

ТРАЕКТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ — ЧЕЛОВЕК, ПРИРОДА, ТЕХНОЛОГИИ



НАУЧНЫЙ ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№ 4 (16) 2025





ТРАЕКТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ – ЧЕЛОВЕК, ПРИРОДА, ТЕХНОЛОГИИ

№ 4 (16) 2025

Главный редактор

Ярмошенко Илья Владимирович, к. ф.-м. н., директор Института промышленной экологии УрО РАН (г. Екатеринбург)

Заместитель главного редактора

Васильев Алексей Владимирович, к. т. н., старший научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН (г. Екатеринбург)

Редакционная коллегия

Вараксин Анатолий Николаевич, д. ф.-м. н., профессор, главный научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН (г. Екатеринбург)

Веселкин Денис Васильевич, д. б. н., заведующий лабораторией Института экологии растений и животных УрО РАН (г. Екатеринбург)

Екидин Алексей Акимович, к. ф.-м. н., доцент, ведущий научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН (г. Екатеринбург)

Захаров Вячеслав Иосифович, д. ф.-м. н., профессор, заведующий лабораторией Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина (г. Екатеринбург)

Иванов Владимир Юрьевич, к. ф.-м. н., директор института Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина (г. Екатеринбург)

Крышев Александр Иванович, д. б. н., заведующий лабораторией Научно-производственного объединения «Тайфун» Росгидромета (г. Обнинск)

Марков Дмитрий Владимирович, д. т. н., директор АО «НИИТФА» (г. Москва)

Микляев Петр Сергеевич, д. г.-м. н., профессор РАН, главный научный сотрудник Института геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН (г. Москва)

Назаров Евгений Игоревич, к. т. н., научный сотрудник ИПЭ УрО РАН (г. Екатеринбург)

Сюрдо Александр Иванович, д. ф.-м. н., профессор, главный научный сотрудник Института физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН (г. Екатеринбург)

Талалай Александр Григорьевич, д. г.-м. н., профессор, заведующий кафедрой Уральского государственного горного университета (г. Екатеринбург)

Ташлыков Олег Леонидович, д. т. н., профессор, ведущий научный сотрудник Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина (г. Екатеринбург)

Тузанкина Ирина Александровна, заслуженный деятель науки РФ, д. м. н., профессор, Институт иммунологии и физиологии УрО РАН (г. Екатеринбург)

Юрков Анатолий Константинович, к. г.-м. н., заведующий лабораторией Института геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН (г. Екатеринбург)



СОДЕРЖАНИЕ

Моделирование космического излучения на территории Восточно-Уральского заповедника с помощью программы CARI-7 С. М. Молчанов, Д. Д. Десятов	2
Роль программы «Стартап как диплом» в системе развития компетенций технологического предпринимательства у студентов Уральского федерального университета Д. А. Филиппов, Е. М. Баглаева	18
Подход к определению гранулометрического состава современных поверхностных наносов городской среды А. А. Селезнев, Е. С. Душевина	30
Получение мелкодисперсных порошков ниобата лития с использованием концентрированных растворов нитрата лития Д. В. Иваненко	68
Подготовка экспорта российских реакторов на быстрых нейтронах с замкнутым ядерным топливным циклом Н. В. Горин, В. В. Власов, В. П. Кучинов, А. А. Артамонов, В. М. Декусар, В. В. Коробейников, А. П. Васильев, А. В. Кривцов, В. В. Шидловский	75

**ТРАЕКТОРИЯ
ИССЛЕДОВАНИЙ –
ЧЕЛОВЕК, ПРИРОДА,
ТЕХНОЛОГИИ**
№ 4 (16) 2025

Главный редактор:
И. В. Ярмошенко

Редактор:
М. Э. Чупрякова

Компьютерная верстка:
Д. Д. Десятов

Дизайн обложки:
А. В. Вожаков

Автор фото:
Ю. П. Захаров

Адрес редакции:
620990, г. Екатеринбург,
ИПЭ УрО РАН,
ул. С. Ковалевской, 20

Тел.: (343) 374-37-71
E-mail: iie@ecko.uran.ru
www.restrajectory.ru

Журнал зарегистрирован
Федеральной службой
по надзору в сфере связи,
информационных
технологий и массовых
коммуникаций
27 апреля 2022 г.,
Эл№ ФС77-83207

Учредитель
ИПЭ УрО РАН

Перепечатка материалов,
опубликованных в журнале,
возможна только с
разрешения редакции.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ВОСТОЧНО-УРАЛЬСКОГО ЗАПОВЕДНИКА С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ CARI-7

С. М. Молчанов^{1,2}, Д. Д. Десятов²

¹ Уральский федеральный университет им. первого Президента России, г. Екатеринбург, Россия

² Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

В статье представлены результаты работы по оценке мощности эффективной дозы (МЭД), обусловленной космическим излучением, на территории Восточно-Уральского государственного заповедника с помощью программного обеспечения CARI-7. Показан диапазон изменения МЭД космического излучения от 32,00 до 39,67 нЗв/ч за период с 2022 по 2025 г. включительно. Средняя МЭД космического излучения в этот период – 35,71 нЗв/ч. Был рассчитан вклад отдельных видов космического излучения в суммарную МЭД. Наибольший вклад в МЭД обусловлен нейтронами – 42,53 %. Среднее значение МЭД космического излучения с момента аварии на химкомбинате «Маяк» до 2025 г. на территории Восточно-Уральского заповедника – 34,75 нЗв/ч.

Ключевые слова: космическое излучение; Восточно-Уральский государственный заповедник; гамма-излучение; нейтронное излучение; мощность дозы; CARI-7.

1. Введение

Термин «космическое излучение», или «космические лучи» (англ. *cosmic rays*), впервые был предложен американским физиком и нобелевским лауреатом Робертом Милликеном в 1926 г. [1]. Милликен считал, что оно состоит только из гамма-излучения, что было ошибочным. Дальнейшее изучение космического излучения в XX в. показало, что оно содержит также заряженные частицы.

Космические лучи условно делятся на [2]:

- первичные космические лучи: галактические частицы, которые проникают в Солнечную систему и могут столкнуться с Землей;
- солнечные космические лучи: частицы, возникающие на Солнце (иногда их относят к первичным космическим лучам);
- вторичные космические лучи: частицы, образующиеся в атмосфере Земли, когда первичные космические лучи сталкиваются с атмосферными атомами, создавая ливни вторичных частиц (их называют каскадными частицами);
- наземные космические лучи: частицы, которые в конечном итоге сталкиваются с Землей (менее 1 % из них – первичные частицы, в основном это каскадные частицы, начиная с третьего и заканчивая седьмым поколением).

Первичные космические лучи (включая солнечные космические лучи) в основном состоят из протонов (92 %), α -частиц (6 %), а также из более тяжелых ядер, электронов e^- и позитронов e^+ [3].

При взаимодействии первичных космических лучей с атмосферными ядрами возникает три компонента [4]:

- электромагнитный «мягкий» компонент (гамма-излучение, возникающее в результате распада пионов π^0 , а также при торможении заряженных частиц; электроны e^- и позитроны e^+ , возникающие в результате распада мюонов μ^+ , μ^- , а также в паре при взаимодействии гамма-излучения с атмосферой);
- мезонный «жесткий» компонент (мюоны μ^+ , μ^- , возникающие в результате распада пионов π^+ , π^-);

– адронный компонент (нуклоны – нейтроны n^0 и протоны p^+ ; мезоны – пионы π^+ , π^- и каоны K^+ , K^-).

Субатомные частицы из каскада также могут вызывать ядерные реакции, например, реакции скалывания или нейтронного захвата [4]. Новые ядра, образованные при взаимодействии первичных или вторичных частиц космических лучей с атмосферными, называются космогенными нуклидами. Космогенные нуклиды могут быть стабильными (например, ^6Li , ^7Li , ^9Be , ^{10}B , ^{11}B) и радиоактивными (^3H [5], ^{14}C [6], ^{32}P , изотопы Cl , I , Ne и т. д.).

Спектр первичного космического излучения имеет широкий энергетический диапазон – от 10^6 до единиц 10^{20} эВ [4], однако вблизи Земли основную часть потока составляют солнечные частицы с энергиями единиц мегаэлектронвольт (МэВ) (исключение составляют солнечные частицы, генерирующиеся на Солнце или вблизи него во время солнечных вспышек и корональных выбросов масс, – их энергия достигает десятков гигаэлектронвольт (ГэВ) [7]). В целом частицам нужна очень высокая энергия, чтобы создать каскад, который может проникнуть до уровня моря, – не менее 1 ГэВ, за исключением частиц с траекторией, направленной прямо вниз, в один из магнитных полюсов Земли [2]. Поток солнечного излучения главным образом зависит от 11-летнего солнечного цикла, высоты над уровнем моря и геомагнитных координат [8]. На рис. 1. представлен график солнечного цикла, отображающий динамику активности Солнца в период с 2005 по 2025 г., а также прогноз до 2030 г., по данным открытой платформы SpaceWeatherLive [9].

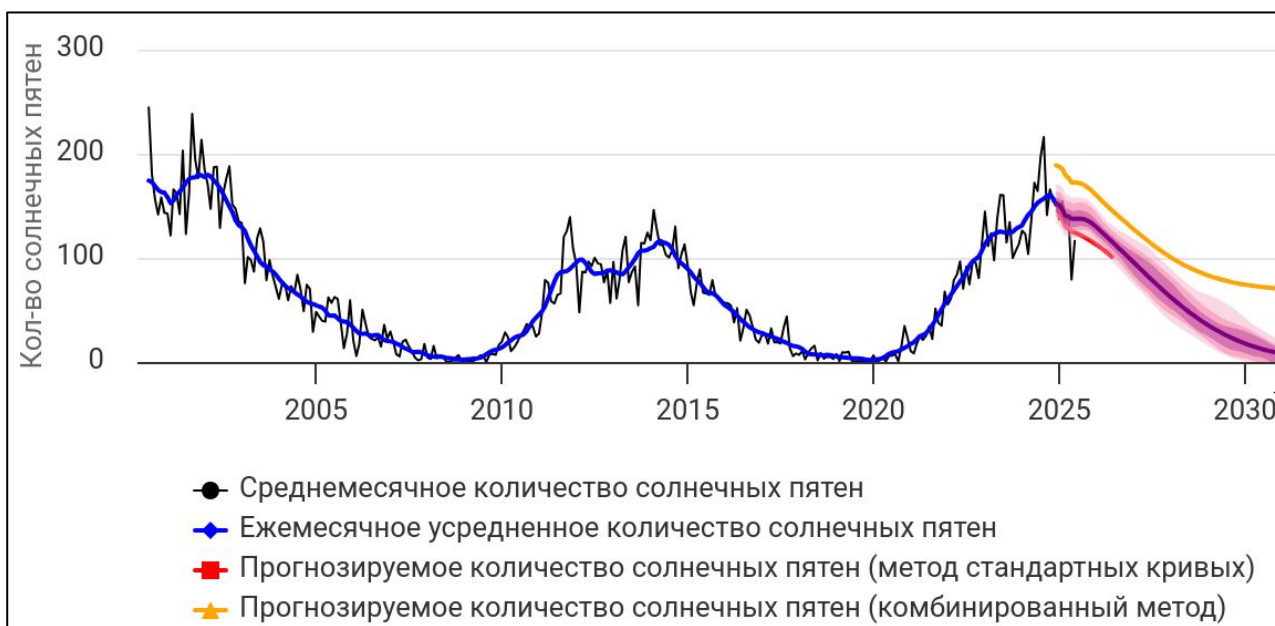


Рис. 1. Динамика активности Солнца (количество солнечных пятен) в период с 2005 по 2025 г., а также прогноз до 2030 г. [9]

Непосредственное измерение мощности дозы, создаваемой космическим излучением, сопряжено с огромными временными затратами и ресурсами [10], однако МЭД дозы может быть рассчитана с использованием аналитических моделей, реализованных в программных средствах [11, 12]. Измерение мощности дозы природного излучения может быть реализовано инструментально. Результаты измерений будут зависеть от пространственного распределения природных радионуклидов, которое определяется местными геологическими особенностями [13, 14]. Аттестованные средства измерения, позволяющие в полевых условиях выполнять гамма-спектрометрические исследования поверхностной и удельной активности радионуклидов, открывают возможность для формирования модели, связывающей два измеряемых параметра – мощность дозы и значение поверхностной или удельной активности исследуемого радионуклида [15–18]. На

достоверность такой модели будут влиять факторы, формирующие отклик детектора наряду с излучением исследуемого радионуклида. В число таких факторов входят: собственный фон средств измерения (СИ); другие гамма-излучающие радионуклиды, например, природные; космическое излучение. В случае спектрометрических исследований вклад других радионуклидов в мощность дозы можно оценить по результатам измерения их удельной активности. Для оценки собственного фона СИ требуются отдельные исследования. Оценка вклада космического излучения может быть получена расчетным методом.

Данная статья – продолжение цикла работ, посвященных оценке радиационной обстановки на территории Восточно-Уральского государственного заповедника (далее – заповедника) – головной части Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС) [18]. Цель работы – оценить МЭД космического излучения на территории заповедника. Результаты исследования позволят в перспективе учитывать космическое излучение для оценки радиационной обстановки на данной территории.

2. Материалы и методы

Оценка МЭД космического излучения выполнена с помощью программы CARI-7. Данный компьютерный код используется для оценки галактического космического излучения на членов экипажа самолетов во время перелетов [3, 19]. Для моделирования излучения используется база данных (долговременная солнечная активность, кратковременные отклонения солнечной активности от среднемесячного значения, эффекты геомагнитных бурь), полученная на основе симуляции атмосферного излучения методом Монте-Карло с использованием программы MCNPX (программа, позволяющая моделировать прохождение различных частиц через атмосферу). CARI-7 также учитывает влияние солнечной активности и геомагнитного поля на уровень галактического космического излучения на выбранную пользователем дату. Программа позволяет рассчитать мощность AMBIENTной дозы, мощность эффективной и поглощенной дозы в конкретной географической точке с указанием даты и времени.

Для проведения расчетов был сформирован файл с исходными данными, взятыми из работы [18] (коды точек, координаты, дата, время, высота над уровнем моря), включая исследуемые составляющие космического излучения и требуемые дозиметрические величины.

Объект исследования

Восточно-Уральский государственный заповедник расположен в лесостепной зоне на территории Каслинского и Кунашакского районов Челябинской области, его площадь составляет 14 750 га [18], образован в 1966 г. спустя 9 лет после аварии на химкомбинате «Маяк». На рис. 2 изображена территория заповедника [20].

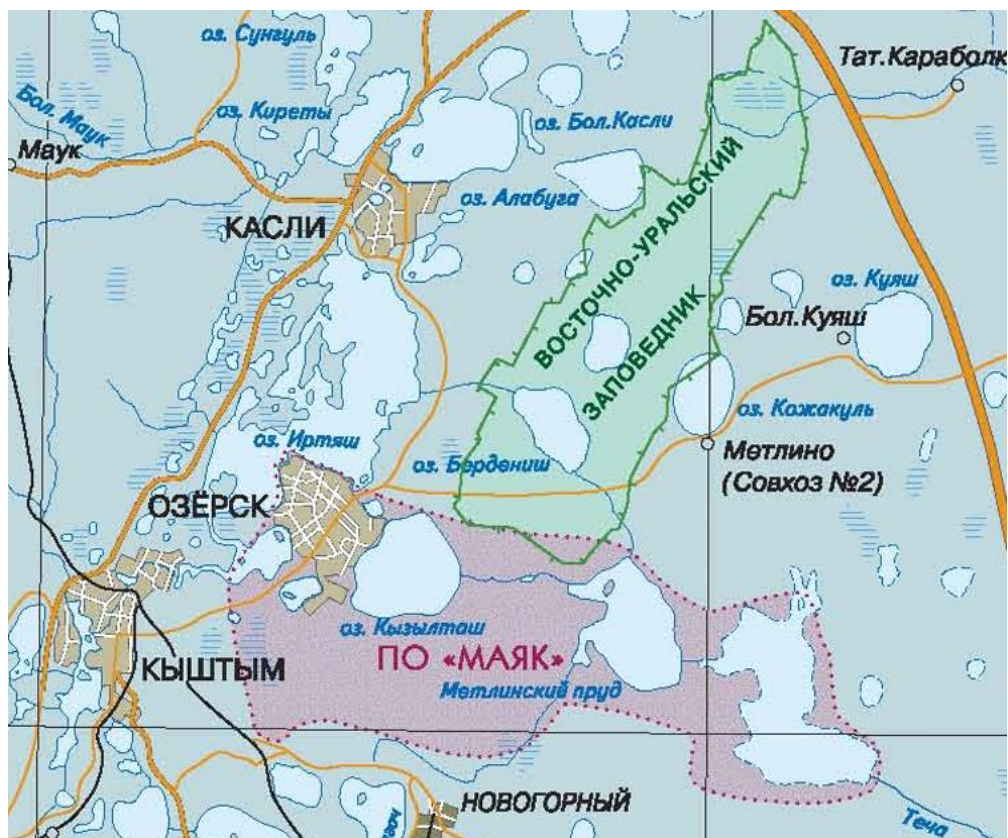


Рис. 2. Территория Восточно-Уральского заповедника [20]

3. Результаты

В работе [18] (табл. 2.3 и 3.1) представлены исходные параметры для программы, позволяющие производить расчеты в заданных координатах: 50 точек, расположенных вдоль границы заповедника, остальные 120 точек распределены по всей исследуемой территории, исключая озера, болота и другие водоемы, а также непроходимые места. Минимальная наблюдаемая высота – 212 м, максимальная – 273 м. Разница между максимальной и минимальной высотой составила 61 м.

