг/кг), а содержание Cu – от 31,2 до 90,4 мг/кг (в среднем 55,4 мг/кг). По среднему содержанию Zn и Cu исследуемые объекты выстраиваются в следующий ряд: донные отложения > почва, дорожная пыль > отложения у уреза воды. В рядах последовательности распределения содержания Cu и Zn с одной стороны и суммы фракций (в %) с размерностью микрочастиц <0,01 и <0,002 мм с другой обнаруживается тенденция, которая заключается в сочетанном увеличении количества мелкодисперсных частиц в изученных средах и содержания в них обоих ТМ. Корреляция между количеством (в %) фракции <0,002 мм и <0,01 с одной стороны и содержанием Zn и Cu в исследованных образцах для всего массива данных с другой оказалась слабой прямой для цинка и высокой прямой для меди. Показано, что гранулометрический и вещественный состав донных отложений, отложений у уреза воды, почв, дорожной пыли являются одними из доминирующих факторов, контролирующих аккумуляцию ТМ.

Ключевые слова: тяжелые металлы, гранулометрический состав, дорожная пыль, донные отложения, почва.

Для цитирования: Федоров Ю. А., Чепурная В. И., Гарькуша Д. Н., Доценко И. В., Михайленко А. В., Попов Ю. В., Гаврилова И. Ю. Микрочастицы как фактор, оказывающий влияние на аккумуляцию тяжелых металлов в почве, дорожной пыли и донных отложениях // Геология, география и глобальная энергия. 2022. № 3 (86). С. 89–105. https://doi.org/10.54398/20776322_2022_3_89.

MICROPARTICLES AS A FACTOR AFFECTING THE ACCUMULATION
OF HEAVY METALS IN SOIL, ROAD DUST AND BOTTOM SEDIMENTS

Yury A. Fedorov¹✉, Victoria I. Chepurayeva², Dmitry N. Gar'kusha³,
Irina Dotsenko⁴, Anna V. Mikhailenko⁵, Yury V. Popov⁶, Irina Yu. Gavrilova⁷

^{1,2,3,4,5,6}Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

⁷Southern Scientific Centre RAS, Rostov-on-Don, Russia

¹fedorov@sfned.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-7411-3030>

²vchepurayeva@sfned.ru

³gardim@sfned.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5026-2103>

⁴dotsenko@sfned.ru

⁵avmihaylenko@sfned.ru

⁶popov@sfned.ru

⁷irinavashhenko1997@mail.ru

Abstract. With the modern instrumental methods, the granulometric and material composition, as well as the content of Zn and Cu in the components of elementary landscapes, represented by soils, road dust, sediments at the water's edge and bottom sediments of the Rostov region, were studied. They were represented by natural and technological formations. The total content of Zn varied regardless of the place of sampling in the range from 31.1 to 120.9 mg/kg (average 74.2 mg/kg), and the content of Cu - from 31.2 to 90.4 mg/kg (in 55.4 mg/kg on average). According to the average content of Zn and Cu, the studied objects line up in the following row: bottom sediments > soil, road dust > sediments at the water's edge. In the rows of the distribution sequence of the content of Cu and Zn, on the one hand, and the sum of fractions (in %) with the dimension of microparticles <0.01 and <0.002 mm, on the other hand, a tendency is found, which consists in a combined increase in the number of fine particles in the studied media and the content of both TM. The correlation between the amount (in %) of the <0.002 mm and <0.01 fractions, on the one hand, and the content of Zn and Cu in the studied samples for the entire data set, on the other hand, turned out to be a weak straight line for zinc and a high straight line for copper. It is shown that the granulometric and material composition of bottom sediments, sediments at the water's edge, soils, road dust are one of the dominant factors controlling the accumulation of HMs.

Keywords: heavy metals, granulometric composition, road dust, bottom sediments, soil

For citation: Fedorov Yu. A., Chepurayeva V. I., Gar'kusha D. N., Dotsenko I. V., Mikhailenko A. V., Popov Yu. V., Gavrilova I. Yu. Microparticles as a factor affecting the accumulation of heavy metals in soil, road dust and bottom sediments. *Geology, geography and global energy*. 2022; 3(86): 89–105. https://doi.org/10.54398/20776322_2022_3_89.

Введение

Находящаяся в воздухе во взвешенном состоянии пыль является одним из опасных загрязняющих веществ. Она может оказывать фиброгенное, токсическое, раздражающее, аллергенное, канцерогенное, радиоактивное, фотосенсибилизирующее действие. Пыль представляет из себя двухфазную систему (аэрозоль), состоящую из твердых и жидких частиц различного физико-химического состава и происхождения. Источники и пути поступления пыли имеют как природное, так и антропогенное происхождение, это: частицы, поступающие из космоса, ветровая эрозия почв, извержение вулканов, выветривание горных пород, масштабный вынос морских солей, промышленные и теплоэнергетические предприятия, продукты сжигания угля, газа, нефти и дерева, все виды транспорта, сельское хозяйство, степные и лесные пожары [10; 6]. На естественные источники пыли во всем мире приходится 75 % выбросов, антропогенные источники составляют 25 %. [21; 30]. К показателям, которые обычно используются для характеристики взвешенных частиц (PM) и влияют на здоровье, относятся концентрация частиц фракции диаметром менее 0,01 мм (PM₁₀) и частиц диаметром 0,0025 мм (PM_{2,5}). В PM_{2,5}, которые часто называют мелкодисперсными взвешенными частицами, также входят ультра-мелкодисперсные частицы диаметром менее 0,0001 мм. Основным источником поступления PM₁₀ являются природные источники, а для PM_{2,5}, напротив, антропогенные [18; 31]. Как правило, низкое

соотношение $PM_{2,5}/PM_{10}$ указывает на преобладание крупных частиц, что в большей степени объясняется природными источниками. Напротив, высокое соотношение $PM_{2,5}/PM_{10}$ указывают на то, что загрязнение воздуха в большей степени происходит из антропогенных источников [22; 30].

Угольная промышленность, включающая добычу, переработку, транспортировку и хранение угля, остается крупной отраслью из-за ее важной роли в производстве электроэнергии. Современные горнодобывающие технологии позволили повысить производительность благодаря способности измельчать тысячи тонн угля за одну рабочую смену, что приводит к образованию респираторных пыльных облаков с токсичными радикалами на их поверхности [28]. В работе [27] на примере буровугольных шахт Словении показано, что семь металлов и металлоидов (Cu, Sb, Sn, Pb, Zn, As и Ni) могут концентрироваться в воздухе в более мелкой, а значит и в более вдыхаемой фракции пыли $PM_{2,5}$. По сведениям [7; 29] Восточный Донбасс следует отнести к угольным бассейнам с высокими концентрациями в углях элементов – примесей, включая такие опасные как ртуть. Отметим, что ультра- и микроскопические частицы пыли являются сами не только опасными загрязняющими веществами, но и по мнению исследователей [30], склонны, в сравнении с частицами больших размеров, к более активной сорбции загрязняющих веществ, включая тяжелые металлы. С этим утверждением солидарны авторы работы [5]. Исследования ученых свидетельствуют, что пыль, выдуваемая в окружающую среду с дорожного полотна, обеспечивает поступление в окружающую среду более половины частиц диаметром $<0,01$ мм. Именно частицы данной фракции обуславливают высокие концентрации многих тяжелых металлов и других химических элементов в атмосферной пыли, донных осадках и почвах [19; 24–26].