В табл. 1 представлены результаты расчета, выполненные с помощью программы CARI-7 от источников космического излучения, составляющих вклад не менее 99 % в суммарную МЭД. Для того чтобы привязать полученные результаты к исследуемым точкам, использовались их коды [18, табл. 3.1].

Таблица 1. Результаты расчета МЭД, нЗв/ч

Код точки	Суммарное	Нейтроны	Фотоны	Электроны	Позитроны	Отрицательные мюоны	Положительные мюоны	Протоны
PR3L_2	36,96	16,44	2,86	1,73	0,76	6,48	6,47	2,14
PR3L_3	36,91	16,42	2,86	1,73	0,76	6,47	6,46	2,14
PR3L_4	37,17	16,53	2,88	1,74	0,77	6,52	6,50	2,15
PR3L_5	37,41	16,64	2,90	1,76	0,77	6,56	6,55	2,16
PR3L_6	37,38	16,62	2,90	1,75	0,77	6,56	6,54	2,16
PR3L_7	37,38	16,62	2,90	1,75	0,77	6,56	6,54	2,16
PR3L_8	37,30	16,59	2,89	1,75	0,77	6,54	6,53	2,16
PR3L_9	35,26	15,18	2,80	1,70	0,75	6,38	6,37	2,02
PR3L_10	34,86	15,01	2,76	1,68	0,74	6,31	6,29	1,99
PR3L_11	34,85	15,01	2,76	1,68	0,74	6,31	6,29	1,99
PR3L_12	34,73	14,95	2,76	1,68	0,74	6,28	6,27	1,99
PR3L_13	34,63	14,91	2,75	1,67	0,74	6,27	6,25	1,98
PR3L_14	35,02	15,08	2,78	1,69	0,74	6,34	6,32	2,00
PR3L_15	35,06	15,09	2,78	1,69	0,75	6,34	6,33	2,01

Продолжение табл. 1

Код точки	Суммарное	Нейтроны	Фотоны	Электроны	Позитроны	Отрицательные мюоны	Положительные мюоны	Протоны
PR3L_16	34,63	14,91	2,75	1,67	0,74	6,26	6,25	1,98
PR3L_17	34,85	15,00	2,76	1,68	0,74	6,31	6,29	1,99
PR3L_18	34,59	14,89	2,74	1,67	0,74	6,26	6,24	1,98
PR3L_19	34,50	14,85	2,74	1,66	0,73	6,24	6,23	1,97
PR3L_20	34,62	14,90	2,75	1,67	0,74	6,26	6,25	1,98
PR3L_21	34,77	14,97	2,76	1,68	0,74	6,29	6,28	1,99
PR3L_22	35,09	15,10	2,78	1,69	0,75	6,35	6,33	2,01
PR3L_23	35,00	15,07	2,78	1,69	0,74	6,33	6,32	2,00
PR3L_24	35,02	15,07	2,78	1,69	0,74	6,34	6,32	2,00
PR3L_25	34,97	15,06	2,77	1,69	0,74	6,33	6,31	2,00
PR3L_26	34,91	15,03	2,77	1,68	0,74	6,32	6,30	2,00
PR3L_27	34,95	15,05	2,77	1,69	0,74	6,32	6,31	2,00
PR3L_28	34,87	15,01	2,77	1,68	0,74	6,31	6,29	2,00
PR3L_29	35,12	15,12	2,79	1,70	0,75	6,35	6,34	2,01
PR3L_30	34,87	15,01	2,77	1,68	0,74	6,31	6,29	2,00
PR3L_31	35,01	14,92	2,80	1,70	0,75	6,39	6,38	2,00
PR3L_32	34,83	14,84	2,78	1,70	0,75	6,36	6,35	1,99
PR3L_33	34,54	14,72	2,76	1,68	0,74	6,31	6,29	1,97
PR3L_34	34,61	14,75	2,77	1,68	0,74	6,32	6,31	1,97
PR3L_35	34,65	14,77	2,77	1,69	0,74	6,33	6,31	1,98
PR3L_36	34,91	14,87	2,79	1,70	0,75	6,38	6,36	1,99
PR3L_37	35,05	14,93	2,80	1,71	0,75	6,40	6,39	2,00
PR3L_38	34,95	14,89	2,79	1,70	0,75	6,38	6,37	1,99
PR3L_39	35,16	14,98	2,81	1,71	0,75	6,42	6,41	2,01
PR3L_40	35,09	14,95	2,80	1,71	0,75	6,41	6,40	2,00
PR3L_41	35,31	15,04	2,82	1,72	0,76	6,45	6,44	2,01
PR3L_42	34,99	14,91	2,80	1,70	0,75	6,39	6,38	2,00
PR3L_43	34,94	14,88	2,79	1,70	0,75	6,38	6,37	1,99
PR3L_44	34,28	14,61	2,74	1,67	0,74	6,26	6,25	1,96
PR3L_45	34,40	14,66	2,75	1,67	0,74	6,28	6,27	1,96
PR3L_46	34,36	14,64	2,75	1,67	0,74	6,28	6,26	1,96
PR3L_47	35,61	15,17	2,85	1,73	0,76	6,50	6,49	2,03
PR3L_48	35,72	15,22	2,86	1,74	0,77	6,53	6,51	2,04
PR3L_49	35,84	15,27	2,86	1,74	0,77	6,55	6,53	2,04
PR3L_50	35,44	15,10	2,83	1,73	0,76	6,47	6,46	2,02
PR3L_51	35,35	15,06	2,82	1,72	0,76	6,46	6,44	2,02
PR3L_52	35,54	15,14	2,84	1,73	0,76	6,49	6,48	2,03
PR3L_53	35,92	15,30	2,87	1,75	0,77	6,56	6,55	2,05
PR3L_54	35,83	15,26	2,86	1,74	0,77	6,54	6,53	2,04
PR3L_55	35,82	15,26	2,86	1,74	0,77	6,54	6,53	2,04
PR3L_56	35,55	15,15	2,84	1,73	0,76	6,49	6,48	2,03
PR3L_57	35,92	15,30	2,87	1,75	0,77	6,56	6,55	2,05
PR3L_58	36,02	15,35	2,88	1,75	0,77	6,58	6,56	2,05
PR3L_59	35,62	15,18	2,85	1,73	0,76	6,51	6,49	2,03
PR3L_60	35,51	15,13	2,84	1,73	0,76	6,49	6,47	2,03
PR3L_61	35,58	15,16	2,84	1,73	0,76	6,50	6,48	2,03
PR3L_62	35,70	15,21	2,85	1,74	0,77	6,52	6,51	2,04
PR3L_63	35,21	15,01	2,81	1,71	0,75	6,43	6,42	2,01
PR3L_64	35,75	15,23	2,86	1,74	0,77	6,53	6,51	2,04
PR3L_65	35,63	15,18	2,85	1,73	0,76	6,51	6,49	2,03
PR3L_66	35,84	15,27	2,86	1,74	0,77	6,55	6,53	2,04
PR3L_67	35,31	15,05	2,82	1,72	0,76	6,45	6,43	2,01
PR3L_68	35,44	15,10	2,83	1,72	0,76	6,47	6,46	2,02
PR3L_69	35,38	15,07	2,83	1,72	0,76	6,46	6,45	2,02
PR3L_70	35,03	14,93	2,80	1,71	0,75	6,40	6,38	2,00
PR3L_71	35,23	15,01	2,82	1,71	0,76	6,43	6,42	2,01
PR3L_72	35,10	14,96	2,80	1,71	0,75	6,41	6,40	2,00
PR3L_73	35,21	15,01	2,81	1,71	0,75	6,43	6,42	2,01
PR3L_74	35,55	15,15	2,84	1,73	0,76	6,49	6,48	2,03

Продолжение табл. 1

Код точки	Суммарное	Нейтроны	Фотоны	Электроны	Позитроны	Отрицательные мюоны	Положительные мюоны	Протоны
PR3L_75	35,26	15,03	2,82	1,72	0,76	6,44	6,43	2,01
PR3L_76	35,21	15,00	2,81	1,71	0,76	6,43	6,42	2,01
PR3L_77	35,16	14,98	2,81	1,71	0,75	6,42	6,41	2,01
PR3L_78	35,42	15,10	2,83	1,72	0,76	6,47	6,45	2,02
PR3L_79	35,19	15,00	2,81	1,71	0,75	6,43	6,41	2,01
PR3L_80	35,38	15,08	2,83	1,72	0,76	6,46	6,45	2,02
37	35,33	15,05	2,82	1,72	0,76	6,45	6,44	2,02
32	35,2	15,00	2,81	1,71	0,75	6,43	6,41	2,01
25	35,29	15,04	2,82	1,72	0,76	6,44	6,43	2,01
26	35,26	15,02	2,82	1,72	0,76	6,44	6,43	2,01
PR8R	34,94	14,89	2,79	1,70	0,75	6,38	6,37	1,99
27	35,07	14,94	2,80	1,71	0,75	6,41	6,39	2,00
44	35,08	14,95	2,80	1,71	0,75	6,41	6,39	2,00
PR9R	33,75	14,21	2,72	1,66	0,73	6,23	6,22	1,92
49	33,84	14,25	2,73	1,66	0,73	6,25	6,23	1,92
PR10R	33,35	14,05	2,69	1,64	0,72	6,16	6,14	1,89
PR11R	33,51	14,11	2,70	1,65	0,73	6,18	6,17	1,90
PR12R	33,62	14,16	2,71	1,65	0,73	6,21	6,19	1,91
PR13R	33,54	14,12	2,70	1,65	0,73	6,19	6,18	1,91
70	33,37	14,06	2,69	1,64	0,72	6,16	6,14	1,90
71	33,68	14,19	2,71	1,65	0,73	6,22	6,20	1,91
PR14R	33,57	14,14	2,70	1,65	0,73	6,19	6,18	1,91
PR15R	33,80	14,24	2,72	1,66	0,73	6,24	6,22	1,92
PR16R	33,71	14,20	2,72	1,66	0,73	6,22	6,21	1,92
PR17R_1	33,56	14,14	2,70	1,65	0,73	6,19	6,18	1,91
PR7L	34,02	14,32	2,74	1,67	0,74	6,28	6,27	1,93
35	33,91	14,28	2,73	1,67	0,73	6,26	6,25	1,93
36	33,86	14,26	2,73	1,66	0,73	6,25	6,24	1,92
41	33,86	14,26	2,73	1,66	0,73	6,25	6,24	1,92
45	33,88	14,27	2,73	1,66	0,73	6,25	6,24	1,92
46	33,97	14,30	2,74	1,67	0,74	6,27	6,26	1,93
51	34,10	14,36	2,75	1,68	0,74	6,29	6,28	1,94
50	34,21	14,41	2,76	1,68	0,74	6,31	6,30	1,94
PR10L	33,96	14,30	2,74	1,67	0,74	6,27	6,25	1,93
PR9L	33,87	14,26	2,73	1,66	0,73	6,25	6,24	1,92
PR8L	33,85	14,26	2,73	1,66	0,73	6,25	6,23	1,92
PR12L	33,85	14,26	2,73	1,66	0,73	6,25	6,23	1,92
PR11L	33,87	14,27	2,73	1,66	0,73	6,25	6,24	1,92
54	33,87	14,27	2,73	1,66	0,73	6,25	6,24	1,92
PR13L	33,81	14,24	2,72	1,66	0,73	6,24	6,23	1,92
63	34,12	14,37	2,75	1,68	0,74	6,30	6,28	1,94
PR14L	33,83	14,25	2,73	1,66	0,73	6,24	6,23	1,92
67	34,24	14,42	2,76	1,68	0,74	6,32	6,30	1,94
PR16L	33,63	14,16	2,71	1,65	0,73	6,20	6,19	1,91
76	33,65	14,17	2,71	1,65	0,73	6,21	6,19	1,91
76_2	33,29	14,02	2,68	1,64	0,72	6,14	6,13	1,89
77_2	33,37	14,06	2,69	1,64	0,72	6,16	6,14	1,90
59	33,92	14,29	2,73	1,67	0,73	6,26	6,25	1,93
60	34,37	14,47	2,77	1,69	0,74	6,34	6,33	1,95
61	34,24	14,42	2,76	1,68	0,74	6,32	6,31	1,95
62	33,80	14,24	2,72	1,66	0,73	6,24	6,22	1,92
58	33,73	14,21	2,72	1,66	0,73	6,22	6,21	1,92
57	34,03	14,33	2,74	1,67	0,74	6,28	6,27	1,93
56	34,74	14,63	2,80	1,71	0,75	6,41	6,40	1,97
55	34,68	14,60	2,79	1,70	0,75	6,40	6,39	1,97
77	34,17	14,39	2,75	1,68	0,74	6,30	6,29	1,94
76_3	34,04	14,34	2,74	1,67	0,74	6,28	6,27	1,93
72	34,30	14,45	2,76	1,69	0,74	6,33	6,32	1,95
PR15L	34,86	14,68	2,81	1,71	0,75	6,43	6,42	1,98

Окончание табл. 1

Код точки	Суммарное	Нейтроны	Фотоны	Электроны	Позитроны	Отрицательные мюоны	Положительные мюоны	Протоны
68	34,92	14,71	2,81	1,72	0,76	6,45	6,43	1,98
77_3	34,20	14,41	2,75	1,68	0,74	6,31	6,30	1,94
53	35,01	14,95	2,79	1,70	0,75	6,38	6,37	2,00
52	35,06	14,97	2,80	1,70	0,75	6,39	6,38	2,00
47	35,01	14,95	2,79	1,70	0,75	6,38	6,37	2,00
48	35,08	14,98	2,80	1,70	0,75	6,39	6,38	2,00
74	33,05	13,59	2,71	1,65	0,73	6,23	6,21	1,86
75	33,05	13,59	2,71	1,65	0,73	6,23	6,21	1,86
78	33,05	13,59	2,71	1,65	0,73	6,23	6,21	1,86
ПОЧВА 2	34,60	14,57	2,79	1,70	0,75	6,39	6,37	1,97
ПОЧВА 3	34,26	14,42	2,76	1,68	0,74	6,33	6,31	1,95
ПОЧВА 4	34,54	14,54	2,78	1,70	0,75	6,38	6,36	1,96
ПОЧВА 5	34,43	14,49	2,77	1,69	0,75	6,36	6,34	1,96
ПОЧВА 6	34,48	14,52	2,78	1,69	0,75	6,37	6,35	1,96
ПОЧВА 7	34,48	14,52	2,78	1,69	0,75	6,37	6,35	1,96
ПОЧВА 8	34,66	14,59	2,79	1,70	0,75	6,40	6,38	1,97
ПОЧВА 9	34,68	14,60	2,79	1,70	0,75	6,40	6,39	1,97
ПОЧВА 10	34,73	14,62	2,80	1,71	0,75	6,41	6,40	1,97
ПОЧВА 11	34,69	14,60	2,80	1,71	0,75	6,40	6,39	1,97
ПОЧВА 12	Некорректные исходные данные							
ПОЧВА 13	33,79	14,23	2,72	1,66	0,73	6,24	6,23	1,92
ПОЧВА 14	33,42	14,07	2,69	1,64	0,72	6,17	6,16	1,90
ПОЧВА 15	33,50	14,10	2,70	1,65	0,73	6,19	6,17	1,90
ПОЧВА 16	33,69	14,18	2,72	1,66	0,73	6,22	6,21	1,91
ПОЧВА 17	33,63	14,16	2,71	1,65	0,73	6,21	6,20	1,91
ПОЧВА 18	33,72	14,20	2,72	1,66	0,73	6,23	6,21	1,92
ПОЧВА 19	33,63	14,16	2,71	1,65	0,73	6,21	6,20	1,91
ПОЧВА 20	33,96	14,29	2,74	1,67	0,74	6,27	6,26	1,93
ПОЧВА 21	33,79	14,23	2,72	1,66	0,73	6,24	6,23	1,92
ПОЧВА 22	33,91	14,27	2,73	1,67	0,73	6,26	6,25	1,93
ПОЧВА 23	33,98	14,30	2,74	1,67	0,74	6,27	6,26	1,93
ПОЧВА 24	33,81	14,23	2,72	1,66	0,73	6,24	6,23	1,92
ПОЧВА 25	33,59	14,14	2,71	1,65	0,73	6,20	6,19	1,91
ПОЧВА 26	33,66	14,17	2,71	1,65	0,73	6,21	6,20	1,91
ПОЧВА 27	Некорректные исходные данные							
ПОЧВА 28	34,04	14,34	2,74	1,67	0,74	6,28	6,27	1,93
ПОЧВА 29	34,32	14,46	2,76	1,69	0,74	6,33	6,32	1,95
ПОЧВА 30	34,92	14,71	2,81	1,72	0,76	6,45	6,43	1,98

Статистический анализ сформированной выборки значений мощности дозы показал отсутствие корреляции между высотой над уровнем моря и суммарной МЭД от космического излучения (коэффициент корреляции Спирмена $k = 0,149$ при уровне значимости $p = 0,05$). Вероятно, это связано с разной интенсивностью космического излучения в даты проведения полевых исследований. Максимальное значение суммарной МЭД космического излучения – 37,41 нЗв/ч в точке с кодом PR3L_5 (дата – 24.11.2022), минимальное значение – 33,05 нЗв/ч в точке с кодом 75 (дата – 14.08.2025). Разница между максимальным и минимальным значением МЭД составила 11,7 %.