Для бассейна Азовского моря угольная и породная пыль в составе атмосферных осадков, поверхностных вод, донных отложений, почв и дорожной пыли является неотъемлемым компонентом. Это обусловлено тем, что на востоке и северо-востоке моря расположен широко известный и один из старейших угледобывающих бассейнов Земного шара – Донецкий угольный бассейн (Донбасс). Как показано выше, зола, угольная и породная пыль образуются при добыче, переработке, транспортировке и складировании углей и породных отвалов (терриконов), а также при сжигании угля в промышленности и быту. Следовательно, дорожная пыль, почвы и донные отложения могут являться индикаторами особенностей распределения частиц разной размерности и уровней содержания в них ТМ и других микроэлементов в районах Ростовской области с различным влиянием деятельности угольной промышленности. Поэтому представляет научный и прикладной интерес изучить количество частиц с размерностью $<0,01$ и $<0,002$ мм в составе дорожной пыли, донных отложений и почв как возможных аккумуляторов микроэлементов не только непосредственно на территории угольных районов, но и на удалении от них. Выбор для изучения дурта тяжелых металлов (Zn, Cu) обусловлен тем, что они характеризуются высокой биохимической активностью, циклическим характером поведения и глобальным обогащением аэрозолей [2; 14]. Как считают [11], около 75 % поступающих в атмосферу цинка и меди имеют антропогенный генезис. По обобщенным нами сведениям установлено, что в дорожной пыли [13] и почвах Восточного Донбасса [25–26] содержания цинка и меди являются одними из преобладающих среди других ТМ. Данные микроэлементы оказались также приоритетными в составе дорожной пыли г. Ростова-на-Дону, где по сведениям все того же В. В. Приваленко и др. (2004), достигали нескольких сотен мг/кг. Авторы этой работы даже признали территорию ростовской агломерации по содержанию Zn в пыли как «техногенную аномалию». В работах [3, 8] показано, что содержание в поверхностных водах бассейна Азовского моря растворенных форм миграции этих металлов иногда превышают ПДК или были близки к ним. Более того, между содержанием в воде нижнего течения р. Дон Zn и Cu была обнаружена тесная прямолинейная зависимость [3]. Изложенное выше стало основанием для выбора данных ингредиентов для изучения содержания и выявления связи

последних с количеством микрочастиц в отобранных образцах. С этой целью нами были проведены экспедиционные работы в урбанизированных и угольных районах Ростовской области на разных расстояниях от центров сосредоточения угольной промышленности.

Материалы и методы. На станциях отбора проб, расположенных возле территории и на вершине их тел были отобраны пробы почв, а также колонки донных отложений в небольших водоемах с шахтными водами и малых реках (рис. 1, табл.).



Рисунок 1 – Карта-схема станций отбора проб придорожной пыли, почв и донных отложений по трансектам «г. Ростов – г. Шахты» и «г. Семикаракорск – Веселовское водохранилище»

Пробы пыли отбирались у обочины дорог по пути следования, а почв – на пахотном поле и рисовых чеках. На отдельных участках впервые исследовались профили (рис. 2), представленные последовательным расположением элементарных природных (почвы, донные отложения, вода, отложения у уреза воды) и антропогенных (дорожное полотно, террикон) ландшафтов и круговорот пыли между ними. Показано, что дорожная пыль является с одной стороны производной многократного процесса осаждения аэрозолей из атмосферы и выдувания частиц из поверхностного слоя почв, а с другой – под действием ветра сама пыль становится потенциальным источником обратного перманентного массопереноса микрочастиц и их выпадения на подстилающую поверхность местности. В случае сильного загрязнения окружающей среды пыль может аккумулировать токсичные вещества и прежде всего тяжелые металлы (ТМ), которые способны оказать негативное влияние на биологические свойства почв и качество поверхностных вод.

Вещественный состав дорожной пыли изучался по методике [20] на подложке из фильтровальной бумаги белого цвета при помощи цифрового микроскопа USB микроскоп MiViewCar с увеличением от 10 до 200 крат. Это позволяло измерять размеры частиц и фиксировать изображение. Исследование компонентного состава и элементного состава фаз выполнено на растровом электронном микроскопе VEGA II LMU (фирмы Tescan) с системой энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450/XT (детектор Silicon Drift (ADD)). В пробах почв, донных отложений и придорожной пыли в эпицентре Восточного Донбасса и вне прямого влияния угледобывающих районов гранулометрический состав определялся методом лазерной дифракции. Время экспозиции пробы – 30 с, частота сканирования образца – 50 Гц, дисперсант и фоновая жидкость – дистиллированная вода. Каждая проба анализировалась трижды, результаты усреднялись. Использовался метод лазерного грануломет-

рического анализа с помощью анализатора «ЛАСКА-ТД». Фракции крупнее 1,0 мм, представленные материалами антрацитов и остатков органики, при расчете гранулометрического состава вычитались из навески и не входили в сумму 100 %. Оценка гранулометрических характеристик проб состояла в статистической обработке результатов, расчете массового и численного содержания гранулометрических фракций.

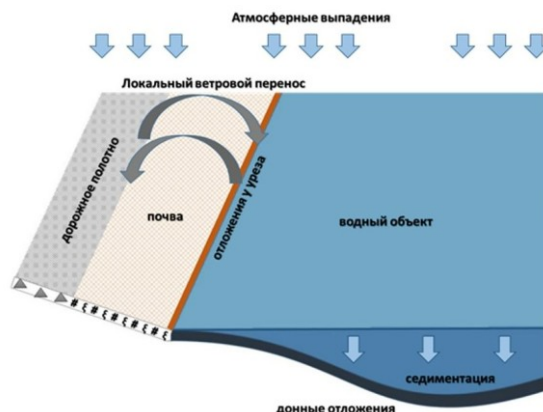


Рисунок 2 – Концептуальная модель последовательного расположения элементарных природных (почвы, донные отложения, отложения у уреза воды) и антропогенных (дорожное полотно) ландшафтов

Для отображения процентного вклада гранулометрических фракций использовалась двоичная логарифмическая классификация [1] песок (1,0–0,1 мм), алеврит (0,1–0,01 мм), глинистый ил (0,01–0,001 мм). Выбор этой классификации обусловлен тем, что нами выполнялось сравнение гранулометрического состава в различном материале, отобранном как в дорожной пыли, так и почвах и донных осадках. Определение гранулометрического состава производилось в лаборатории ЮНЦ РАН. Рассчитывалась суммарная фракция < 0,01 мм, которую различные исследователи, в зависимости от цели и задач, называют пелитом, физической глиной, глинистым илом. Эта фракция обычно используется для выяснения роли донных отложений в аккумуляции ТМ в морских и пресноводных водоемах [4; 9; 17]. Как указывалось выше по тексту частицы диаметром < 0,01 мм или по другой международной классификации PM_{10} по своей размерности соответствуют друг другу. В то же время, некоторое несоответствие наблюдается в использовании суммы процентного содержания частиц диаметром < 0,002 мм в нашем сообщении вместо < 0,0025 мм ($PM_{2,5}$), что объясняется особенностями применяемых методов разделения проб на фракции. Считаем, что такое сравнение вполне допустимо в связи с мизерным количеством частиц диаметром < 0,0005 мм в составе фракции с размерностью < 0,0025 мм. Отметим также, что в седиментологии принято разделение проб по процентному содержанию на пески (0,1 до 0,5 мм), алевриты в (0,01 до 0,1 мм) и пелиты (< 0,001 до 0,01 мм). Этот принцип был реализован при построении рис.3. Валовое содержание цинка и меди в образцах почв исследовали методом рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре «Спектроскоп МАКС-GV» в Южном федеральном университете по методике [25; 26]. Всего изучено 27 проб, для каждой из которых определен гранулометрический состав и содержание валовых форм Zn и Cu.