В табл. 2 представлены результаты расчета парциального вклада составляющих космического излучения в суммарную МЭД.

Таблица 2. Вклад составляющих космического излучения в МЭД, %

Код точки	Нейтроны	Фотоны	Электроны	Позитроны	Отрицательные мюоны	Положительные мюоны	Протоны
PR3L_2	44,47	7,74	4,69	2,07	17,54	17,50	5,79
PR3L_3	44,48	7,74	4,69	2,07	17,54	17,50	5,79
PR3L_4	44,48	7,74	4,69	2,07	17,54	17,50	5,78
PR3L_5	44,48	7,74	4,69	2,07	17,54	17,49	5,78
PR3L_6	44,46	7,75	4,69	2,07	17,54	17,50	5,79
PR3L_7	44,46	7,75	4,69	2,07	17,54	17,50	5,79
PR3L_8	44,46	7,75	4,69	2,07	17,54	17,50	5,79
PR3L_9	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_10	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_11	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_12	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_13	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_14	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_15	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_16	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_17	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_18	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_19	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_20	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_21	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_22	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_23	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_24	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_25	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_26	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_27	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_28	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_29	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_30	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_31	42,60	7,99	4,87	2,14	18,27	18,22	5,71
PR3L_32	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_33	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_34	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_35	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_36	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_37	42,60	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_38	42,60	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_39	42,60	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_40	42,60	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR3L_41	42,60	7,99	4,87	2,14	18,27	18,23	5,70
PR3L_42	42,60	7,99	4,87	2,14	18,27	18,22	5,71
PR3L_43	42,60	7,99	4,87	2,14	18,27	18,22	5,71
PR3L_44	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_45	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_46	42,60	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_47	42,60	7,99	4,87	2,14	18,27	18,22	5,70
PR3L_48	42,60	7,99	4,87	2,14	18,27	18,22	5,71
PR3L_49	42,60	7,99	4,87	2,14	18,27	18,22	5,71
PR3L_50	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_51	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_52	42,60	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_53	42,60	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR3L_54	42,60	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_55	42,60	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_56	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_57	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR3L_58	42,60	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR3L_59	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71

Продолжение табл. 2

Код точки	Нейтроны	Фотоны	Электроны	Позитроны	Отрицательные мюоны	Положительные мюоны	Протоны
PR3L_60	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_61	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_62	42,60	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_63	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_64	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR3L_65	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR3L_66	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR3L_67	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_68	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_69	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR3L_70	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_71	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_72	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_73	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_74	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR3L_75	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR3L_76	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR3L_77	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_78	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR3L_79	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR3L_80	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
37	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
32	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
25	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
26	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR8R	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
27	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
44	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR9R	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
49	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
PR10R	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,41	5,68
PR11R	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,41	5,68
PR12R	42,12	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
PR13R	42,12	8,06	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
70	42,12	8,05	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
71	42,12	8,06	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
PR14R	42,12	8,06	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
PR15R	42,12	8,06	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
PR16R	42,12	8,06	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
PR17R_1	42,12	8,05	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
PR7L	42,10	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
35	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
36	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
41	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
45	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
46	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
51	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
50	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
PR10L	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
PR9L	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
PR8L	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
PR12L	42,12	8,06	4,91	2,16	18,46	18,41	5,68
PR11L	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
54	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
PR13L	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
63	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
PR14L	42,12	8,06	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
67	42,12	8,06	4,91	2,16	18,46	18,41	5,68
PR16L	42,12	8,05	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68

Окончание табл. 2

Код точки	Нейтроны	Фотоны	Электроны	Позитроны	Отрицательные мюоны	Положительные мюоны	Протоны
76	42,12	8,05	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
76_2	42,13	8,05	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
77_2	42,13	8,05	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
59	42,12	8,05	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
60	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
61	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,41	5,68
62	42,12	8,06	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
58	42,12	8,06	4,91	2,16	18,46	18,41	5,68
57	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,41	5,68
56	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
55	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
77	42,12	8,05	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
76_3	42,12	8,05	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
72	42,12	8,05	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
PR15L	42,12	8,06	4,91	2,16	18,46	18,41	5,68
68	42,12	8,06	4,91	2,16	18,46	18,41	5,68
77_3	42,12	8,05	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
53	42,70	7,98	4,86	2,14	18,23	18,19	5,71
52	42,70	7,98	4,86	2,14	18,23	18,19	5,71
47	42,70	7,98	4,86	2,14	18,23	18,19	5,71
48	42,69	7,98	4,86	2,14	18,23	18,19	5,71
74	41,13	8,19	5,01	2,21	18,84	18,80	5,63
75	41,12	8,19	5,01	2,21	18,84	18,80	5,63
78	41,12	8,19	5,01	2,21	18,84	18,80	5,63
ПОЧВА 2	42,60	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
ПОЧВА 3	42,60	7,99	4,87	2,14	18,27	18,23	5,70
ПОЧВА 4	42,60	7,99	4,87	2,14	18,27	18,22	5,71
ПОЧВА 5	42,60	7,99	4,87	2,14	18,27	18,22	5,71
ПОЧВА 6	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
ПОЧВА 7	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
ПОЧВА 8	42,60	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
ПОЧВА 9	42,60	7,99	4,87	2,14	18,27	18,22	5,70
ПОЧВА 10	42,60	7,99	4,87	2,14	18,27	18,22	5,71
ПОЧВА 11	42,60	7,99	4,87	2,14	18,27	18,22	5,71
ПОЧВА 12	Некорректные исходные данные						
ПОЧВА 13	42,10	8,06	4,92	2,17	18,46	18,42	5,68
ПОЧВА 14	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
ПОЧВА 15	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
ПОЧВА 16	42,12	8,06	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
ПОЧВА 17	42,12	8,06	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
ПОЧВА 18	42,10	8,06	4,92	2,17	18,46	18,42	5,68
ПОЧВА 19	42,12	8,06	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
ПОЧВА 20	42,10	8,06	4,92	2,17	18,46	18,42	5,68
ПОЧВА 21	42,10	8,06	4,92	2,17	18,46	18,42	5,68
ПОЧВА 22	42,10	8,06	4,91	2,17	18,46	18,42	5,68
ПОЧВА 23	42,10	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
ПОЧВА 24	42,10	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
ПОЧВА 25	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
ПОЧВА 26	42,10	8,06	4,91	2,17	18,46	18,42	5,68
ПОЧВА 27	Некорректные исходные данные						
ПОЧВА 28	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
ПОЧВА 29	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
ПОЧВА 30	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68

Вклад отдельных составляющих в суммарную МЭД, %: нейтроны – 42,53 > отрицательно заряженные мюоны – 18,29 > положительно заряженные мюоны – 18,25 > фотоны – 8,00 > протоны – 5,70 > электроны – 4,87 > позитроны – 2,15. Вклад

остальных источников космического излучения в суммарную МЭД составил менее 1 %.

Для исследования временных характеристик космического излучения на территории заповедника в качестве примера были взяты три точки: в центре заповедника, а также на его северной и южной границах. В табл. 3 приведена характеристика трех исследуемых точек.

Таблица 3. Характеристика исследуемых точек

Точка	Координаты	Высота, м
Северная	55,97413 С. Ш., 61,03663 В. Д.	248
Центральная	55,87106 С. Ш., 60,95952 В. Д.	241
Южная	55,76813 С. Ш., 60,81383 В. Д.	264

Разница между максимальной высотой в южной точке и минимальной высотой в центральной точке составила 8,7 %.

В табл. 4 представлены результаты расчета ежемесячной МЭД космического излучения, усредненной за период с начала аварии на химкомбинате «Маяк» в 1957 г. по настоящее время – 2025 г.

Таблица 4. Результаты расчета ежемесячной МЭД космического излучения, усредненной за период с 1957 по 2025 г.

Месяц	МЭД, нЗв/ч		
	Северная точка	Центральная точка	Южная точка
Январь	36,42	36,24	36,77
Февраль	36,47	36,28	36,81
Март	36,50	36,31	36,84
Апрель	36,48	36,30	36,82
Май	36,35	36,17	36,69
Июнь	36,20	36,02	36,54
Июль	36,12	35,94	36,46
Август	36,15	35,97	36,49
Сентябрь	36,25	36,07	36,59
Октябрь	36,43	36,24	36,77
Ноябрь	36,34	36,16	36,69
Декабрь	36,42	36,24	36,77
Среднее	36,42	36,24	36,77

Из табл. 4 можно сделать вывод, что среднее значение МЭД за весь период наблюдений в южной точке – наибольшее. Разница между максимальным (южная точка) и минимальным (центральная точка) средним значением составила всего 2,45 %. Среднее значение в период между днями зимнего и летнего солнцестояния (январь – июнь), а также между днями летнего и зимнего солнцестояния (июль – декабрь) отличается не более чем на 1 %.

Для наглядности на рис. 3 представлена временная диаграмма МЭД космического излучения в период с 1957 по 2025 г. в южной точке.

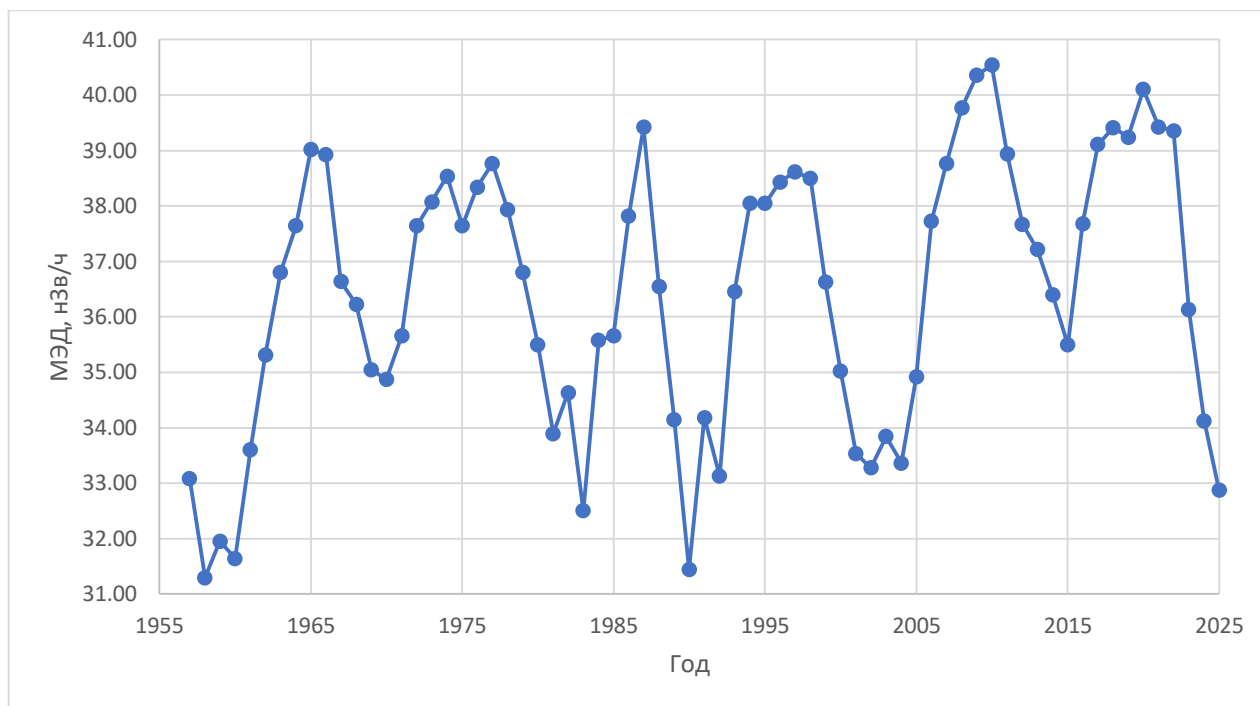


Рис. 3. Временная диаграмма МЭД космического излучения в период с 1957 по 2025 г.

Диаграмма иллюстрирует наличие максимумов и минимумов с разницей в 9–12 лет, что соответствует разнице в динамике солнечной активности. Максимальное значение МЭД космического излучения наблюдается в 2010 г. – 40,54 нЗв/ч, минимальное – 31,30 нЗв/ч в 1958 г. Разница между ними составила 22,8 %. Среднее значение МЭД космического излучения за весь период наблюдений – 36,45 нЗв/ч. Разница между максимальным значением МЭД и средним – 10,1 %, между средним и минимальным значением МЭД – 14,1 %.

4. Обсуждение

С помощью программы CARI-7 была рассчитана МЭД космического излучения в 170 точках в период проведения полевых исследований. Максимальное значение – 37,41 нЗв/ч в точке с кодом PR3L_5, минимальное значение – 33,05 нЗв/ч в точке с кодом 75. Основной вклад (более 99 %) в суммарную МЭД обусловлен нейтронами, отрицательными и положительными мюонами, протонами, фотонами, электронами, а также позитронами. Наибольший вклад в суммарную МЭД обусловлен нейтронами – 42,53 %. Средняя МЭД, обусловленная нейтронами, в 12,5 раз превышает фотонную составляющую. Энергетический спектр космогенных нейтронов на поверхности Земли охватывает огромный диапазон – от 10^{-9} до 10^3 МэВ, в котором можно выделить три пика: область тепловых, быстрых и сверхбыстрых нейтронов [21–23]. Однако наибольший вклад в МЭД вносят быстрые нейтроны с энергией от 1 до 10 МэВ [22, 23]. Также отметим, что среди рассмотренных видов излучения взвешивающие коэффициенты, согласно Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) для нейтронов этого диапазона, – наибольшие (от 9 до 20 для 10 и 1 МэВ соответственно) [24].

Выполнен расчет ежемесячной МЭД космического излучения, усредненной за период с начала радиационной аварии на химкобинате «МАЯК» в 1957 г. по настоящее время – 2025 г. Анализ данных показал отсутствие существенных различий между средним значением МЭД в период между днями зимнего и летнего солнцестояния (январь – июнь), а также между днями летнего и зимнего солнцестояния (июль – декабрь) в исследуемый период – 1957–2025 гг. Разница между максимальным (в южной точке) и минимальным (в центральной точке) средним

значением МЭД космического излучения составила 2,45 % при разнице в соответствующих высотах в 8,7 %.