Результаты и обсуждение. Гранулометрический анализ донных отложений и почв в г. Шахты (шахта «Аютинская», «Южная», р. Аюта, р. Тузлов (г. Новочеркасск) и на рисовых чеках (г. Семикаракорск, д. Большая Орловка, п. Усьман) показал их весьма разнообразный и неоднородный состав. Большинство из них представлено мелким алевритом и крупными и средними глинистыми илами. В части проб обнаружено содержание растительных остатков и древних ископаемых углей. Средний диаметр частиц варьировался от 0,007 до 0,080 мм (в среднем 0,02 мм). По среднему диаметру частиц пробы располагаются в следующей последовательно-

сти: пыль > почва, отложения у уреза воды > донные отложения. Картина гранулометрического состава донных отложений водных объектов г. Шахты и почвах рисовых чеков довольно сходна (Таблица). В слоях донных отложений преобладающей является фракция частиц размером 0,002–0,005 мм, в почвах 0,005–0,01 мм, в дорожной пыли 0,01–0,05 мм. В пробах отложений до уреза воды, т. е. на границе раздела вода-берег, наблюдается возрастание количества частиц большей размерности по отношению к находящимся под водой донным осадкам. Частицы диаметром <0,01 являются доминирующими в составе исследуемых проб не зависимо от места их отбора. Они содержатся в количестве от 57,1 до 81,0 % (в среднем 70,2 %). Установлено, что содержание суммы фракций с размерностью частиц < 0,01 и < 0,002 мм располагаются в отобранных пробах в следующей последовательности: донные отложения > отложения у уреза воды > почва > пыль. Эта закономерность хорошо прослеживается на диаграмме (рис. 3), где наблюдается рост процентного содержания пелитов в донных осадках по отношению к другим средам. Отложения у уреза воды и почвы занимают промежуточное положение, в то время как фигуративные точки дорожной пыли располагаются ближе к вершине треугольника. Таким образом, по мере перемещения влекомого ветром и водными потоками материала наблюдается его дифференциация по среднему диаметру частиц в направлении конечного водоема стока, что согласуется с законом механической седиментации Н. М. Страхова [15]. При этом, видно (таблица), что в процентном отношении сумма количества частиц размерностью <0,002 мм в пыли, донных отложениях, отложениях у уреза воды, почве значительно ниже суммы содержания фракции частиц диаметром < 0,01. Не было обнаружено существенных различий в процентном содержании фракций < 0,01 и < 0,002 мм в зависимости от глубины отбора проб отложений у уреза воды и донных осадков. Количество частиц илистой фракции с диаметром < 0,001 мм изменялись в узком диапазоне – от 0,675 до 2,461 % (в среднем 1,3 %).

Был изучен вещественный состав субстанции размерностью <0,01 мм в образцах дорожной пыли. Оказалось, что она имеет поликомпонентный состав, это: почвенные частицы, агрегаты глинистых частиц (преимущественно хлорит-иллитового состава), тонкопесчано-алевритовые зерна кварца (~80 % терригенной фракции), полевые шпаты, кальцит, гипс, слюда, единичные зерна устойчивых акцессорных минералов (магнетита, циркон и др.). Известно, что илистая и пелитовая фракции, представленные глинистыми минералами естественного происхождения, содержат изоморфные примеси цинка. По некоторым оценкам его содержание в этих фракциях верхних слоев почв достигает первых десятков процентов [14].

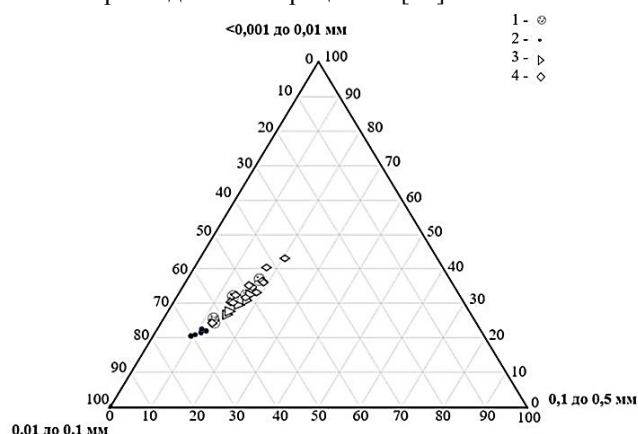


Рисунок 3 – Треугольная диаграмма процентного содержания песков (0,1 до 0,5 мм), алевритов (0,01 до 0,1 мм) и пелитов < 0,001 до 0,01 мм) в пробах почв, донных отложений, отложений у уреза воды и дорожной пыли: 1 – отложения у уреза; 2 – донные отложения; 3 – почва; 4 – дорожная пыль

В состав изученных нами природных образований микро- и мелкодисперсного материала входили почвенные частицы, агрегаты глинистых частиц (преимущественно хлорит-иллитового состава), тонко-песчано-алевритовые зерна кварца (~80 % терригенной фракции), кальцит, полевые шпаты, гипс, единичные зерна магнетита и титано-магнетита. Поэтому, очевидно, что цинк природного происхождения, будет вносить определенный вклад в его валовое содержание в отобранных пробах. Это находит подтверждение на рисунке 4, где представлены электронные снимки почвенных частиц, содержащих микрофазы цинка. На спектрах отчетливо заметны пики концентраций цинка. При этом отметим, что их интенсивность была заметно выше, чем меди.

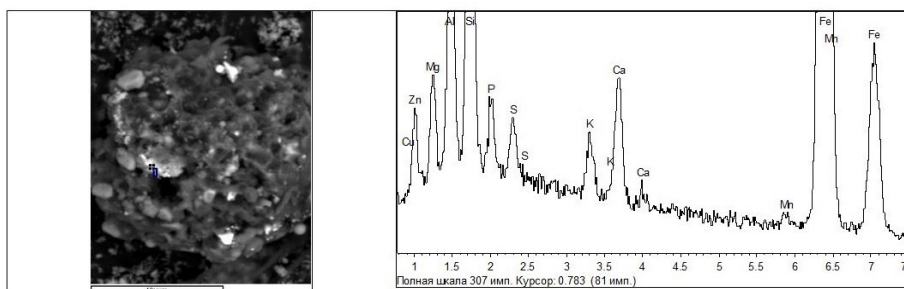


Рисунок 4 – Электронные снимки и спектры EDX элементного состава почвенных частиц

Кроме природного материала в дорожной пыли присутствовали техногенные образования – алюмосиликатные и железные микросферы, частицы сплавов разной степени корродированности (сталь, латунь, продукты разрушения оцинкованных металлических покрытий, сплавы и пр.), углеродные (сажистые и угольные) частицы. В микрочастицах корродированных сплавов пыли, выделенной из придорожного снега на ст. 7Р, было обнаружено присутствие цинка. Его наличие в пыли наряду с Fe, Al, Si, Ca, S и другими элементами фиксируется на спектрах EDX (рис. 5).

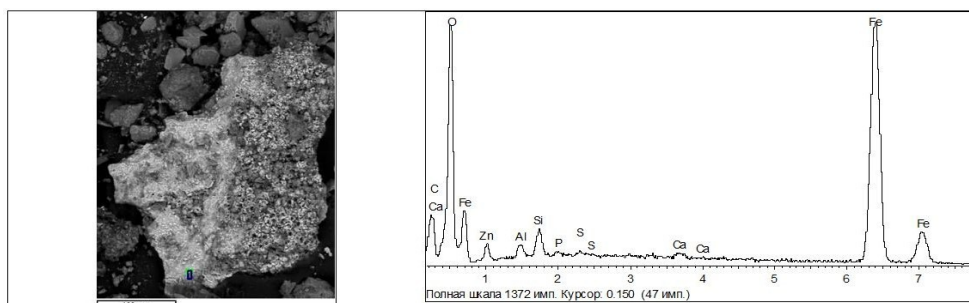


Рисунок 5 – Электронные снимки и спектры EDX элементного состава частиц корродированных сплавов

Для пыли, отобранной в угольных районах, характерно присутствие большого количества зольных микросфер (рис. 6а), образующихся при сжигании угля. В части проб донных отложений и придорожной пыли присутствуют растительные остатки и частицы ископаемых углей (содержание последних заметно возрастает в пробах дорожной пыли, отобранных в Восточном Донбассе [20]).

Техногенные включения в дорожной пыли были сложены алюмосиликатными микросферами, частицами металлов разной степени корродированности (сталь, латунь, микрошарики магнетита, продукты разрушения оцинкованных металлических покрытий, алюминиевые сплавы и пр.), углеродными (сажистыми и углистыми) частицами. Для пыли, отобранной в угольных районах, характерно присутствие большого количества алюмосиликатных частиц овальной формы (рис. 6б), образующихся при сжигании угля. В части проб донных отложений и придорожной пыли обнаруже-

но содержание растительных остатков и древних ископаемых углей. Содержание последних заметно возрастало в поле микроскопа в пробах дорожной пыли, отобранных в Восточном Донбассе [20]. Для пыли, отобранной в угольных районах, характерно присутствие большого количества алюмосиликатных частиц овальной формы (рис. 6б), образующихся при сжигании угля.

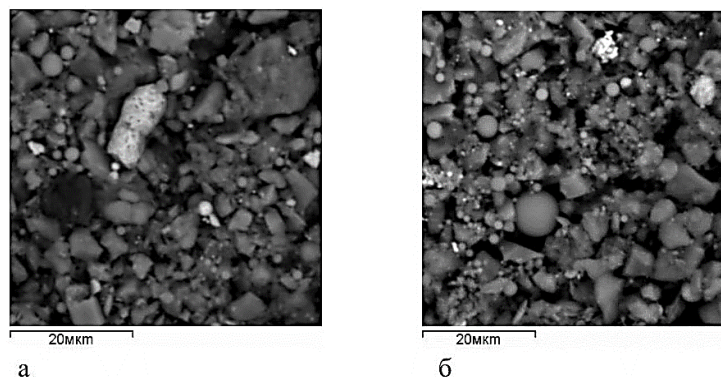


Рисунок 6 – Фотографии дорожной пыли Восточного Донбасса, сделанные с помощью электронного микроскопа: а – техногенные и естественные частицы в дорожной пыли из угольных районов; б – дорожная пыль г. Шахты

Исходя из выполненного нами обобщения и анализа закономерностей распределения уровней концентраций ТМ в частицах дорожной пыли и почвах различных регионов Земного шара, включая угольные, следует, что аккумулированные ими микроэлементы, поступая в конечные водоемы стока и водотоки, способствуют ухудшению качества воды [16]. Растворенные в воде тяжелые металлы (ТМ), прежде всего ртуть, цинк и медь являются для экосистемы р. Дон приоритетными загрязняющими микроэлементами [3; 17; 23]. Согласно работе [3], устойчивое повышение концентраций растворенной формы некоторых ТМ в воде до близких или превышающих ПДК значений, связано не только с техногенным загрязнением, но и с усилением выноса этих элементов, вследствие масштабной распашки почв водосборов рек бассейна Нижнего Дона и пыльных бурь во второй половине XX в.

В дорожной пыли, почвах, отложениях у уреза воды и донных отложениях были определены валовые содержания Zn и Cu (табл.). Содержания Zn варьируются независимо от места отбора проб в диапазоне от 31,1 до 120,9 мг/кг (в среднем 74,2 мг/кг). В донных осадках содержание Zn изменяется от 80,3 до 111,5 мг/кг (в среднем 95,6 мг/кг), в отложениях у уреза воды – от 31,1 до 90 мг/кг (в среднем 59,8 мг/кг), в почвах – от 54 до 70,9 мг/кг (в среднем 61,2 мг/кг), в дорожной пыли от 41,0 до 120,9 мг/кг (в среднем 80,08 мг/кг). Таким образом, по среднему содержанию Zn исследуемые объекты выстраиваются в следующий ряд: донные отложения > дорожная пыль > почва > отложения у уреза воды. Содержания Cu изменяются в диапазоне от 31,2 до 90,4 мг/кг (в среднем 55,4 мг/кг). В донных отложениях диапазон колебаний Cu составляет от 60,0 до 90,4 мг/кг (в среднем 71,4 мг/кг), в отложениях у уреза воды от 40,4 до 62,3 мг/кг (в среднем 47,7 мг/кг), в почве от 34,5 до 70,8 мг/кг (в среднем 51,4 мг/кг), в дорожной пыли от 40 до 60 мг/кг (ср. 51,2 мг/кг). По среднему содержанию Cu исследуемые объекты располагаются в следующей последовательности: донные отложения > дорожная пыль, почва > отложения у уреза воды. Обратим внимание на сходство в последовательности распределения концентраций обоих ТМ в изученных средах. В рядах последовательности распределения содержания Cu и Zn с одной стороны и суммы фракций (в %) с размерностью частиц <0,01 и <0,002 мм с другой обнаруживается определенная тенденция. Она заключается в сочетанном увеличении количества мелкодисперсных частиц в изученных средах и содержания в них обоих ТМ. Это согласуется с представлениями [25] о том, что рост

количества (в %) фракций $<0,002$ и $<0,01$ мм должен способствовать увеличению буферной способности изученных сред и соответственно прочно связанных соединений ТМ в них. На рисунке 7 видно, что эта тенденция, несколько нарушается в дорожной пыли, где средние содержания Zn и Cu изменяются не параллельно.

Большой интерес представляет собой обнаруженное нами относительно невысокое увеличение содержания цинка и практически отсутствие такового для меди в дорожной пыли относительно почв. Тогда как, например, в аэрозолях фоновых районов Белоруссии и Туркмении цинк и медь присутствуют в них по отношению к почвам с коэффициентами обогащения равными, соответственно, 20 и 35 [12]. Возможно, это обусловлено как природными особенностями формирования содержания Zn и Cu в аэрозолях описываемых регионов, так и тем, что в Ростовской области мы изучали пыль, которая извлекалась из снега, отобранного с поверхности дорожного полотна. Поэтому подобное соотношение содержаний в дорожной пыли Zn и Cu могло сформироваться в результате смешения материала, поступающего в результате выпадения из атмосферы аэрозолей, работы автотранспорта и ветрового переноса почвенных частиц.

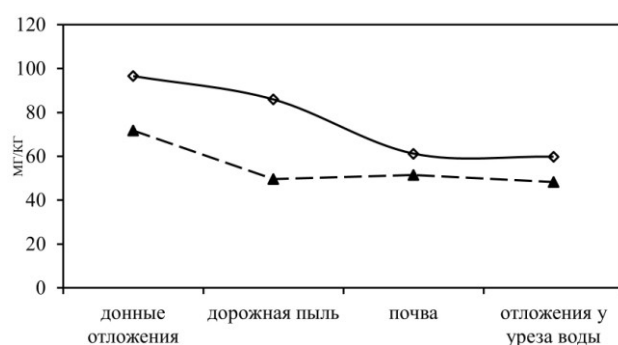


Рисунок 7 – Распределение средних содержаний Cu и Zn в донных отложениях, дорожной пыли, почве и отложениях у уреза воды.

Была изучена теснота связи между количеством (в %) частиц разной размерности и валовым содержанием меди и цинка в пробах почв, донных отложений, отложений у уреза воды, дорожной пыли с помощью построения регрессионных моделей (рис. 8а, б). Корреляция между содержанием (в %) фракции $<0,002$ мм и Zn в исследованных образцах для всего массива данных оказалась слабой прямой ($r = 0,3$, $p > 0,05$), в то время как для Cu она была существенно более тесной – высокой прямой ($r = 0,73$, $p < 0,05$).