Результаты работы позволят в перспективе учитывать космическое излучение для оценки радиационной обстановки на территории Восточно-Уральского заповедника – головной части Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС).

5. Выводы

Рассчитана МЭД космического излучения в 170 точках на территории заповедника.

Не менее 99 % МЭД космического излучения на территории заповедника формируется нейтронами, мюонами, протонами, фотонами, электронами, и позитронами.

Средняя МЭД космического излучения в период полевых исследований 2022–2025 гг. – 35,71 нЗв/ч. Разница между максимальным (39,67 нЗв/ч) и минимальным (32,00 нЗв/ч) значением МЭД составила 19,3 %.

Наибольший вклад (42,53 %) в суммарную МЭД вносят нейтроны.

Статистический анализ показал отсутствие корреляции между высотой над уровнем моря и суммарной МЭД от космического излучения, т. к. расчет производился для разных календарных дат.

Построена временная диаграмма МЭД космического излучения за 69-летний период (1957–2025 гг.). Диаграмма иллюстрирует наличие максимумов и минимумов с разницей в 9–12 лет, что соответствует периодам в динамике солнечной активности.

Разница между максимальным значением и минимальным значением МЭД за этот период составила 11,7 %. Среднее значение МЭД космического излучения за весь период наблюдений – 34,75 нЗв.

6. Благодарности

Исследование выполнено за счет субсидий Минобрнауки РФ на выполнение научной темы FUMN-2024-0001.

Авторы выражают благодарность в. н. с., к. ф.-м. н. Алексею Акимовичу Екидину и г. н. с., д. т. н. Михаилу Владимировичу Жуковскому за консультации и научные дискуссии по данной теме.

7. Список литературы

1. *Dorman, I. V.* How cosmic rays were discovered and why they received this misnomer / I. V. Dorman, L. I. Dorman // *Advances in Space Research.* – 2014. – Vol. 53, №. 10. – P. 1388–1404.
2. *Ziegler, J. F.* Terrestrial cosmic rays / J. F. Ziegler // *IBM journal of research and development.* – 1996. – Vol. 40, №. 1. – С. 19–39.
3. *Ardana, I. M.* An analysis of air crew exposure from cosmic radiation on Indonesian domestic flight / I. M. Ardana, A. Sanyoto, K. Rumboko // *2020 Annual Nuclear Safety Seminar Proceeding: Innovations to Support Nuclear Safety and Security for Advanced Human Resources and Excellent Indonesia.* – 2020. – № INIS-ID–103. – P. 57–63.
4. *Pacini, A. A.* Cosmic rays: bringing messages from the sky to the Earth's surface / A. A. Pacini // *Revista Brasileira de Ensino de Física.* – 2017. – Vol. 39. – №. 1. – С. e1306.
5. *Десятов, Д. Д.* Вклад АЭС с различным типом реакторных установок в глобальное поступление трития в окружающую среду / Д. Д. Десятов, А. А. Екидин, Д. А. Власов // *Атомная энергия.* – 2024. – Т. 137, №. 3–4. – С. 175–180.
6. *Назаров, Е. И.* Оценка поступления углерода-14 в атмосферу, обусловленного выбросами АЭС / Е. И. Назаров, А. А. Екидин, А. В. Васильев // *Известия высших учебных заведений. Физика.* – 2018. – Т. 61, №. 12–2. – С. 67–73.
7. *Reames, D. V.* Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere / D. V. Reames // *Space Science Reviews.* – 1999. – Vol. 90, №. 3. – P. 413–491.

8. Japanese population dose from natural radiation / Y. Omori, M. Hosoda, F. Takahashi [et al.] // Journal of Radiological Protection. – 2020. – 40(3), R99–R140. – <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ab73b1>.
9. Real-time auroral and solar activity [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.spaceweatherlive.com/> (дата обращения: 01.07.2025).
10. External effective dose from natural radiation for the Umbria region (Italy) / K. G. C. Raptis, M. Alberi, S. Bisogno [et al.] // Journal of Maps. – 2022. – Vol. 18, №. 2. – P. 461–471. – <https://doi.org/10.1080/17445647.2022.2093659>.
11. FAA. (2021). Program to calculate galactic cosmic radiation. – URL: https://www.faa.gov/data_research/research/med_humanfacs/aeromedical/radiobiology/cari7/ (дата обращения: 01.07.2025).
12. Sato, T. Analytical model for estimating terrestrial cosmic Ray fluxes nearly anytime and anywhere in the world: Extension of PARMA/EXPACS / T. Sato // Plos One. – 2015. – Vol. 10, № 12. – P. e0144679. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144679>.
13. Aközcan, S. Annual effective dose of naturally occurring radionuclides in soil and sediment / S. Aközcan // Toxicological & Environmental Chemistry. – 2014. – Vol. 96, № 3. – P. 379–386. <https://doi.org/10.1080/02772248.2014.939177>.
14. Spatial relationship between the field-measured ambient gamma dose equivalent rate and geological conditions in a granitic area, Velence Hills, Hungary: an application of digital spatial analysis methods / S. B. Torres, A. Petrick, K. Z. Szabo [et al.] // Journal of environmental radioactivity. – 2018. – Vol. 192. – P. 267–278. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.07.001>.
15. Рамзаев, В. П. Валидация метода определения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на огородах с использованием портативного спектрометра-дозиметра МКС АТ6101Д in situ / В. П. Рамзаев, А. Н. Барковский, А. А. Братилова // Радиационная гигиена. – 2021. – Т. 14, №. 2. – С. 56–65.
16. Метод неразрушающего контроля удельной активности природных радионуклидов в строительных материалах / А. В. Васильев, А. А. Екидин, М. Д. Пышкина [и др.] // АНРИ. – 2021. – №. 1. – С. 31–44.
17. Общественное содействие в обеспечении радиационной безопасности в зоне наблюдения ФГУП «ПО «МАЯК» / В. С. Носовец, А. Р. Зигангиров, Е. С. Макеева [и др.] // Траектория исследований. – 2023. – №. 2(6). – С. 45–56.
18. Статистические характеристики гамма-поля на территории Восточно-Уральского государственного заповедника: показания переносных средств измерения / А. А. Екидин, Д. Д. Десятов, Е. И. Назаров [и др.] // Траектория исследований – человек, природа, технологии. – 2025. – № 3(15). – С. 19–70.
19. Хаджинова К. А. Дозиметрический мониторинг при авиаперелетах / К. А. Хаджинова // 60-я юбилейная научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – 2024. – С. 343–349.
20. Атлас ВУРСа. – URL: http://downloads.igce.ru/publications/Atlas/CD_VURS/page_120-126.html. (дата обращения: 01.07.2025).
21. Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes. Supplement to Technical Reports Series No. 318. Vienna: IAEA, 2001. – 337 p.
22. Nakamura, T. Cosmic-ray neutron spectrometry and dosimetry / T. Nakamura // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2008. – Vol. 45, №. sup5. – P. 1–7.
23. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements Part 3. Vienna : IAEA, 2014. – 471 p.
24. Публикация 103 Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) / пер с англ. : под общей ред. М. Ф. Киселева и Н. К. Шандалы. – М. : Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009.

Сведения об авторах:

Молчанов Сергей Михайлович, аспирант УрФУ, м. н. с. Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия Эл. почта: molchanov.2001@bk.ru.

Десятов Денис Дмитриевич, м. н. с. Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

COSMIC RADIATION MODELING ON THE EAST-URALS STATE RESERVE TERRITORY USING THE CARI-7 PROGRAM

S. M. Molchanov ^{1,2}, D. D. Desyatov ²

¹ Ural Federal University named by the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

² Institute of Industrial Ecology of UB RAS, Ekaterinburg, Russian Federation

The effective dose rate (EDR) due to cosmic radiation on the East-Urals State Reserve territory was carried out using the CARI-7 software. The ranges of changes in the EDR of cosmic radiation from 32,00 to 39,67 nSv/h is shown for the period 2022–2025. The average EDR of cosmic radiation during this period is 35,71 nSv/h. The contribution of individual types of cosmic radiation to the total EDR was calculated. The largest contribution to the EDR is due to neutrons – 42,53 %. The average value of the cosmic radiation EDR from the moment of Mayak Chemical Plant accident to the present time in the territory of the East Ural State State Reserve is 34,75 nSv/h.

Key words: cosmic radiation; East-Ural State Reserve; gamma radiation; neutron radiation; dose rate; CARI-7.

References

1. Dorman, I. V. How cosmic rays were discovered and why they received this misnomer / I. V. Dorman, L. I. Dorman // *Advances in Space Research*. – 2014. – Vol. 53, №. 10. – P. 1388–1404.
2. Ziegler, J. F. Terrestrial cosmic rays / J. F. Ziegler // *IBM journal of research and development*. – 1996. – Vol. 40, №. 1. – C. 19–39.
3. Ardana, I. M. An analysis of air crew exposure from cosmic radiation on Indonesian domestic flight / I. M. Ardana, A. Sanyoto, K. Rumboko // *2020 Annual Nuclear Safety Seminar Proceeding: Innovations to Support Nuclear Safety and Security for Advanced Human Resources and Excellent Indonesia*. – 2020. – № INIS-ID–103. – P. 57–63.
4. Pacini, A. A. Cosmic rays: bringing messages from the sky to the Earth's surface / A. A. Pacini // *Revista Brasileira de Ensino de Física*. – 2017. – Vol. 39. – №. 1. – C. e1306.
5. Desyatov, D. D. Global release of tritium into the environment: NPP reactor type contribution / D. D. Desyatov, A. A. Ekidin, D. A. Vlasov // *Atomic Energy*. – 2024. – Vol. 137, №. 3–4. – C. 198–205.
6. Nazarov, E. I. Assessment of the atmospheric carbon-14 caused by NPP emissions / E. I. Nazarov, A. A. Ekidin, A. V. Vasylyev // *Izvestiya vuzov. Fizika*. – 2018. – Vol. 61, №. 12–2. – P. 67–73.
7. Reames, D. V. Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere / D. V. Reames // *Space Science Reviews*. – 1999. – Vol. 90, №. 3. – P. 413–491.
8. Japanese population dose from natural radiation / Y. Omori, M. Hosoda, F. Takahashi [et al.] // *Journal of Radiological Protection*. – 2020. – 40(3), R99–R140. – <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ab73b1>.
9. Real-time auroral and solar activity [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.spaceweatherlive.com/> (дата обращения: 01.07.2025).
10. External effective dose from natural radiation for the Umbria region (Italy) / K. G. C. Raptis, M. Alberi, S. Bisogno [et al.] // *Journal of Maps*. – 2022. – Vol. 18, №. 2. – P. 461–471. – <https://doi.org/10.1080/17445647.2022.2093659>.
11. FAA. (2021). Program to calculate galactic cosmic radiation. – URL: https://www.faa.gov/data_research/research/med_humanfacs/aeromedical/radiobiology/cari7/ (дата обращения: 01.07.2025).
12. Sato, T. Analytical model for estimating terrestrial cosmic Ray fluxes nearly anytime and anywhere in the world: Extension of PARMA/EXPACS / T. Sato // *Plos One*. – 2015. – Vol. 10, №. 12. – P. e0144679. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144679>.
13. Aközcan, S. Annual effective dose of naturally occurring radionuclides in soil and sediment / S. Aközcan // *Toxicological & Environmental Chemistry*. – 2014. – Vol. 96, №. 3. – P. 379–386. <https://doi.org/10.1080/02772248.2014.939177>.

14. Spatial relationship between the field-measured ambient gamma dose equivalent rate and geological conditions in a granitic area, Velence Hills, Hungary: an application of digital spatial analysis methods / S. B. Torres, A. Petrick, K. Z. Szabo [et al.] // Journal of environmental radioactivity. – 2018. – Vol. 192. – P. 267–278. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.07.001>.
15. Ramzaev, V. P. Validation of a method for in situ determination of ¹³⁷Cs soil contamination density in kitchen gardens using the portable spectrometer-dosimeter MKS AT6101D / V. P. Ramzaev, A. N. Barkovsky, A. A. Bratilova // Radiation Hygiene. – 2021. – V. 14. – № 2. – P. 56–65.
16. Method of Non-Destructive Measurement of Natural Radionuclides Concentration in Building Materials / A. V. Vasilyev, A. A. Ekinin, M. D. Pyshkina [et al.] // ANRI. – 2021. – № 1. – P. 31–44.
17. Experience of independent radiation control in publicly accessible sites of the «FSUE MAYAK PA» monitoring area / V. S. Nosovets, A. R. Zigangirov, E. S. Makeeva [et al.] // Research trajectory – human, nature, technologies. – 2023. – № 2. – P. 45–56.
18. Statistical characteristics of the gamma field in the territory of the East Ural State Reserve: readings from portable measuring instruments / A. A. Ekinin, D. D. Desyatov, E. I. Nazarov [et al.] // Research trajectory – human, nature, technologies. – 2025. – № 3(15). – P. 19–70.
19. Hadzhinova, K. A. Dozimetricheskiy monitoring pri aviapereletah / K. A. Hadzhinova // 60-ya yubilejnaya nauchnaya konferenciya aspirantov, magistrantov i studentov BGUIR – 2024. – P. 343–349.
20. Atlas VURSa. – URL: http://downloads.igce.ru/publications/Atlas/CD_VURS/page_120-126.html. (accessed: 01.07.2025). (in Russian).
21. Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes. Supplement to Technical Reports Series No. 318. Vienna: IAEA, 2001. – 337 p.
22. Nakamura, T. Cosmic-ray neutron spectrometry and dosimetry / T. Nakamura // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2008. – Vol. 45, №. sup5. – P. 1–7.
23. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements Part 3. Vienna : IAEA, 2014. – 471 p.
24. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103, 2007.

РОЛЬ ПРОГРАММЫ «СТАРТАП КАК ДИПЛОМ» В СИСТЕМЕ РАЗВИТИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСТВА У СТУДЕНТОВ УРАЛЬСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

Д. А. Филиппов¹, Е. М. Баглаева²

¹ *Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия*

² *Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*

В Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденной Указом Президента РФ от 28 февраля 2024 г. № 145, отмечено, что отдельного внимания на сегодняшний день требуют вопросы развития компетенций и навыков, необходимых для повышения инновационной активности организаций, развития рынка интеллектуальной собственности и технологического предпринимательства. В рамках запущенной в УрФУ в 2020 г. программы «Стартап как диплом» у студентов есть возможность попробовать себя в роли технологических предпринимателей со своим стартап-проектом на основе результатов научно-исследовательской деятельности выпускной квалификационной работы (далее – ВКР) и получить на практике компетенции, необходимые для вывода на рынок, коммерциализации и масштабирования наукоемкого продукта. Одна из проблем реализации программы на сегодняшний день – отсутствие методики оценки результативности студенческих стартап-проектов. В данной работе исследовано отношение студентов к формированию компетенций технологического предпринимательства и предложено для оценки эффективности студенческого стартап-проекта использовать критерий жизнеспособности стартапа, часто используемый в литературе, но не адаптированный под специфику российской экономики.

Ключевые слова: технологическое предпринимательство; стартап-проект; университет; выпускная квалификационная работа (ВКР); инновации; жизнеспособность.

1. Введение

Развитие малого и среднего предпринимательства (далее – МСП) – один из приоритетов государственной экономической политики России. Доля сектора МСП в ВВП России в настоящее время в 3–4 раза меньше, чем в экономиках развитых стран [1, 2].

Последние опросы ВЦИОМ показывают, что 80 % трудоспособного населения России вообще не задумываются об открытии собственного дела и лишь 3,5 % размышляют об этом в перспективе трех – пяти лет [3]. Для сравнения: в США, по данным Global Entrepreneurship Monitor [4], 80 % жителей имеют опыт ведения бизнеса, а на вопрос о том, планируют ли они создать бизнес в ближайшие 3 года, 57 % отвечают положительно [5].

Как показывают социологические исследования, количество желающих создать собственный бизнес в несколько раз превышает количество регистрируемых субъектов МСП. Основными барьерами для открытия бизнеса называют недостаток первоначальных финансов, опыта и знаний в области предпринимательства [6].

По данным глобального исследования предпринимательского духа студентов проекта Global University Entrepreneurial Spirit Students Survey (далее – GUESSS)

в 2016–2017 гг., более 30 % российских студентов выразили желание посвятить свое учебное время различным курсам и программам по предпринимательству [7].