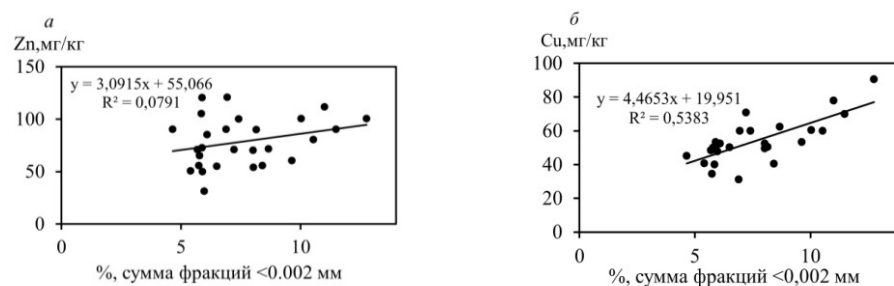


Рисунок 8: а – регрессионная зависимость между содержанием (в %) суммы фракции $< 0,002$ мм и Zn в донных отложениях, отложениях у уреза воды, почвах и дорожной пыли; б – регрессионная зависимость между содержанием (в %) фракции $<0,002$ мм и Cu в донных отложениях, отложениях у уреза воды, почвах и дорожной пыли

Рассмотрим регрессионную зависимость между количеством фракции $<0,01$ мм (в %) и валовым содержанием Zn и Cu в тех же образцах (рис 9а, б). Между этими показателями были соответственно установлены зависимости с коэффициентами

корреляции равными соответственно 0,2 и 0,6. Для зависимости с Zn характерна прямая слабая связь ($p > 0,05$), а для Cu – прямая заметная ($p < 0,05$). Основной причиной различий тесноты связи этих элементов могут являться особенности протекания сорбционно-десорбционных процессов в органо-минеральной матрице дорожной пыли, регулирующие миграционную способность Zn и Cu. Известно, что цинк по сравнению с медью характеризуется большей миграционной активностью, что вытекает из ряда подвижности, который в почвах и донных отложениях образуют металлы: $Zn^{2+} > Pb^{2+} > Cu^{2+}$ [24–26]. Микрочастицы в пыли также в значительно большей степени структурно разобщены, чем в почвах, донных осадках и отложениях у уреза воды, что облегчает их взаимодействие с окружающей средой и десорбцию ТМ. Возможной причиной отсутствия тесной связи между гранулометрическим составом и содержанием искомых элементов служит влияние воздействия эффекта «разубоживания» [17], которое происходит вследствие смешения между собой частиц, содержащих различное количество ТМ.

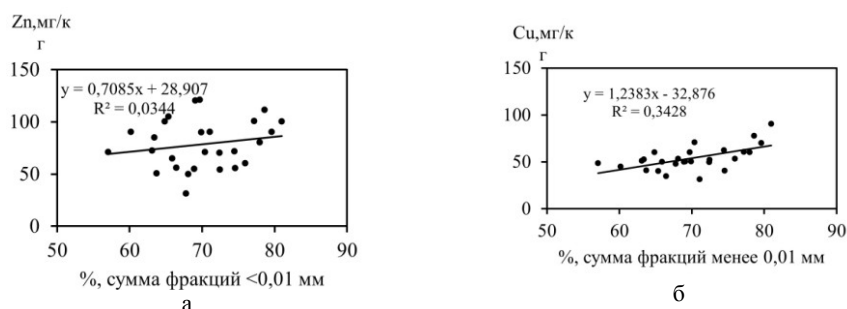


Рисунок 9: а – регрессионная зависимость между содержанием % фракции <0,01 мм и Zn в донных отложениях, отложениях у уреза воды, почвах и дорожной пыли; б – регрессионная зависимость между содержанием % фракции < 0,01 мм и Cu в донных отложениях, отложениях у уреза воды, почвах и дорожной пыли

Была рассчитана регрессионная зависимость между количеством Zn и Cu в пробах почв, донных отложений, отложений у уреза воды, дорожной пыли (рис. 10). Корреляция между элементами оказалась средней прямой ($r = 0,4$, $p < 0,05$). Наличие связи между содержанием этих элементов в пробах свидетельствует о единстве их происхождения, теснота которой затушевывается другими источниками природного и антропогенного происхождения. Среди них выделены основные источниками загрязнения атмосферы Zn и Cu в Ростовской области, к которым относятся автотранспорт, тепловые электрические станции (Новочеркасская ГРЭС, Ростовская ТЭЦ-2), промышленные предприятия. Так, по сведениям [26] в образцах сухой золы, угольной пыли угольного сырья и золоотвала Новочеркасской ГРЭС были обнаружены высокие концентрации Zn и Cu. В дорожной пыли аккумулируется больше количество «черного углерода», угольной пыли, техногенного материала, чем в других изученных средах. Это было подтверждено результатами инструментальных исследований вещественного состава, которые позволили с помощью электронной микроскопии обнаружить техногенные частицы Cu–Zn состава [20]. Содержание цинка в составе проб донных осадков, почв, отложений у уреза воды и дорожной пыли превышало таковое меди в среднем в 1,6–3,3 раза. Интересно, что в среднем в изученной дорожной пыли содержание цинка превалирует над таковым меди в 1,7 раза. Казалось бы, в исследованных средах мы должны были бы увидеть более существенный сдвиг в сторону возрастания содержания цинка относительно меди. Мы же наблюдаем картину непропорционального возрастания содержания цинка относительно меди только в пыли по сравнению с другими средами (см. рис. 7).

Таблица 1 – Гранулометрический состав проб пыли, отложений у уреза воды, донных отложений и почв

Станция	Описание проб	Средний диаметр частиц, мм	Диаметр фракций частиц, мм (количество в %)										Сумма (в %) частиц диаметром менее		Содержание, мг/кг с.в.	
			<0,001	0,001–0,002	0,002–0,005	0,005–0,01	0,01–0,05	0,05–0,1	0,1–0,25	0,25–0,5	0,5–1	1–2	2–0,002 мм	0,002 мм	Цинк	Медь
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
ст. 1 (3–4 м от берега водоема с пахотными водами)	Донные отложения, слой 0–5 см	0,007	1,93	9,072	35,123	32,503	21,06	0,308	0	0	78,628	11,002	111,5	77,8		
ст. 1 (3–4 м от берега водоема с пахотными водами)	Донные отложения, слой 5–10 см	0,008	1,687	8,347	33,827	33,333	22,45	0,353	0	0	77,194	10,034	100,5	60,4		
ст. 1 (вершина террикона)	Почва	0,009	1,128	6,092	29,253	33,923	28,9	0,705	0	0	70,396	7,22	70,9	70,8		
ст. 2 (3–4 м от берега водоема с пахотными водами)	Донные отложения, слой 0–5 см	0,007	2,173	9,313	35,987	32,113	20,14	0,275	0	0	79,586	11,486	90,3	70,0		
ст. 2	Отложения у уреза воды, слой 0–5 см	0,008	1,364	7,05	31,893	34,253	24,983	0,458	0	0	74,56	8,414	55,5	40,4		
ст. 2	Отложения у уреза воды, слой 5–10 см	0,009	1,398	6,748	29,4	32,37	29,427	0,748	0,059	0	69,916	8,146	90,0	50,4		
ст. 2	Пыль	0,01	0,965	5,975	28,21	34,567	29,5	0,748	0,036	0	69,717	6,94	120,9	60,0		
ст. 3 (место впадения р. Аюга в р. Грушевка)	Отложения у уреза воды, слой 0–5 см	0,011	0,675	4,73	25	33,31	34,863	1,298	0,123	0	63,715	5,405	50,5	40,7		
ст. 3 (место впадения р. Аюга в р. Грушевка)	Отложения у уреза воды, слой 5–10 см	0,01	0,808	5,161	27,333	34,497	31,33	0,835	0,031	0	67,779	5,969	31,1	47,7		
ст. 3 (место впадения р. Аюга в р. Грушевка)	Пыль	0,016	0,815	4,869	22,153	29,243	36,07	5,4	1,433	0,02	57,08	5,684	71,0	48,4		
ст. 9Н (р. Тузлов в районе автомобильного моста)	Отложения у уреза воды	0,008	1,389	7,28	31,577	34,203	25,077	0,472	0	0	74,449	8,669	71,7	62,3		
ст. 9Н (1–2 м от берега р. Тузлов в районе автомобильного моста)	Донные отложения, слой 0–5 см	0,007	1,826	8,713	34,627	32,813	21,687	0,335	0	0	77,979	10,539	80,3	60,0		
ст. 9Н (1–2 м от берега) 5–10 см	Донные отложения, слой 5–10 см	0,007	2,461	10,295	37,21	31,02	18,777	0,237	0	0	80,986	12,756	100,4	90,4		

Станция	Описание проб	Диаметр фракций частиц, мм (количество в %)										Сумма (в %) частиц диаметром менее 0,01 мм	Сумма (в %) частиц диаметром менее 0,002 мм	Содержание, мг/кг с.в.	
		Средний диаметр частиц, мм	<0,001	0,001–0,002	0,002–0,005	0,005–0,01	0,01–0,05	0,05–0,1	0,1–0,25	0,25–0,5		Цинк	Медь		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
ст. 4 (дорога возле ипподромного поля)	Пыль	0,013	1,055	6,357	27,34	30,123	30,177	3,962	0,98	0,01	64,875	7,412	100,2	60,0	
	Почва	0,009	1,297	6,721	30,003	34,397	27,01	0,574	0	0	72,418	8,018	70,3	49,5	
	Пыль	0,01	0,787	4,994	25,953	34,167	33,12	0,931	0,049	0	65,901	5,781	65,0	50,0	
	Пыль	0,008	1,619	8,015	32,903	33,413	23,633	0,419	0	0	75,95	9,634	60,4	53,2	
	Почва	0,01	0,8	4,944	26,277	34,457	32,607	0,882	0,037	0	66,478	5,744	55,8	34,5	
ст. 6 (возле источника Преподобного Серафима Саровского)	Почва	0,009	0,921	5,583	27,827	34,613	30,307	0,749	0	0	68,944	6,504	55,0	50,1	
	Почва	0,009	1,31	6,721	30,213	34,2	26,973	0,578	0	0	72,444	8,031	54,0	52,3	
	Дорожная пыль	0,011	1,054	4,826	27,3	30,1	32,05	4	0,6	0,01	63,1	5,88	72,5	51,1	
	Дорожная пыль	0,01	1,05	4,8	27,2	32,34	31,6	2,5	0,34	0,06	65,4	5,85	105,1	40,0	
	Дорожная пыль	0,05	1	3,65	24,15	31,35	33,2	5,55	0,9	0,15	60,2	4,65	90,3	45,0	
ст. 9Н (при въезде в г. Новочеркасск в районе автомобильного моста)	Дорожная пыль	0,01	1,053	5,036	27,3	30	32	4,22	0,3	0,08	63,4	6,089	85,1	52,4	
	Дорожная пыль	0,08	1,29	5,6	30	33,32	26,9	1,7	0,2	0,1	71,1	6,89	90,4	31,2	
	Дорожная пыль	0,08	1,29	4,6	29,83	33,3	28,1	2,7	0,09	0,01	69,1	5,89	120,4	50,2	
	Дорожная пыль	0,07	1,3	4,6	29,8	32,33	30,9	0,95	0,04	0,01	68,1	5,9	50,0	53,2	
	Дорожная пыль	0,07	1,3	4,6	29,8	32,33	30,9	0,95	0,04	0,01	68,1	5,9	50,0	53,2	

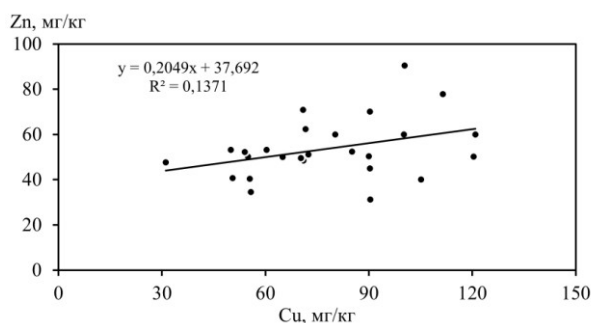


Рисунок 10 – Регрессионная зависимость между содержанием Cu и Zn в донных отложениях, отложениях у уреза воды, почвах и дорожной пыли

Заключение. В статье обсуждены результаты, полученные при выполнении экспедиционных работ по отбору проб дорожной пыли, отложений у уреза воды, донных отложений и почв в Ростовской агломерации, а также в северном и северо-восточном направлении от неё, включая центр развития угольной индустрии г. Шахты. Установлено, что содержание суммы фракций с размерностью частиц <0,01 мм и <0,002 мм располагаются в отобранных пробах в следующей последовательности: донные отложения > отложения у уреза воды > почва > дорожная пыль. В состав природных образований микро- и мелкодисперсного материала входят почвенные частицы, агрегаты глинистых частиц (преимущественно хлорит-иллитового состава), тонко- песчано-алевритовые зерна кварца (~80% терригенной фракции), кальцит, полевые шпаты, гипс, единичные зерна магнетита и титаномагнетита. Техногенные примеси в пыли были представлены алюмосиликатными микросферами, частицами металлов разной степени корродированности (сталь, латунь, фрагменты частиц Cu–Zn состава, микрошарики магнетита, продукты разрушения оцинкованных металлических покрытий, алюминиевые сплавы и пр.), углеродными (сажистыми и углистыми) частицами. Была рассчитана регрессионная зависимость между количеством Zn и Cu в пробах почв, донных отложений, отложений у уреза воды, дорожной пыли. Корреляция между содержанием элементов оказалась средней прямой. Наличие связи между содержанием этих элементов в пробах свидетельствует о единстве их происхождения, теснота которой затушевывается поступлением ТМ из других источников природного и антропогенного происхождения. Гранулометрический и вещественный состав донных отложений, отложений у уреза воды, почв, дорожной пыли являются доминирующими факторами, контролирующими сорбцию-десорбцию Zn и Cu. Кроме органоминеральной матрицы этих образований важными факторами и процессами, оказывающими влияние на поведение ТМ служат и другие – это физико-химические условия существования и миграции как самих частиц, так и связанных с ними ТМ, а также степень загрязненности последними окружающей среды.

Статья подготовлена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 19-05-50097.

Список источников

1. Безруков П. Л., Лисицын А. П. Классификация осадков современных морских водоемов // Тр. ИО АН СССР. 1960. Т. 32. С. 3–15.
2. Бузмаков С. А., Дзюба Е. А. Определение фонового содержания циклических элементов в почвах Тулымского камня (Пермский край) // Известия высших учебных заведений. Северокавказский регион. Серия: Естественные науки. 2016. № 3. С. 49–57.
3. Гарькуша Д. Н., Федоров Ю. А., Предеина Л. М. Пространственно–временная изменчивость концентрации меди и цинка в воде нижнего течения реки Дон // Метеорология и гидрология. 2022. № 3. С. 106–117.
4. ГСМОС: глобальная система мониторинга окружающей среды: ГСМОС/вода : Практ. руководство: Совмест. публ. Progr. ООН по окружающей среде, ВОЗ, Орг. ООН по выпр. образования, науки и культуры, Всемир. метеорол. орг. Москва: Центр междунар. проектов: ВНИИОЭНГ, 1994. 299 с.