Предпринимательство в социально-экономическом ракурсе, являясь базисом для развития экономики стран, предполагает большой объем инвестиций в навыки, инновации и технологии, нежели может аккумулировать государство. Однако общепринятые характеристики предпринимательства в полной мере не позволяют описать его и дать оценку его технологического типа. В экономической науке возрастает значимость исследования технологического предпринимательства, его вклада в экономическое развитие страны.

Развитие технологического предпринимательства требует изменений прежде всего в системе высшего образования, создания условий для генерирования, разработки и проверки предпринимательских идей молодежи.

Анализ действующей ситуации в сфере развития технологического предпринимательства в системе высшего образования выявил две группы проблем [8, 9]. Внутренние связаны с недостаточно эффективно действующей экосистемой развития компетенций технологического предпринимательства у студентов в вузах. Вследствие этого нет проверенной практикой модели тестирования рыночных гипотез студентов. Внешние проблемы обусловлены слабым взаимодействием вузов с местными сообществами предпринимателей, венчурными фондами, бизнес-ангелами, государственными институтами развития предпринимательства на федеральном и региональном уровнях. Решением этих проблем может стать создание системы развития компетенций технологического предпринимательства в рамках основного образовательного процесса. Каждый этап учебного процесса должен опираться на практико-ориентированные методики обучения, позволяющие сформировать необходимые навыки в рамках компетенций, определенных федеральными государственными стандартами. Особое место формированию компетенций технологического предпринимателя отводится в процессе подготовки и защиты ВКР.

В данной статье мы предлагаем рассмотреть отношение студентов к формированию компетенций технологического предпринимательства в процессе обучения и оценить их готовность к разработке и реализации стартап-проектов на основе результатов научно-исследовательской деятельности ВКР.

2. Материалы и методы

2.1. Образовательные программы по подготовке предпринимателей

Одной из первых программы по подготовке предпринимателей запустила Высшая школа экономики. В 2020 г. была создана Высшая школа бизнеса для подготовки ответственных лидеров бизнеса для цифровой экономики. В настоящее время программы обучения предпринимательству существуют почти в каждом университете как отдельные направления, также популярны программы дополнительного образования, например MBA, и курсы для предпринимателей. Эти программы выпускают руководителей разного уровня. Предпринимательское образование обеспечивает обучающегося набором инструментов управления, но не является самодостаточным для ведения малого и среднего бизнеса. Специальные знания, требуемые в каждой конкретной сфере деятельности, особенно это касается наукоемкого производства, бизнесмены получают самостоятельно. Профильное и предпринимательское образование следует получать параллельно, но студенты естественно-научных, технических или инженерных вузов часто не имеют в учебных планах образовательных программ по предпринимательству [9]. Или прохождение предпринимательских курсов проводится на формальном уровне без передачи практических навыков. По данным GUESS 2018 г., 54,4 % студентов не имеют за время обучения курсов по предпринимательству.

По мнению Ю. Б. Рубина, для обеспечения страны эффективными, конкурентоспособными специалистами в системе образования, помимо всего прочего, необходимо создать условия, в которых формирование у обучающихся предпринимательских способностей происходило бы наряду со специальным профильным обучением [10].

С 2017 г. в России реализуется программа «Стартап как диплом», составная часть проекта «Цифровая экономика в РФ», направленная на создание условий для развития компетенций технологического предпринимательства у студентов. Одна из задач программы – вовлечение студентов, прежде всего технических специальностей, в практико-ориентированную проектную деятельность, разработку наукоемких продуктов и организацию стартапов.

Организация стартапов позволяет улучшить способность студентов генерировать новые идеи, проработанные в ВКР и доведенные до коммерческого использования. Университет становится активным участником трансфера технологий: запускает механизм конвертации знаний в рыночный продукт, создает новые экономические возможности и дополнительные рабочие места, в итоге повышает конкурентоспособность реального сектора экономики.

Для обучающихся работа в составе команды предоставляет широкие возможности для проработки своего комплекса компетенций, создания уникальной технологии или иного инновационного продукта.

2.2. Программа «Стартап как диплом» в УрФУ

Программа «Стартап как диплом» – это система сопровождения обучающихся выпускных курсов по подготовке и реализации стартап-проектов на основе результатов научно-исследовательской деятельности ВКР, которые имеют потенциал коммерциализации и находятся на самой ранней стадии развития. Стартап-проект на основе ВКР представляет собой описание планируемой деятельности будущего стартапа, направленной на создание наукоемкого продукта (технологии или услуги), который обладает потенциалом коммерциализации и масштабирования и демонстрирует уровень подготовленности обучающегося к самостоятельной профессиональной работе по профилю образовательной программы. Результаты реализации программы за трехлетний период приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты реализации программы «Стартап как диплом» в УрФУ

№ п/п	Показатель	2021/22 уч. г.	2022/23 уч.г.	2023/24 уч.г.
1.	Количество заявок от студентов выпускных курсов на участие в программе «Стартап как диплом»	86	170	190
2.	Количество студентов, прошедших программу дополнительного образования «Формирование концепции продукта с учетом потребностей науки, рынка, общества»	78	67	95
3.	Количество студентов, прошедших промежуточный отбор и допущенных до участия в программе	56	48	66
4.	Количество студентов, успешно прошедших программу повышения квалификации «Основы технологического предпринимательства»	13	13	26
5.	Количество студентов, допущенных до защиты ВКР в формате стартапа	28	23	33
6.	Количество студентов, защитивших ВКР в формате стартапа	14	20	26

Окончание табл. 1

7.	Количество студентов, принявших участие в Акселераторе УрФУ	7	4	9
8.	Количество стартап-проектов, отобранных для участия в стартап-студии УрФУ	0	8	6
9.	Количество студентов, подавших заявки на участие в грантовом конкурсе «Студенческий стартап» Фонда содействия инновациям	3	4	6
10.	Количество студентов, выигравших 1 млн руб. в рамках гранта «Студенческий стартап»	1	2	2
11.	Количество подписанных договоров с командами стартап-проектов о передаче УрФУ исключительных прав использования секретов производства (распоряжение УрФУ «О введении режима коммерческой тайны в отношении сведений, составляющих секрет производства для обеспечения конфиденциальности»)	7	9	15
12.	Количество обучающихся по программам бакалавриата, получивших дополнительные баллы при поступлении в магистратуру УрФУ за успешное участие в программе «Стартап как диплом»	0	11	28

Как видно из табл. 1, за время работы программы «Стартап как диплом» в УрФУ накоплен достаточный опыт для масштабирования данной системы. Показатели реализации программы демонстрируют стабильный рост как по количеству участников, так и по количеству проектов и созданных в рамках проектов объектов интеллектуальной собственности.

2.3. Оценка формирования предпринимательских намерений студентов

Согласно теории запланированного поведения [11], на формирование предпринимательских намерений студентов оказывают влияние личные мотивы, отношение к такому поведению, субъективные нормы, университетская среда и др.

Для этого было проведено исследование востребованности ВКР в формате стартапа среди студентов методом анкетирования. Задача исследования – диагностика выборочной совокупности студентов УрФУ на наличие предпринимательских способностей и склонности к созданию новых высокотехнологичных проектов и проверка гипотезы: востребован ли новый формат защиты выпускной квалификационной работы среди студентов. Сбор данных проходил в 2022 г. в формате онлайн-анкеты.

Вопросы включали 3 блока, каждый из которых имел свои задачи:

- 1 блок: проверка респондента на осведомленность о позиции и логике технологического предпринимательства;
- 2 блок: определение склонности респондента к типовым ошибкам и иллюзиям начинающего технологического предпринимателя и других участников экономики, а также прогнозирование траектории участника при потенциальном переходе в позицию технологического лидера;
- 3 блок: проверка способности респондента к предпринимательскому мышлению, а также к предпринимательской рефлексии и рациональному использованию навыков деловой коммуникации.

3. Результаты

3.1. Участники программы «Стартап как диплом»

В исследовании участвовали 41 студент 3, 4 курсов бакалавриата (возраст участников 20–22 года) разных технических направлений обучения (фокус-группа 1) и 20 магистрантов направления 27.04.05 «Инноватика» Физико-технологического института УрФУ (фокус-группа 2). Участники фокус-группы 1 получают техническое образование и способны генерировать идеи для создания наукоемких продуктов, но в процессе освоения своих образовательных программ не обучаются технологическому предпринимательству. В фокус-группе 2 участники уже получили базовое образование, также могут создавать наукоемкие продукты и уже проходят обучение по управлению инновациями.

3.2. Диагностика выборочной совокупности студентов УрФУ

В табл. 2 приведены вопросы составленной авторами онлайн-анкеты диагностики выборочной совокупности студентов УрФУ.

Таблица 2. Вопросы онлайн-анкеты

Блок	Вопросы	Какую задачу исследование решает
1.	1. Знакомо ли вам понятие «технологическое предпринимательство»? 2. Специальность, по которой вы обучаетесь в настоящее время, включает в себя в большей степени элементы традиционного академического образования или проектного обучения?	Отсеивать нецелевую для исследования аудиторию, выявляя склонность к серийному технологическому предпринимательству и способность к генерации новых востребованных на рынке идей. Узнать, понимает ли студент разницу между классическим академическим образованием и проектным обучением в университете.
2.	3. Есть ли у вас опыт реализации стартап-проекта или работы в рамках стартапа (в команде или индивидуально)? 4. Предположим, что у вас есть идея о наукоемком продукте для будущего стартапа. Какие факторы могут помешать ее реализации? 5. Имеется ли у вас на данный момент идея о наукоемком продукте для стартапа, которую вы хотели бы реализовать?	Позволяет понять, имеются ли у студента необходимые компетенции и потенциал для реализации собственного стартап-проекта, опыт работы в научно-исследовательской области, сфере поиска новых решений и передовых технологий для производства. Обладает ли студент новыми технологическими идеями, которые могут быть потенциально востребованы сегодня, и способен ли их генерировать в условиях быстро меняющегося рынка.

Окончание табл. 2

3.	6. Каким образом была выбрана и сформулирована тема вашей ВКР? 7. Хотели бы вы, чтобы ваша ВКР имела непосредственное отношение к области вашей профессиональной деятельности? 8. Хотели бы вы после завершения обучения продолжать работу над своей ВКР, чтобы довести продукт до уровня готовности технологии 7–9?	Позволяет отразить, каким образом была выбрана и сформулирована тема ВКР, какую роль играет научный руководитель в написании ВКР, в чем заключается ключевое отличие магистерской диссертации от бакалаврской дипломной работы. Дает возможность обнаружить те недостатки и риски, которые видит студент в настоящей процедуре написания ВКР, и может ли предложить альтернативные методы и механизмы решения обозначенных проблем.
----	--	---

Результаты диагностики выборочной совокупности студентов УрФУ на основании онлайн-опроса, проведенного авторами, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты диагностики выборочной совокупности студентов УрФУ

№ вопроса	Референсный ответ	Количество положительных ответов, %		
		Фокус-группа 1	Фокус-группа 2	Всего
1.	Знаю, что это такое	7	25	16
2.	Преобладает проектное обучение	22	10	18
3.	Есть успешный опыт реализации	5	5	5
4.	Факторы, которые могут помешать	18	23	20
5.	Традиционная тема ВКР	9	5	8
6.	Есть инновационная идея	85	40	70
7.	ВКР в формате стартапа	95	90	93
8.	Желание реализовать стартап по теме ВКР	93	75	87

У фокус-группы 1 достаточный уровень знаний в области технологического предпринимательства, финансового моделирования, управления интеллектуальной собственностью и риск-менеджмента в проекте, но не хватает опыта работы с конкретными технологиями, инженерными решениями, современными научно-техническими разработками. Есть собственные инновационные идеи и настрой начать их проработку во время подготовки ВКР и продолжить реализацию после защиты ВКР. Фокус-группу 2 можно охарактеризовать как имеющую достаточный прикладной опыт работы с технологическими проектами, однако не хватает знаний и понятийного аппарата в области управления стартап-проектами. Опыт успешной реализации стартапов есть у 5 % студентов.

4. Обсуждение

Проведенное исследование по формату ВКР в виде стартапа подтвердило востребованность компетенций технологического предпринимательства среди студентов УрФУ. Молодые люди осознают необходимость и полезность введения данного формата в учебный процесс. Студентам интересна тематика, связанная с вхождением в деятельность, связанную с технологическим предпринимательством.

У большинства респондентов есть положительный опыт работы в данной сфере, имеются собственные инновационные идеи проектов, их привлекают инструменты проектно-ориентированного обучения в большей степени, нежели традиционного. Исследование по результатам опроса студентов показывает усредненную картину для выбранной группы респондентов. Представленные результаты характеризуют студентов УрФУ, обучающихся на технических направлениях, но не могут воспроизводиться для студентов как других направлений, в частности гуманитарных, так и других вузов, например, Казанского федерального университета (КФУ) или Сибирского федерального университета (СФУ). К сожалению, в распоряжении авторов нет данных о результатах подобных исследований в других российских университетах.

В 2022 г. Минобрнауки России инициировал проект «Платформа университетского технологического предпринимательства» для создания эффективной системы коммерциализации результатов интеллектуальной деятельности, чтобы вдохновить университетское сообщество запускать технологические стартапы и заниматься предпринимательством. В 2025 г. Платформа стала частью проекта «Технологии» национального проекта «Эффективная и конкурентная экономика». Сегодня Платформа работает как экосистема, которая объединяет инструменты государственной и инвестиционной поддержки начинающих предпринимателей, ученых, заинтересованных в коммерциализации своих разработок, и инвесторов, готовых вкладывать ресурсы в перспективные отечественные идеи. Для поддержки и развития технологического предпринимательства и создания высокотехнологичных стартапов на базе университетов студентов вовлекают в обучающие тренировочные ситуации, приближенные к реальному бизнесу, и позволяют проверить бизнес-гипотезу, упаковать идею, проработать концепцию бизнеса и многое другое. Грантовый конкурс «Студенческий стартап» направлен на выполнение работ студентами по разработке новых товаров, изделий, технологий или услуг с использованием результатов собственных научно-технических и технологических исследований, имеющих потенциал коммерциализации и находящихся на самой ранней стадии развития.

Для подтверждения результатов настоящего исследования и оценки предпринимательских намерений студентов полезно расширить охват респондентов как географически, так и по направлениям обучения. Это позволит не только понимать отношение студентов к технологическому предпринимательству, но и определять их предпринимательскую деятельность в соответствии с приоритетными направлениями, указанными в Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации.

Несмотря на существующие и развивающиеся меры поддержки, студентам бывает сложно оценить уровень своей идеи и научиться управлять факторами, на него влияющими. В литературе [12] указывается на большую неопределенность понимания, как отдельные стартапы растут и продвигают свои рыночные инновации, какие факторы способствуют успеху, жизнеспособности стартапов. Выявленные факторы оцениваются экспертными методами. Авторами предложено использовать понятие «жизнеспособность» для студенческого стартапа.

Понятие «жизнеспособность» стартапа используется в зарубежной литературе, но не нашло широкого распространения в отечественной. В статье П. Прейс с соавторами [13] рассматривают «устойчивость» стартапа в образовании как способность студентов разработать идею своего стартапа более устойчивым образом. Дж. Карриер предложил формулу, в которой «жизнеспособность» – результат суммы таких факторов, как сетевой эффект, масштабируемость, бренд, незаменимость и интеллектуальная собственность [14]. Анализ выпускных квалификационных работ, участвующих в программе «Стартап как диплом», показал, что успех студенческого стартапа зависит от грамотного расчета экономического эффекта и учета рисков, в т. ч. экологических и социальных. Проработка экологических, социальных и управленческих факторов (ESG факторы – Environmental, Social, Governance), влияющих на развитие стартапа, в настоящее время является приоритетной для

стартапов различного уровня, т. к. повышает его инвестиционную привлекательность, лояльность целевой аудитории, сотрудников и местных сообществ.

На рынках США и ЕС инвесторы традиционно используют анализ ESG-показателей для оценки риска вложений. Развитие ESG-системы в России довольно противоречиво. С одной стороны, для многих предприятий разрешена представляемая госорганами и различным регуляторам упрощенная отчетность, под которую попадают большинство стартапов. С другой – Правительство Российской Федерации развивает направление по подготовке и раскрытию отчетности об устойчивом развитии, в т. ч. публичную нефинансовую отчетность [15]. В ответ на новые национальные стандарты, утвержденные Минэкономразвития РФ в 2023 г. [16], Банк России выпустил ряд рекомендаций по учету финансовыми организациями ESG-факторов [17]. В России наблюдается трансформация классической ESG-системы в новые управленческие практики и инструменты, сохраняющие ядро устойчивого развития, адаптированные под задачи государства.