5. Касимов Н. С., Власов Д. В., Кошелева Н. Е., Рыжов А. В., Набелкина К. С., Безберда Л. А. Опыт проведения и информативность эколого-геохимического мониторинга дорожной пыли в городах // Инженерно-экологические изыскания – нормативно-правовая база, современные методы и оборудование. Москва: Геомаркетинг, 2018. С. 117–122.
6. Катола В. М., Комогорцева В. Е. Пыль: источники образования, ее общая характеристика, пылевые заболевания (краткий обзор) // Бюллетень физиологии и патологии дыхания. 2018. № 67. С. 111–116.
7. Кизильштейн Л. Я. Экогеохимия элементов-примесей в углях. Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ, 2002. 296 с.
8. Клёнкин А. А., Корпакова И. Г., Павленко И. Ф., Темердашев З. А. Экосистема Азовского моря: антропогенное загрязнение. Краснодар: Азовский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства, 2007. – 324 с.
9. Козлова С. И. Трансформация форм ртути и процессы ее миграции в экосистемах кильской дельты р. Дунай и устьевого взморья: дис. ... канд. геогр. наук. Ростов-на-Дону, 1990. 200 с.
10. Кузьмич А. С. Справочник по борьбе с пылью в горнодобывающей промышленности. Москва: Недра, 1982. 239 с.
11. Мур Дж. В., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах. Контроль и оценка влияния. Москва: Мир, 1987. 286 с.
12. Петрухин В. А., Бурцева Л. В., Виженский В. А., Лапенко Л. А., Юшкин Е. И. Мониторинг фонового загрязнения природных сред. Ленинград: Гидрометеоздат, 1984. С. 71.
13. Приваленко В. В., Кузина З. Р., Коломенский Г. Ю., Гилич Л. В. Экологические проблемы Восточного Донбасса // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. серия: Естественные науки. 2004. № 7. С. 36–49.
14. Роева Н. Н., Ровинский Ф. Я., Кононов Э. Я. Специфические особенности поведения тяжелых металлов в различных природных средах // Журнал аналитической химии. 1996. Т. 51, № 4. С. 384–397.
15. Страхов Н. М. Развитие литогенетических идей в России и СССР. Москва: Наука, 1971. 357 с.
16. Федоров Ю. А., Гарькуша Д. Н., Чепурная В. И., Доценко И. В., Костенко Д. Ф. Кадмий в воде по континууму «эстуарий р. Миус- Таганрогский залив Азовского моря» - Географический вестник. 2021. № 3 (58). С. 115–129.
17. Фёдоров Ю. А., Хансиварова И. М., Предеина Л. М. Особенности распределения ртути и свинца в донных отложениях Таганрогского залива и юго-восточной части Азовского моря // Водное хозяйство. 2003. Т. 5, № 6. С. 51–58.
18. Fan, H., Zhao, C., and Yang, Y. A Comprehensive Analysis of the Spatio-Temporal Variation of Urban Air Pollution in China during 2014–2018 // Atmos. Environ. 2020. 220, 117066. doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117066.
19. Fedorov Yu A, Chepuraya V I, Dotsenko I V, Gar'kusha D N and Mikhailenko A V Features of granulometric and material composition of road dust, bottom sediments and soils in the Rostov region // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 2022, 1061 012036.
20. Fedorov Y. A., Solodko D. F., Chepuraya V.I., Dotsenko I. V., Talpa B. V., Levchenko S. V., Popov Y. V., Dmitrik L.Y. Physical and chemical properties, elemental and material snow composition in Rostov-on-Don // E3S Web of Conferences, 2021, 265, 02003.
21. Ginoux P., Prospero J. M., Gill T. E., Hsu N. C., Zhao M. Globalscale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products // Reviews of Geophysics. 2012. Vol. 50. № RG3005. -P. 1–36.
22. Kong, L., Xin, J., Liu, Z., Zhang, K., Tang, G., Zhang, W., et al. (2017). The PM2.5 Threshold for Aerosol Extinction in the Beijing Megacity. Atmos. Environ. 167, 458–465. doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.08.047.
23. Mikhailenko A., Fedorov Y., Dotsenko I., Solodko D. Water quality formation factors in the Azov Sea // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 2020-August (5.1). 2020. P. 871–878.
24. Minkina T. M., Pinskii D. L., Mendieta S. S., Fedorov U. A., Nevidomskaya D. G., Bauer T. V. Regularities of Cu (II), Pb (II) and Zn (II) adsorption from nitrate, chlorides, sulphates and acetates solutions by of ordinary chernozem // Eurasian Soil Science. 2013. Vol. 53. № 4. P. 182–177.
25. Minkina T. M., Fedorenko G. M., Nevidomskaya D. G., Fedorov Yu., Pol'shina T., Fedorenko A., Chaplygin V., Mandzhieva S., Ghazaryan K., Movsesyan H., Hassan T. Adaptive

potential of *Typha laxmannii* Lepech to a heavy metal contaminated site // *Plant Soil*. 2021. № 465. P. 273–287.

26. Minkina T. M., Fedorov Y. A., Nevidomskaya D. G., Mandzhieva S. S., Chaplygin V. A., Pol'shina T. N. Heavy metals in soils and plants of the Don river estuary and the Taganrog bay coast // *Eurasian Soil Science*. 2017. Vol. 50, № 9. P. 1033–1047.

27. Moreno T., Trechera P., Querola X., Lahb R., Johnson D., Wranad A., Williams B. Trace element fractionation between PM10 and PM2.5 in coal mine dust: Implications for occupational respiratory health // *International Journal of Coal Geology*. 2019. Vol. 203. P. 52–59.

28. Petsonk E. L., Rose C., Cohen R. Coal mine dust lung disease. New lessons from old exposure // *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*. 2013. № 187 (11). P. 1178–1185.

29. Rylov V., Fedorov Yu., Gamov M. The distribution of methane and mercury concentrations and their emission in East Donbas // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016. Conference Proceedings, June 28 – July 6. 2016. Book 5, vol. 1. P. 701–706.

30. Zhao H., Yin C., Chen M., Wang W. Risk assessment of heavy metals in street dust particles to a stream network // *Journal of Soils and Sediments*. 2009. Vol. 18. P. 173–183.

31. Zhou X., Cao Z., Ma Y., Wang L., Wu R., Wang W. Concentrations, correlations and chemical species of PM2.5/PM10 based on published data in china: Potential implications for the revised particulate standard // *Chemosphere*. 2016. № 144. P. 518–526.

References

1. Bezrukov P. L., Lisitsyn A. P. Classification of sediments of modern marine reservoirs // *USSR*. 1960; 32:3–15 (In Russ.).

2. Buzmakov S. A., Dziuba E. A. Determination of the background content of cyclic elements in the soils of the Tulymsky stone (Perm Territory). *Izvestiya of higher educational institutions. North Caucasian region. Series: Natural Sciences*. 2016; 3:49–57 (In Russ.).

3. Garkusha D. N., Fedorov Yu. A., Predeina L. M. Spatial and temporal variability of the concentration of copper and zinc in the water of the lower reaches of the Don River. *Meteorology and Hydrology*. 2022; 3:106–117 (In Russ.).

4. GEMS: Global Environmental Monitoring System: GEMS/Water: Prakt. guide: Joint. publ. Program UN Environment, WHO, Org. UN on ref. education, science and culture, World. meteorol. org. Moscow: Center for Intern. projects: VNIIOENG; 1994:299 p. (In Russ.).

5. Kasimov N. S., Vlasov D. V., Kosheleva N. E., Ryzhov A. V., Nabelkina K. S., Bezberdaya L. A. Experience in carrying out and information content of environmental and geochemical monitoring of road dust in cities. *Engineering and environmental surveys – regulatory framework, modern methods and equipment*. Moscow: Geomarketing; 2018:117–122 (In Russ.).