По мнению авторов, для студентов критически важно уметь оценивать не только управленческую и финансовую компоненту своего проекта, но также экологичность и социальную ответственность их проекта. В последние годы трендом становится внедрение цифровых инструментов автоматизированного сбора и анализа не только финансовых данных, но и данных, связанных с управлением рисками и устойчивостью стартапа. Это даст в будущем понимание формирования репутационного капитала, выстраивания отношений с органами власти, удержания и привлечения нужных сотрудников, повышения лояльности клиентов и привлечения инвестиций.

Предложено учитывать при оценке жизнеспособности студенческого стартапа факторы экономической эффективности и экологические и социальные риски проекта. Большинство выпускных квалификационных работ содержат расчеты экономической эффективности и риски стартапа, но нет универсального инструмента, позволяющего оценить уровень студенческого стартапа. Разработка и внедрение методики оценки жизнеспособности студенческого стартапа в будущем может стать полезным инструментом как для экспертов, оценивающих стартапы студентов, так и для самих студентов при защите проектов.

5. Выводы

В данной работе проведена оценка отношения студентов УрФУ к возможности реализации идеи о наукоемком продукте на этапе завершения обучения, что позволит построить технологическое предпринимательство в систему высшего образования.

Анализ результатов реализации программы «Стартап как диплом» в УрФУ показал стабильный рост участников программы, количества реализуемых проектов, а также проектов, получивших грантовое финансирование.

Для обеспечения качественной реализации обучения основам технологического предпринимательства, отслеживания результатов программы «Стартап как диплом» и возможности управления результатами предлагается ввести понятие «жизнеспособность» студенческого стартапа и внедрить методику оценки его жизнеспособности, включающую расчет факторов экономической эффективности и экологических рисков.

Согласно Концепции технологического развития до 2030 г., перед Россией стоит задача достичь опережающего роста технологий для строительства инновационной экономики. В современных условиях особую ценность приобретают инновационные технологические решения, обеспечивающие цифровизацию и экологизацию различных сфер жизнедеятельности человека и общества. Самый короткий и верный путь к решению этой задачи: создание и развитие технологических стартапов – наиболее динамичного элемента новой экономики.

6. Благодарности

Исследование выполнено за счет субсидий Минобрнауки РФ на выполнение научной темы FUMN-2024-0003.

7. Список литературы

1. *Пименов, В. В.* Экономическая и информационная безопасность в условиях цифровой трансформации: инструменты и механизмы по их нейтрализации / В. В. Пименов, П. К. Шафранский // Экономическая безопасность и качество. – 2018. – № 1(30). – С. 25–30. – EDN YVESVJ.
2. *Горбунова, Е. А.* Особенности развития малого и среднего предпринимательства в регионах России / Е. А. Горбунова, С. И. Шаныгин // Экономика. Право. Инновации. – 2022. – № 1. – С. 4–12. – DOI 10.17586/2713-1874-2022-1-4-12. – EDN IIGCOE.
3. Предпринимательский потенциал россиян: мониторинг // wciom.ru [Электронный ресурс]. – URL: <https://wciom.ru/analytical-reviews/analiticheskii-obzor/predprinimatelskii-potencial-rossijan-monitoring> (дата обращения: 25.11.2025).
4. GEM (Global Entrepreneurship Monitor) (2022). Global Entrepreneurship Monitor 2021/2022 Global Report: Opportunity Amid Disruption. London: GEM. – URL: <https://www.gemconsortium.org/reports/latest-global-report>.
5. *Елашкина, А. В.* Диагностика компетенций технологического предпринимателя / А. В. Елашкина, А. Ю. Губанов // Образовательная политика. – 2020. – № S5. – С. 66–78. – EDN YCJFWY.
6. *Демидова, Н. Е.* Анализ малого и среднего бизнеса в России: проблемы и перспективы развития / Н. Е. Демидова, Е. В. Шершова // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2020. – № 12–2. – С. 284–290. – DOI 10.17513/vaael.1508. – EDN BBCGUZ.
7. *Артемова, Д. И.* Исследование предпринимательской активности в вузе как фактора формирования предпринимательских университетов в России / Д. И. Артемова // Креативная экономика. – 2017. – Т. 11, № 5. – С. 565–582. – DOI 10.18334/ce.11.5.37858. – EDN YRDBGX.
8. *Стромов, В. Ю.* Проблемы и перспективы развития молодежного предпринимательства в классическом вузе / В. Ю. Стромов, П. В. Сысоев, В. В. Завьялов // Вестник Тамбовского университета. Серия: Гуманитарные науки. – 2019. – Т. 24, № 180. – С. 7–16. – DOI 10.20310/1810-0201-2019-24-180-7-16. – EDN VAXJUF.
9. *Шевченко, С. М.* Выпускная квалификационная работа как профессиональное решение практико-ориентированных задач / С. М. Шевченко, М. В. Мухина // Вестник Мининского университета. – 2018. – Т. 6, № 2(23). – С. 7. – DOI 10.26795/2307-1281-2018-6-2-7. – EDN OVQWNN.
10. *Кирьякова, А. В.* Проблемы и преимущества защиты выпускной квалификационной работы в форме стартапа / А. В. Кирьякова, Н. В. Спешилова, О. Г. Гореликова-Китаева // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2021. – № 1(229). – С. 47–55. – DOI 10.25198/1814-6457-229-47. – EDN SIECLY.
11. *Ajzen, I.* Perceived Behavioral Control, Self-Efficacy, Locus of Control, and the Theory of Planned Behavior / I. Ajzen // Journal of Applied Social Psychology. – 2002. – Vol. 32 (4). – P. 665–683. – DOI:10.1111/j.1559-1816.2002.tb00236.x.
12. *Alqahtani, A. Y.* Investigation of startups' sustainability: empirical evidence from Saudi Arabia / A. Y. Alqahtany // Entrepreneurship and Sustainability Issues. – 2022. – Vol. 10(1). – P. 107–131. – DOI: <http://doi.org/10.9770/jesi.2022.10.1>.
13. *Preiss, P.* Coaching Concept to Improve the Sustainability Impact of Students' Startup Ideas in an Early Stage / P. Preiss, K. Puteanus-Birkenbach, C. Lang-Koetz // In: Block, J. H., Halberstadt, J., Högsdal, N., Kuckertz, A., Neergaard, H. (eds) Progress in Entrepreneurship Education and Training. FGF Studies in Small Business and Entrepreneurship. Springer, Cham. 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-28559-2_7
14. *Carrier, J.* The Durability Formula – How It Will Determine Your Startup's Future Value / J. Carrier // nfx.com [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nfx.com/post/durability-formula-will-determine-your-startups-future-value> (дата обращения: 07.10.2025).
15. Концепция развития публичной нефинансовой отчетности в Российской Федерации (утверждена распоряжением Правительства РФ от 05.05.2017 N 876-р). – URL:

<http://static.government.ru/media/files/jy1P6Zj9fv4oEbAuVI8V03jxk9r9JIQf.pdf> (дата обращения 25.12.2025).

16. Приказ Минэкономразвития от 1.11.2023 № 764 «Об утверждении методических рекомендаций по подготовке отчетности об устойчивом развитии». – URL: https://economy.gov.ru/material/file/download/70c9039795779d4b5b55c3fb8066afd3/764_2023-11-01.pdf (дата обращения 25.12.2025).
17. Рекомендации Банка России по учету финансовыми организациями ESG-факторов, а также вопросов устойчивого развития при организации корпоративного управления от 28.12.2022 № ИН-02-28/145. – URL: <https://www.cbr.ru/Crosscut/LawActs/File/6089> (дата обращения 25.12.2025).

Сведения об авторах:

Филиппов Даниил Александрович, главный специалист по работе с молодежью, отдел технологического предпринимательства УрФУ, г. Екатеринбург, Россия. Эл. почта: d.a.filippov@urfu.ru.

Баглаева Елена Михайловна, к. ф.-м. н., старший научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

EXPERIENCE IN IMPLEMENTING THE «STARTUP AS A DIPLOMA» PROGRAM AT THE URAL FEDERAL UNIVERSITY

D. A. Philippov¹, E. M. Baglaeva²

¹ Ural federal university, Ekaterinburg, Russia

² Institute of Industrial Ecology of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

The Concept of Technological Development until 2030, approved by order of the Government of the Russian Federation dated May 20, 2023, notes that special attention today requires the development of competencies and skills necessary to increase the innovative activity of organizations, the development of the intellectual property market and technological entrepreneurship. As part of the «Startup as a Diploma» program, students have a unique opportunity to try themselves as technology entrepreneurs with a real startup project, real money and in protected conditions, gain in practice all the skills and knowledge needed to create a technology business and earn money if successful project. The «Startup as a Diploma» program has been implemented at UrFU since 2020. Today, we can formulate some of the successes and difficulties of this program, which is part of the «Digital Economy in the Russian Federation» project. The experience of conducting the program at UrFU revealed the need for the implementation of a similar format for defending thesis among senior students. One of the problems was the lack of methods for assessing the performance of student startups. To assess the effectiveness of a student startup, it is proposed to use the criterion of startup viability, often used in the literature, but not adapted to the characteristics of a startup created by students during the learning process.

Key words: entrepreneurship; startup project; university; high graduation; innovation; small and medium-sized businesses; viability.

References

1. Pimenov, V. V. Economic and information security in the context of digital transformation: tools and mechanisms for their neutralization / V. V. Pimenov, P. K. Shafransky // Economic security and quality. – 2018. – No. 1 (30). – P. 25–30. – EDN YVESVJ.
2. Gorbunova, Ye. A. Features of the Development of Small and Medium-sized Businesses Russian Regions / Ye. A. Gorbunova, S. I. Shanygin // Ekonomika. Pravo. Innovacii. – 2022. – No. 1. – P. 4–12. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17586/2713-1874-2022-1-4-12>.
3. Public Opinion Poll (VCIOM) // wciom.ru [Электронный ресурс]. – URL: <https://wciom.ru/analytical-reviews/analiticheskii-obzor/predprinimatelskii-potencial-rossijan-monitoring> (дата обращения: 25.11.2025).
4. GEM (Global Entrepreneurship Monitor) (2022). Global Entrepreneurship Monitor 2021/2022 Global Report: Opportunity Amid Disruption. London: GEM. – URL: <https://www.gemconsortium.org/reports/latest-global-report>.
5. Elashkina, A. V. Diagnostics of the competencies of a technological entrepreneur / A. V. Elashkina, A. Yu. Gubanov // Educational policy. – 2020. – No. S5. – P. 66–78. – EDN YCJFWY.
6. Demidova, N. E. Analysis of small and medium-sized businesses in Russia: problems and development prospects / N. E. Demidova, E. V. Shershova // Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law. – 2020. – No. 12–2. – P. 284–290. – DOI 10.17513/vaael.1508. – EDN BBCGUZ.
7. Artemova, D. I. Issledovanie predprinimatelskoy aktivnosti v vuze kak faktora formirovaniya predprinimatelskikh universitetov v Rossii [The study of entrepreneurial activity at university as a factor of formation of entrepreneurial universities in Russia] / D. I. Artemova // Kreativnaya ekonomika. – 2017. – Vol. 11, N 5. – P. 565–582. – DOI: 10.18334/ce.11.5.37858.
8. Stromov, V. Y. Problemy i perspektivy razvitiya molodezhnogo predprinimatel'stva v klassicheskom vuze [Problems and potential for the development of youth entrepreneurship in a classical university] / V. Y. Stromov, P. V. Sysoyev, V. V. Zavyalov // Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Gumanitarnye nauki – Tambov University Review. Series: Humanities. – 2019. – Vol. 24, N 180. – P. 7–16. – DOI 10.20310/1810-0201-2019-24-180-7-16 [in Russian].

9. *Shevchenko, S. M.* Output qualification work as a professional solution of practical–assessed problems / S. M. Shevchenko, M. V. Mukhina // Vestnik of Minin University. – 2018. – Vol. 6, N 2. – P. 7. – DOI: 10.26795/2307–1281–2018–6–2–7. [in Russian].
10. *Kiryakova, A. V.* Problems and advantages of defending a final qualification work in the form of a startup / A. V. Kiryakova, N. V. Speshilova, O. G. Gorelikova–Kitaeva // Bulletin of Orenburg State University. – 2021. – No. 1 (229). – P. 47–55. – DOI 10.25198/1814–6457–229–47. – EDN SIECLY.
11. *Ajzen, I.* "Perceived Behavioral Control, Self–Efficacy, Locus of Control, and the Theory of Planned Behavior". Journal of Applied Social Psychology. – 2002. – Vol. 32 (4). – pp. 665–683. doi:10.1111/j.1559–1816.2002.tb00236.x.
12. *Alqahtani, A. Y.* Investigation of startups' sustainability: empirical evidence from Saudi Arabia. Entrepreneurship and Sustainability Issues. – 2022. – Vol. 10(1). – pp. 107–131. <http://doi.org/10.9770/jesi.2022.10.1>.
13. *Preiss, P., Puteanus–Birkenbach, K., Lang–Koetz, C.* Coaching Concept to Improve the Sustainability Impact of Students' Startup Ideas in an Early Stage. In: Block, J.H., Halberstadt, J., Högsdal, N., Kuckertz, A., Neergaard, H. (eds) Progress in Entrepreneurship Education and Training. FGF Studies in Small Business and Entrepreneurship. Springer, Cham. 2023. https://doi.org/10.1007/978–3–031–28559–2_7.
14. *Carrier J.* The Durability Formula – How It Will Determine Your Startup's Future Value // nfx.com [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nfx.com/post/durability-formula-will-determine-your-startups-future-value> (дата обращения 07.10.2025).
15. Concept for the Development of Public Non-Financial Reporting in the Russian Federation (approved by RF Government Order No. 876-r of 05.05.2017). – URL: <http://static.government.ru/media/files/jyIP6Zj9fv4oEbAuVI8V03jxk9r9JIQf.pdf> (accessed: 25.12.2025).
16. Order of the Ministry of Economic Development of 1.11.2023 No. 764 "On Approval of Methodological Recommendations for the Preparation of Sustainability Reports". – URL: https://economy.gov.ru/material/file/download/70c9039795779d4b5b55c3fb8066afd3/764_2023-11-01.pdf (accessed: 25.12.2025).
17. Recommendations Bank of Russia on the consideration of ESG factors by financial institutions, as well as sustainable development issues when organizing corporate governance, dated December 28, 2022 No. IN-02-28/145. – URL: <https://www.cbr.ru/Crosscut/LawActs/File/6089> (accessed: 25.12.2025).

ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА СОВРЕМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ НАНОСОВ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

А. А. Селезнев¹, Е. С. Душевина^{1,2}

¹ *Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*

² *Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия*

Цель исследования – разработка подхода к проведению гранулометрического анализа современных поверхностных наносов городской среды. Задачи исследования:

– отбор проб наносов на территориях городов, находящихся в разных природных климатических, географических, геологических зонах и различающихся промышленной специализацией;

– разделение образцов на размерные фракции последовательно путем отмучивания тонких фракций пыли размером 2–10 и 10–50 мкм и мокрого просеивания фракций мелкого и грубого песка 50–100, 100–250, 250–1000 и > 1000 мкм;

– определение в полученных гранулометрических фракциях 2–10, 10–50, 50–100, 100–250 и 250–1000 мкм концентраций Al и Pb методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и содержания кварца методом рентгеноструктурного анализа;

– валидация полученных данных гранулометрического состава проб наносов путем анализа статистических параметров содержания Al, Pb и кварца в навесках.

Всего отобрано 157 проб наносов на селитебных территориях в восьми городах России: Владивостоке, Екатеринбурге, Мурманске, Нижнем Новгороде, Новосибирске, Ростове-на-Дону, Тюмени и Челябинске. Пробы были разделены на шесть гранулометрических фракций. Получены распределения гранулометрического состава проб осадка в городах, распределения по гранулометрическим фракциям содержания Al, Pb и кварца.

Получены различные специфические паттерны распределения Al, Pb и кварца в гранулометрических фракциях в городах. Предложенный подход позволил уверенно разделить на размерные фракции осадок на жилых территориях в городах. Охарактеризовать содержание Al, Pb и кварца в навесках можно путем оценки статистических параметров для гранулометрической фракции. Полученные закономерности распределения вещественного состава осадков по гранулометрическим фракциям сопоставимы с результатами других исследований.

Ключевые слова: урбанизированная среда; современные поверхностные наносы; гранулометрический состав; отмучивание; просеивание; металлы; минералы.

1. Введение

Определение гранулометрического состава компонентов окружающей среды представляет собой одну из первостепенных задач в понимании процессов миграции и накопления загрязнения. В различных гранулометрических фракциях по-разному происходит процесс накопления поллютантов. При этом мелкодисперсные фракции накапливают больше поллютантов, чем грубодисперсные [1–3].

Гранулометрический анализ проводят для объектов природного и техногенного происхождения:

- почв природных и урбанизированных зон [1, 4–8],

- донных отложений, взвешенного вещества в воде водных объектов [9–12],
- атмосферных выпадений [13–18],
- горных пород [19],
- твердого материала снега [20, 21],
- различных видов поверхностных осадков с городских территорий (дорожной пыли, отложений ливневой канализации и др.) [1–3, 14, 22],
- смывов с листьев и трав [1, 18, 23, 24].

Основные направления в исследованиях гранулометрического состава компонентов окружающей среды:

- исследование путей и механизмов миграции материала разных размерных фракций и потенциально опасных элементов в них в объектах окружающей среды [6, 12],
- определение генезиса частиц разного размера [6],
- исследование механизмов закрепления загрязнения в разных размерных фракциях, прогнозирование путей удаления загрязнителей и самоочищения территорий, конструирование почвенных субстратов для рекультивации территорий [25],
- анализ состава легких респираторных фракций атмосферных аэрозолей, пыли РМ 2,5–10, которые представляют собой транспортирующую среду для загрязнителей в урбанизированных зонах, оценка экологического риска для населения от загрязнителей [14, 26–28],
- изучение биодоступности потенциально опасных элементов [29–32],
- изучение процессов, происходящих при деградации материала свалок, отходов при захоронении и складировании [33, 34].

Общепринятые классификации гранулометрического состава (Качинского, международная, американская) имеют схожие, но различающиеся диапазоны размеров частиц (например, мелкая пыль имеет диапазон 2–50 мкм и < 64 мкм в разных классификациях) [35–39]. Вследствие этого исследователи используют различные классификации при определении гранулометрического состава объектов.

Для получения навески вещества нужной размерной фракции используют следующие методы: просеивание (мокрое, сухое, ручное и механическое) [2, 40], отмучивание [39], магнитную и электростатическую сепарацию [41–43]. К методам гранулометрического анализа без физического получения материала относят лазерную гранулометрию, ареометрический метод, обработку изображений с микроскопа [39, 42, 44–46].

При просеивании используют сита из металлов и сплавов (латунь), синтетических материалов; бумажные, мембранные и тканевые фильтры. Сухое и мокрое просеивание применяется для разделения горных пород, песка, почвы, дорожной пыли. Мокрое – для материалов, которые не могут быть просеяны в сухом состоянии (материал присутствует в виде суспензии или когда необходимо просеять очень мелкий образец, например, ил или донные осадки водоемов). Ручное просеивание используется для небольших образцов. Механическое – для большого количества или просеивания больших проб и осуществляется с помощью просеивающих машин и вибросит. При мокром просеивании агрегаты разрушаются, поэтому весь материал пробы разделяется на гранулометрические фракции. При этом получаемое распределение материала пробы по гранулометрическим фракциям более достоверно в отличие от распределения, получаемого при сухом просеивании. Просеивание не подходит для анализа очень мелких или очень крупных частиц, отмечаются ошибочные результаты для фракций малого размера [47, 48]. Точность результатов зависит от качества сит и правильности их использования. Возможно получение разных результатов при использовании разных наборов сит из-за закупорки ячеек, дефектов и выхода сит из строя при просеивании большого количества материала. Качество результатов гранулометрического анализа, получаемых ситовым

методом, зависит от качества образца, размера сит, метода встряхивания (ручной и механический), времени просеивания и метода калибровки сит [2, 3, 49–52].

Отмучивание не требует сложного и дорогостоящего оборудования, позволяет работать с пробами широкого диапазона размеров частиц, однако проведение процедуры требует большого количества воды [1, 9, 41]. К недостаткам можно отнести сложности с отмучиванием частиц мелких размеров (< 2 мкм) из-за влияния броуновского движения во время осаждения, а также длительное время отстаивания образцов. Подход отмучивания основан на допущении однородной плотности и сферичности всех частиц, но, как правило, объекты окружающей среды неоднородны по составу, а отдельные частицы не имеют сферической формы. Качество результатов отмучивания зависит от размера, формы и плотности частиц, вязкости и температуры среды, электростатических и адсорбционных явлений в ней [39].

Преимущества лазерной, магнитной и инфракрасной гранулометрии обусловлены возможностью анализа небольшого количества используемого материала, малым временем анализа, хорошей воспроизводимостью и точностью результатов, простой калибровкой гранулометра, измерением большого диапазона размеров частиц, возможным определением точного размера отдельных частиц, площади поверхности, количества зерен в образце. Основные недостатки перечисленных методов заключаются в том, что невозможно физическое получение материала для его дальнейшего вещественного анализа; оценка количества мелкой фракции может быть произведена некорректно; форма частиц может влиять на результат определения состава, как и минеральный состав частиц – на результат определения гранулометрического состава [44, 45, 53–56].

Анализ изображений имеет высокую точность, скорость, низкую стоимость, высокую воспроизводимостью результатов, а также автоматизирован. На основе его результатов могут быть смоделированы условия распределения частиц в исследуемом объекте. Основной недостаток метода – сложность достижения репрезентативности отдельных навесок из пробы для получения и анализа изображений, т. е. число взятых для наблюдения частиц невелико по отношению ко всей выборке. Отбор материала в навеску для цифрового анализа происходит вручную. Результат зависит от применяемого оборудования, качества изображений, размеров частиц [53, 57–59].

Комбинирование разных подходов к гранулометрическому анализу (отмучивание и просеивание, мокрое и сухое просеивание, лазерная гранулометрия, просеивание и др.) позволяет избавиться от недостатков каждого метода в отдельности [55, 60, 61]. К тому же комбинирование методов позволяет получить более достоверные данные о зерновом составе объекта. Как правило, комбинируют методы для получения разных размерных фракций материала. Так, просеивание позволяет отделить крупные фракции, но не всегда эффективно для анализа мелких частиц. В то время как ареометрический метод хорошо работает с мелкими фракциями, но может быть менее точным для крупных частиц [55]. Лазерно-дифракционный метод гранулометрического анализа иловых донных отложений дает заниженные данные о содержании песчаных фракций, поэтому их содержание в пробе определяют методом просеивания [61].

На городских территориях непрерывно происходят процессы современного седиментогенеза [62]. Поверхности, материалы, конструкции испытывают механическое разрушение. Образуются различные типы современных поверхностных отложений: дорожная пыль, отложения понижений микрорельефа, тротуарная пыль, отложения ливневой канализации [1, 12, 63]. Современные осадки – одна из основных сред для переноса и накопления загрязнения на городских территориях, неточечный источник загрязнения городской среды. Процессы переноса поллютантов и вещества необходимо учитывать для определения их воздействия на человека и обеспечения комфортной и качественной городской среды. При определении гранулометрического

состава различных типов городских отложений используется отмучивание либо просеивание.

Целью работы было обоснование эффективности применения комбинации подходов отмучивания и мокрого просеивания для определения гранулометрического состава с получением материала гранулометрических фракций современных поверхностных депонированных городских осадков.

2. Материалы и методы

2.1. Характеристика объектов опробования

В качестве объекта исследования выбраны современные поверхностные отложения (осадок) локальных понижений микрорельефа на внутривидовых территориях в жилых кварталах с многоэтажной застройкой города [63–65]. Осадок рассматривается как промежуточное депо седиментационного каскада в селитебной зоне города. Образование осадка увеличивается при нарушении технологий производства земляных работ, при разрушении газонных, грунтовых и дорожных покрытий проезжающими и паркующимися автомобилями, нарушении технологий благоустройства и содержания территорий города, а также в местах, где не зарегулирован сток атмосферных осадков [66]. Мощность отложений варьируется в пределах территории квартала и составляет в среднем 5 см. На рис. 1 показаны примеры накопления и распространения осадков.



Рис. 1. Накопление современных поверхностных осадков на внутридворовых территориях жилых кварталов с многоквартирными домами в городе (а – Владивосток, б – Нижний Новгород, в – Ростов-на-Дону, г – Новосибирск)

2.2. Характеристика обследованных городов

Опробование осадка проводилось в восьми городах России, расположенных в разных природных климатических, географических, геологических и промышленных зонах [64]. В городах происходит интенсивная застройка, развитие территорий, строительство автодорог. Краткое описание территорий обследованных городов приведено в табл. 1.

Таблица 1. Описание особенностей исследуемых городов России

Город, численность населения (млн чел.) / количество автомобилей на 1 000 человек в 2023 г.	Климат, средняя температура июля / января (°С)	Географические и геологические особенности территории	Основные отрасли промышленности
Владивосток, 0,6 / 699	Умеренно муссонный, 18,1 / –11,9	Полуостров Муравьева-Амурского, тектонический горст, сопки, холмы, долины, террасы; андезиты, риолиты, базальты, граниты, изветняки; аллювиальные отложения	Судостроение, судоремонт, машиностроение, химическая, пищевая (рыбопереработка), морской порт, электростанции на природном газе
Екатеринбург, 1,54 / 423	Умеренно континентальный, 19 / –13	Восточный склон Уральских гор, холмистые равнины вдоль реки Исети; граниты, габбро, клинопироксениты, серпентиниты; элювий, делювий, глины суглинки	Машиностроение, металлургия, металлообработка, электростанции на природном газе
Мурманск, 0,27 / 343	Атлантико-арктический умеренный, 14,3 / –10,8	Северо-восточная часть Балтийского щита, морские террасы, пологие возвышенности и долины; метаморфический комплекс, гнейсы, гранитоиды; осадочные породы: песчаные суглинки, биогенные отложения	Машиностроение, судоходство, морской порт, металлообработка, пищевая, электростанции на угле и мазуте
Нижний Новгород, 1,3 / 270	Влажный континентальный, 19,7 / –8,9	Русская платформа, Волго-Окская возвышенность; осадочные породы разного возраста, аллювиальные, элювиальные и делювиальные отложения	Машиностроение, судостроение, речное судоходство, электростанции на природном газе
Новосибирск, 1,64 / 282	Континентальный, 19,4 / –16,5	Приобское плато Западно-Сибирской равнины, берега реки Обь, остроги Салаирского кряжа; порфириты, граниты; осадочные породы морского генезиса; аллювиальные террасы	Машиностроение, металлообработка, химическая, приборостроение, гидроэнергетика, электростанции на угле
Ростов-на-Дону, 1,1 / 289	Умеренно континентальный, 23,4 / –3	Восточно-Европейская плита, Ростовский выступ, берега реки Дон, пески, глины, гравий, галька, известняки, ракушечники, алевролиты и мергели, пески	Машиностроение, речное судоходство, пищевая промышленность
Тюмень, 0,77 / 363	Умеренный континентальный, 18,8 / –15	Западно-Сибирская равнина, Тюменский прогиб, осадочные породы, аллювиальные отложения, пески	Нефтепереработка, металлообработка, машиностроение
Челябинск, 1,2 / 269	Умеренный, 19,3 / –14,1	Южный Урал (граниты), западный борт Западно-Сибирской плиты (осадочные породы)	Цветная и черная металлургия, химическая, машиностроение, угольные электростанции

2.3. Отбор проб

Отбор проб осадка проводился по двум схемам. По первой схеме на территории города по нерегулярной сети отбиралось не менее 40 проб отложений из локальных понижений микрорельефа [63–65]. Из них выбиралось случайным образом 10 проб для дальнейшего анализа. Согласно второй схеме на территории города выбиралось пять типичных жилых кварталов, располагающихся в разных районах [67]. В каждом квартале на внутривортовой территории отбирались пробы отложений локальных

понижений микрорельефа. Для проб проводился гранулометрический анализ, в гранулометрических навесках определялся элементный и минеральный состав.

Проба представляла собой сборную пробу отложений из понижений микрорельефа по 3–5 локализациям на внутривортовой территории квартала. Масса пробы составляла 1–1,5 кг. Проба отбиралась лопатой или совком.

2.4. Оценка времени осаждения частиц

При проведении отмучивания время осаждения частиц размером > 10 и > 50 мкм выбиралось по литературным данным, представленным А. Ф. Вадюниной и З. А. Корчагиной [39]. Результаты оценки времени осаждения частиц почвы, представленные в работе, показаны в табл. 2.

Таблица 2. Статистические параметры распределения времени осаждения частиц размером > 10 и > 50 мкм из литературных данных [39]

Показатель	Фракция, мкм	
	> 10	> 50
Мин.–макс.	815–1591	82–159
СА	1 142	114
СГ	1 128	113
СОткл.	183	18
Мед.	1 121	112
95 % ДИ	±42	±4

СА – среднее арифметическое, СГ – среднее геометрическое, СОткл. – стандартное отклонение, Мед. – медиана, ДИ – доверительный интервал

Высота столба взвеси (см), содержащей частицы нужного размера, рассчитывалась по формуле Стокса:

$$H = t U = t \frac{2}{9} \times \frac{D^2}{4} \times g \times \frac{d_1 - d}{\eta}, \quad (1)$$

где t – соответствует СА времени осаждения частиц в табл. 2, с; U – скорость падения частицы, см/с; D – диаметр частицы, см; g – ускорение свободного падения 981 см/с²; d_1 – плотность частицы, г/см³; d – плотность воды, г/см³; η – вязкость воды при данной температуре, г/(см·с) [39].

При расчете было принято:

- форма всех частиц сферическая;
- нормальные условия проведения отмучивания в лаборатории;
- вязкость $\eta = 0,01006$ г/(см·с) соответствует вязкости дистиллированной воды при температуре 20 °С, плотность составляет 0,998230 г/см³ [39];
- частицы имеют одинаковую плотность 2,55 г/см³;
- высота столба жидкости 10 см.

Для проведения отмучивания в стакане диаметром 10 см была получена высота столба взвеси не более 10 см, что примерно соответствует объему взвеси 700 мл.

2.5. Подготовка и гранулометрическое разделение проб

На этапе подготовки из отложений удалялись крупные корни, обломки горных пород и посторонние включения. Пробы высушивались до воздушно-сухого состояния в сушильном шкафу при температуре 59 °С. Высушенная проба измельчалась пестиком с резиновым наконечником и перемешивалась, затем просеивалась через сито с размером ячеек 3 мм. Из каждой пробы методом квартования отбиралась представительная навеска массой 100–300 г для гранулометрического анализа.

Для проведения фракционирования пробы использовались:

- стаканы лабораторные объемом 1 000 мл,
- стеклянная палочка,
- сита лабораторные с размером ячеек: 100, 250 и 1 000 мкм,
- пестик с резиновым наконечником,
- лотки пластиковые,
- емкости для накопления суспензий,
- дистиллированная вода комнатной температуры,
- прибор вакуумного фильтрования, состоящий из колб Бунзена с воронками Бюхнера, соединенных параллельно,
- бумажный фильтр «синяя лента» с размером пор 2 мкм (ГОСТ 12026–76),
- бумажный фильтр «красная лента» с размером пор 8 мкм (ГОСТ 12026–76),
- весы лабораторные.

Гранулометрический анализ проводился пошагово.

Шаг 1 – равные порции навески высыпались в стаканы, заливались водой. Смесь отстаивалась в течение 2 ч для полного перемешивания материала с водой.

Шаг 2 – получение фракции 2–10 мкм. Материал в стаканах взмучивался стеклянной палочкой. После осаждения частиц размером > 10 мкм в течение 20 мин столб суспензии высотой 10 см (примерно 700 мл), содержащий фракцию < 10 мкм и воду, сливался из стаканов в емкость. Остаток в стаканах заливался водой до 1 л и снова взмучивался. Такая процедура отмучивания повторялась многократно до достижения прозрачной воды в стаканах. Накопленная суспензия с фракцией < 10 мкм фильтровалась через фильтр «синяя лента». Фильтр с твердым материалом высушивался при комнатной температуре на пластиковом лотке.