6. Katola V. M., Komogortseva V. E. Dust: sources of formation, its general characteristics, dust diseases (brief review). *Bulletin of physiology and pathology of respiration*. 2018; 67:111–116 (In Russ.).

7. Kizilshtein L. Ya. Ecogeochemistry of impurity elements in coals. Rostov-on-Don; 2002:296 (In Russ.).

8. Klenkin A. A., Korpakova I. G., Pavlenko I. F., Temerdashev Z. A. Ecosystem of the Sea of Azov: anthropogenic pollution. Krasnodar: Azov Research Institute of Fisheries; 2007:324 (In Russ.).

9. Kozlova S. I. Transformation of forms of mercury and the processes of its migration in the ecosystems of the Kiliya delta of the river. Danube and estuarine coast. Rostov-on-Don; 1990:200 p. (In Russ.).

10. Kuzmich A. S. Handbook of dust control in the mining industry. Moscow: Nedra; 1982:239 (In Russ.).

11. Moore J. V., Ramamurthy S. Heavy metals in natural waters. Monitoring and impact assessment. Moscow: Mir; 1987:286 p. (In Russ.).

12. Petrukhin V. A., Burtseva L. V., Vizhensky V. A., Lapenko L. A., Yushkin E. I. Monitoring of background pollution of natural environments. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1984:71 p. (In Russ.).

13. Privalenko V. V., Kuzina Z. R., Kolomensky G. Yu., Gipich L. V. Ecological problems of the Eastern Donbas. *Izvestia of higher educational institutions. North Caucasian region. series: Natural sciences*. 2004; 7:36–49 (In Russ.).

14. Roeva N. N., Rovinsky F. Ya., Kononov E. Ya. Specific features of the behavior of heavy metals in various natural environments. *Journal of Analytical Chemistry*. 1996; 51(4):384–397 (In Russ.).

15. Strakhov N. M. Development of lithogenetic ideas in Russia and the USSR. Moscow: Nauka; 1971:357 p. (In Russ.).

16. Fedorov Yu. A., Garkusha D. N., Chepurnaya V. I., Dotsenko I. V., Kostenko D. F. Cadmi-

um in water along the continuum “estuary of the river. Mius-Taganrog Bay of the Sea of Azov”. *Geographic Bulletin*. 2021; 3(58):115–129 (In Russ.).

17. Fedorov Yu. A., Khansivarova I. M., Predeina L. M. Features of the distribution of mercury and lead in the bottom sediments of the Taganrog Bay and the southeastern part of the Sea of Azov. *Water industry*. 2003; 5(6):51–58 (In Russ.).

18. Fan H., Zhao C., and Yang, Y. A Comprehensive Analysis of the Spatio-Temporal Variation of Urban Air Pollution in China during 2014–2018. *Atmos. Environ.* 2020. 220, 117066. doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117066.

19. Fedorov Yu. A., Chepurayeva V. I., Dotsenko I. V., Gar'kusha D. N. and Mikhailenko A. V. Features of granulometric and material composition of road dust, bottom sediments and soils in the Rostov region. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2022, 1061 012036.

20. Fedorov Y. A., Solodko D. F., Chepurayeva V. I., Dotsenko I. V., Talpa B. V., Levchenko S. V., Popov Y. V., Dmitrik L. Y. Physical and chemical properties, elemental and material snow composition in Rostov-on-Don. *E3S Web of Conferences*, 2021: 265, 02003.

21. Ginoux P., Prospero J. M., Gill T. E., Hsu N. C., Zhao M. Globalscale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products. *Reviews of Geophysics*. 2012; 50(RG3005);1–36.

22. Kong L., Xin J., Liu Z., Zhang K., Tang G., Zhang W., et al. The PM_{2.5} Threshold for Aerosol Extinction in the Beijing Megacity. *Atmos. Environ.* 2017; 167:458–465. doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.08.047.

23. Mikhailenko A., Fedorov Y., Dotsenko I., Solodko D. Water quality formation factors in the Azov Sea. *2020 International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 2020-August(5.1)*. 2020:871–878.

24. Minkina T. M., Pinskiy D. L., Mendieta S. S., Fedorov U. A., Nevidomskaya D. G., Bauer T. V. Regularities of Cu (II), Pb (II) and Zn (II) adsorption from nitrate, chlorides, sulphates and acetates solutions by of ordinary chernozem. *Eurasian Soil Science*. 2013; 53 (4):182–177.

25. Minkina T. M., Fedorenko G. M., Nevidomskaya D. G., Fedorov Yu., Pol'shina T., Fedorenko A., Chaplygin V., Mandzhieva S., Ghazaryan K., Movsesyan H., Hassan T. Adaptive potential of *Typha laxmannii* Lepech to a heavy metal contaminated site. *Plant Soil*. 2021; 465:273–287.

26. Minkina T. M., Fedorov Y. A., Nevidomskaya D. G., Mandzhieva S. S., Chaplygin V. A., Pol'shina T. N. Heavy metals in soils and plants of the Don river estuary and the Taganrog bay coast. *Eurasian Soil Science*. 2017; 50(9):1033–1047.

27. Moreno T., Trechera P., Querola X., Lahb R., Johnson D., Wranad A., Williamson B. Trace element fractionation between PM₁₀ and PM_{2.5} in coal mine dust: Implications for occupational respiratory health. *International Journal of Coal Geology*. 2019; 203:52–59.

28. Peterson E. L., Rose C., Cohen R. Coal mine dust lung disease. New lessons from old exposure. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*. 2013; 187(11):1178–1185.

29. Rylov V., Fedorov Yu., Gamov M. The distribution of methane and mercury concentrations and their emission in East Donbas. *16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016. Conference Proceedings, June 28 – July 6*. 2016; 5(1):701–706.

30. Zhao H., Yin C., Chen M., Wang W. Risk assessment of heavy metals in street dust particles to a stream network. *Journal of Soils and Sediments*. 2009; 18:173–183.

31. Zhou X., Cao Z., Ma Y., Wang L., Wu R. and Wang, W. Concentrations, correlations and chemical species of PM_{2.5}/PM₁₀ based on published data in china: Potential implications for the revised particulate standard. *Chemosphere*. 2016. 144:518–526.

Информация об авторах

Ю. А. Федоров – доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой;

В. И. Чепурная – аспирант;

Д. И. Гарькуша – кандидат географических наук, доцент;

И. В. Доценко – кандидат географических наук, доцент;

А. В. Михайленко – кандидат географических наук, доцент;

Ю. В. Попов – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, руководитель Центра исследований минерального сырья и состояния окружающей среды;

И. Ю. Гаврилова – старший лаборант отдела научно-исследовательских работ и прикладных исследований.

Information about the authors

Yu. A. Fedorov – Doctor of Sciences (Geographical), Professor, Head of the Department of Physical Geography, Ecology and Nature Protection;

V. I. Chepur – graduate student;

D. N. Garkusha – Candidate of Sciences (Geographical), Associate Professor;

I. V. Dotsenko – Candidate of Sciences (Geographical), Associate Professor;

A. V. Mikhaylenko – Candidate of Sciences (Geographical), Associate Professor;

Yu. V. Popov – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor, Head of the Center for Collective Use of Scientific Equipment "Center for Research of Mineral Raw Materials and the State of the Environment";

I. Yu. Gavrilova – Senior laboratory assistant of the Department of Scientific Research and Applied Research.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 26.07.2022; одобрена после рецензирования 04.08.2022; принята к публикации 12.08.2022.

The article was submitted 26.07.2022; approved after reviewing 04.08.2022; accepted for publication 12.08.2022.