Шаг 3 – получение фракции 10–50 мкм. Материал с остатком в стаканах после шага 2 (частицы > 10 мкм) заливался водой и взмучивался. После осаждения частиц размером > 50 мкм в течение 2 мин столб суспензии с фракцией 10–50 мкм сливался в емкость. Остаток в стаканах заливался водой. Процедура отмучивания также повторялась многократно до прозрачной воды в стаканах. Накопленный объем воды с фракцией 10–50 мкм фильтровался через фильтр «красная лента». Фильтр с твердым материалом также высушивался при комнатной температуре.

Шаг 4 – получение фракции 50–100 мкм. Остаток навески после шагов 2 и 3 просеивался на сите с размером ячеек 100 мкм с добавлением дистиллированной воды. Агрегаты дополнительно истирались вручную пестиком с резиновым наконечником. Полученный материал фракции 50–100 мкм высушивался при комнатной температуре.

Шаг 5 – получение фракции 100–250 мкм. Остаток навески после выполнения шагов 2–4 просеивался на сите с размером ячеек 250 мкм с добавлением дистиллированной воды. Агрегаты дотирались пестиком с резиновым наконечником. Материал фракции 100–250 мкм высушивался при комнатной температуре.

Шаг 6 – получение фракций 250–1 000 и > 1 000 мкм. Остаток пробы просеивался на сите с размером ячеек 1 000 мкм и с добавлением дистиллированной воды. Агрегаты дополнительно дотирались пестиком с резиновым наконечником. Полученный после просеивания материал фракций 250–1 000 и > 1000 мкм высушивался при комнатной температуре.

Воздушно-сухой материал гранулометрических фракций взвешивался на аналитических весах с погрешностью до сотых долей грамма. Гранулометрический состав пробы вычислялся как:

$$X = \frac{m_n}{M} \times 100, \% \quad (2)$$

где X – доля фракции в навеске; M – масса навески, г; m_n – масса фракции n , г.

2.6. Определение вещественного состава гранулометрических навесок

Элементный состав навесок определялся методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на масс-спектрометре ELAN 9000 фирмы Perkin Elmer (США) согласно Методике выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98. Анализ проводился в Химико-аналитическом центре ИПЭ УрО РАН. Минеральный состав определялся на дифрактометре XRD-7000 фирмы Shimadzu (Япония) с использованием программного обеспечения Siroquant. Состав отдельных минеральных групп уточнялся с использованием дериватографа Diamond TG/DTA фирмы Perkin Elmer (США). Определение минерального состава проводилось в Центре коллективного пользования «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН.

2.7. Валидация подхода

Для проверки работоспособности подхода (валидации) и его пригодности получать данные о состоянии объектов окружающей среды (верификации):

- исследовались статистические параметры распределения массовой доли гранулометрических фракций осадка в разных городах;
- исследовались статистические параметры распределения содержания Al, Pb и кварца по гранулометрическим фракциям в осадке в разных городах;
- в части достоверности разделения материала на гранулометрические фракции выборки полученных значений содержания Al, Pb и кварца в гранулометрических фракциях в осадке в городах сравнивались попарно согласно критерию Манна – Уитни;
- полученные распределения массовой доли гранулометрических фракций, содержания Al, Pb и кварца, сравнивались с данными о составе почв, дорожной пыли на городских территориях как объектов близких по составу и свойствам к исследуемому осадку из локальных понижений микрорельефа.

Свинец считается одним из наиболее распространенных поллютантов в городской среде. Его содержание значительно выше, чем природное (в том числе кларк). Основным источником загрязнения свинцом городских территорий считается автомобильный транспорт и выбросы предприятий. Алюминий – наиболее распространенный металл в земной коре. Кварц, самый распространенный минерал в земной коре, имеет высокую твердость и наименее подвержен выветриванию [68].

3. Результаты

Пробы осадка отбирались в период 2018–2022 гг. Число проанализированных проб представлено в табл. 3.

Таблица 3. Число проб осадка, в которых проведен вещественный анализ

Город	Число проб	
	Схема 1	Схема 2
Владивосток	10	9
Екатеринбург	10	9
Мурманск	10	14
Нижний Новгород	10	15
Новосибирск	10	11
Ростов-на-Дону	10	12
Тюмень	–	15
Челябинск	–	12

3.1. Гранулометрический состав осадка

В табл. 4 и на рис. 2 показаны статистические параметры распределения гранулометрического состава проб осадка в городах. Гранулометрический состав отложений различается на территориях разных городов. Распределение материала осадка по гранулометрическим фракциям на территории города имеет неравномерный характер. В осадке преобладают средне- и крупнопесчаные фракции размером > 100 мкм.

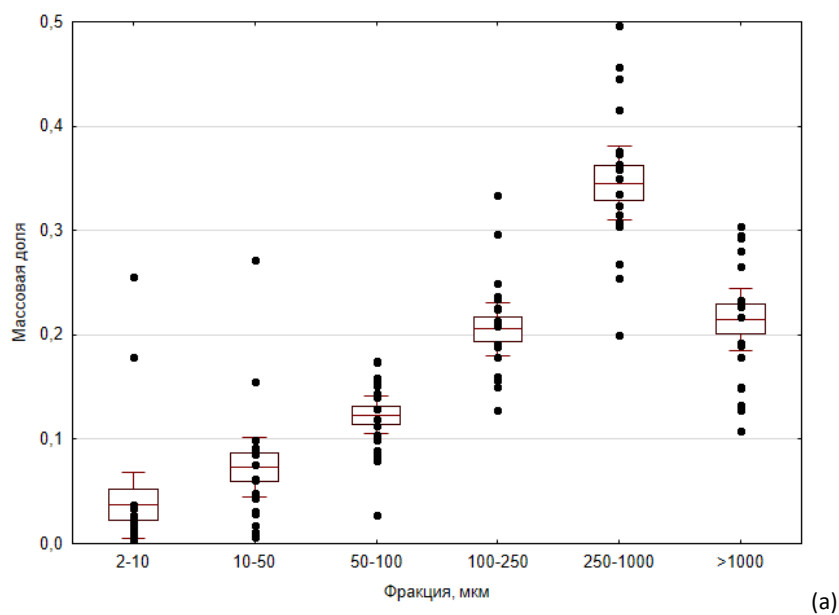
Таблица 4. Статистические параметры распределения гранулометрического состава проб осадка в городах

Фракция, мкм	N	СА	СГ	Мед,	СОкл.	КВ, %
Екатеринбург						
2–10	19	0,04	0,02	0,01	0,07	176
10–50	19	0,07	0,05	0,06	0,06	82
50–100	19	0,12	0,12	0,13	0,04	31
100–250	19	0,21	0,20	0,21	0,05	25
250–1 000	19	0,35	0,34	0,34	0,07	21
> 1 000	19	0,22	0,21	0,23	0,06	29
Новосибирск						
2–10	21	0,01	0,01	0,01	0,01	42
10–50	21	0,06	0,04	0,05	0,04	59
50–100	21	0,14	0,13	0,14	0,05	34
100–250	21	0,22	0,22	0,24	0,05	23
250–1 000	21	0,37	0,36	0,35	0,08	22
> 1 000	21	0,20	0,17	0,17	0,12	59
Владивосток						
2–10	19	0,02	0,02	0,02	0,02	88
10–50	19	0,05	0,03	0,04	0,05	99
50–100	19	0,08	0,07	0,09	0,03	34
100–250	19	0,17	0,16	0,19	0,05	30
250–1 000	19	0,38	0,37	0,38	0,10	26
> 1 000	19	0,30	0,27	0,28	0,12	40
Тюмень						
2–10	15	0,02	0,01	0,01	0,02	116
10–50	15	0,03	0,02	0,02	0,03	88
50–100	15	0,11	0,09	0,09	0,07	65
100–250	15	0,51	0,48	0,52	0,16	31
250–1 000	15	0,27	0,25	0,27	0,12	43
> 1 000	15	0,06	0,02	0,02	0,11	202
Челябинск						
2–10	12	0,04	0,02	0,02	0,03	82
10–50	12	0,10	0,08	0,09	0,06	62
50–100	12	0,25	0,23	0,24	0,09	35
100–250	12	0,27	0,25	0,24	0,10	36
250–1 000	12	0,30	0,29	0,29	0,07	23
> 1 000	12	0,06	0,05	0,06	0,04	63
Мурманск						
2–10	24	0,05	0,04	0,04	0,05	88
10–50	24	0,04	0,04	0,04	0,02	51
50–100	24	0,11	0,10	0,10	0,04	35
100–250	24	0,25	0,24	0,24	0,07	27
250–1 000	24	0,48	0,47	0,47	0,09	18
> 1 000	24	0,07	0,06	0,05	0,07	87
Ростов-на-Дону						
2–10	22	0,12	0,12	0,12	0,04	33
10–50	22	0,08	0,05	0,05	0,08	99
50–100	22	0,16	0,14	0,12	0,08	53
100–250	22	0,34	0,31	0,34	0,10	31
250–1 000	22	0,24	0,23	0,24	0,07	27
> 1 000	22	0,06	0,05	0,05	0,04	71
Нижний Новгород						
2–10	25	0,02	0,02	0,02	0,02	86
10–50	25	0,06	0,05	0,05	0,03	51
50–100	25	0,22	0,20	0,22	0,08	37
100–250	25	0,31	0,30	0,31	0,09	28

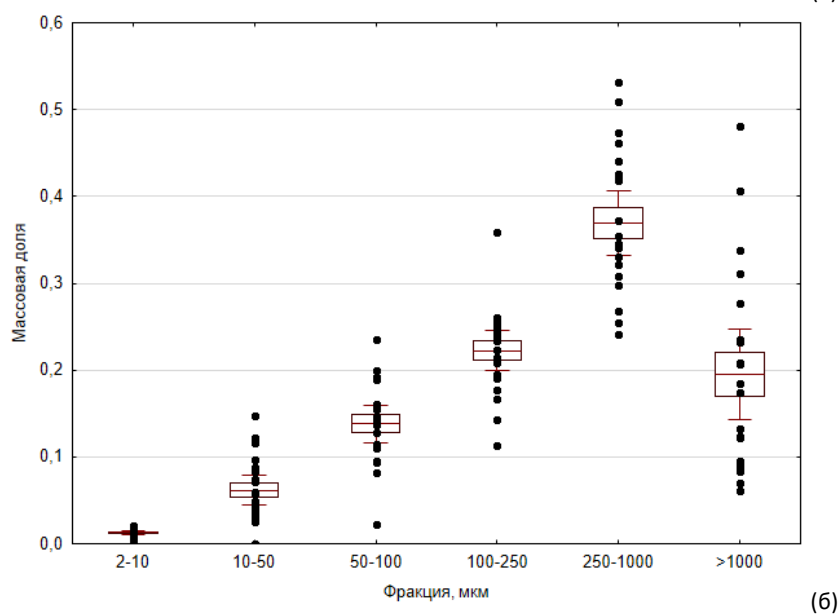
Окончание табл. 4

250–1 000	25	0,36	0,35	0,36	0,09	26
> 1 000	25	0,03	0,02	0,02	0,02	59

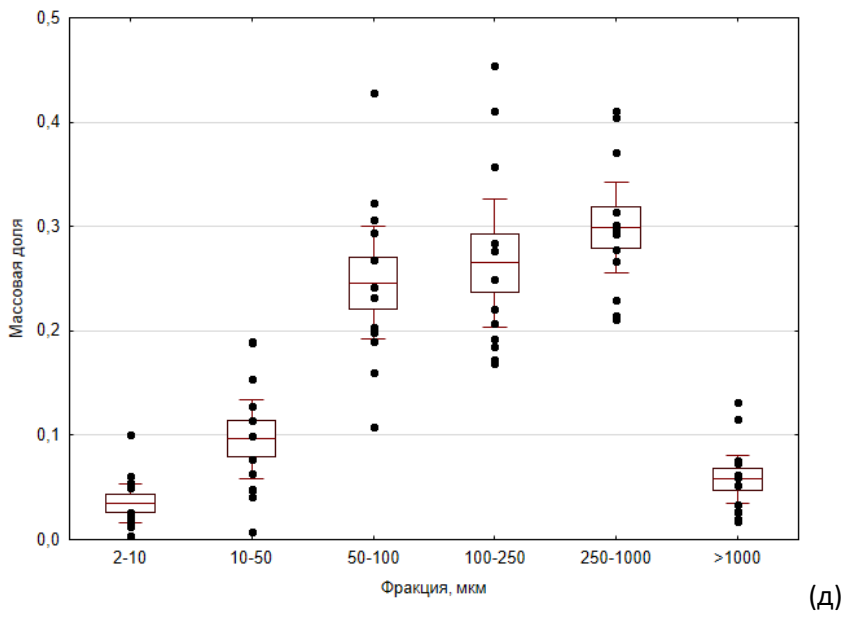
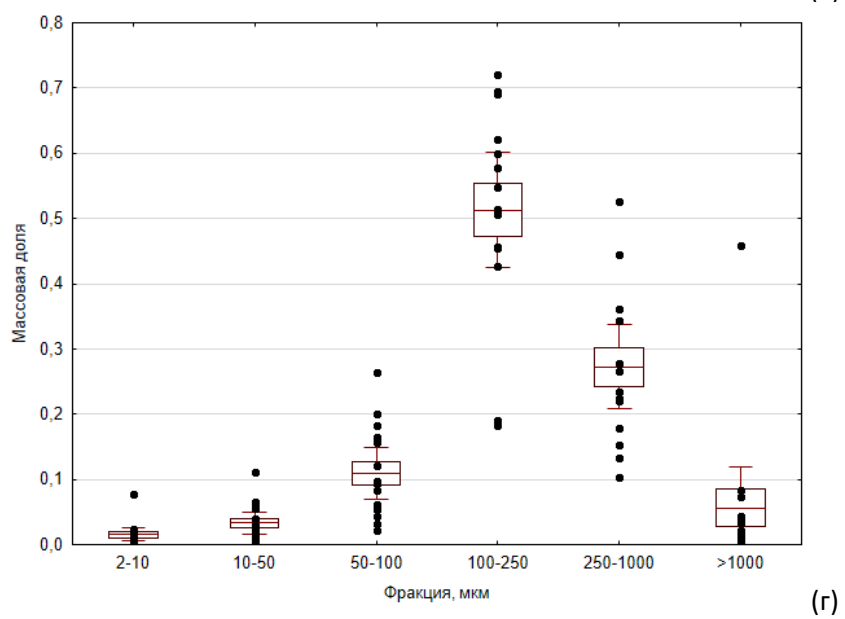
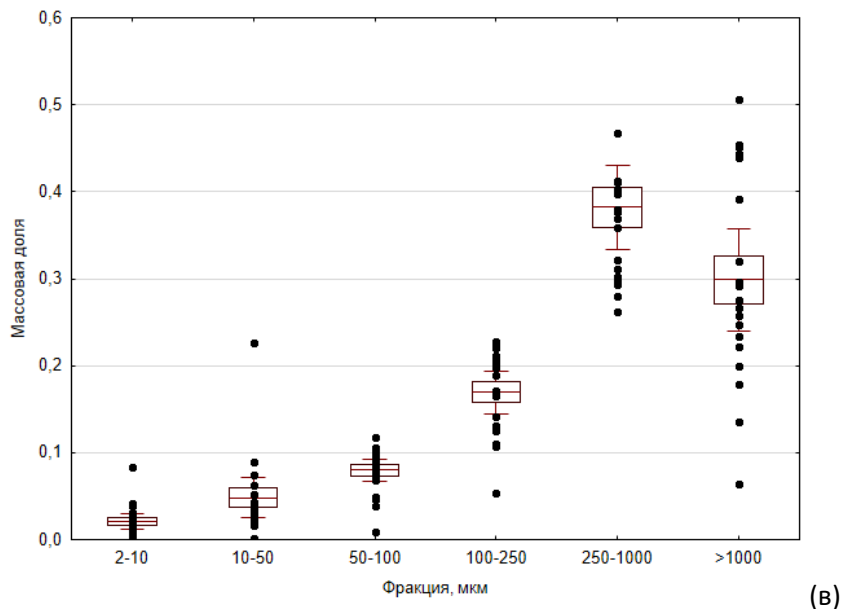
КВ – коэффициент вариации



(a)



(б)



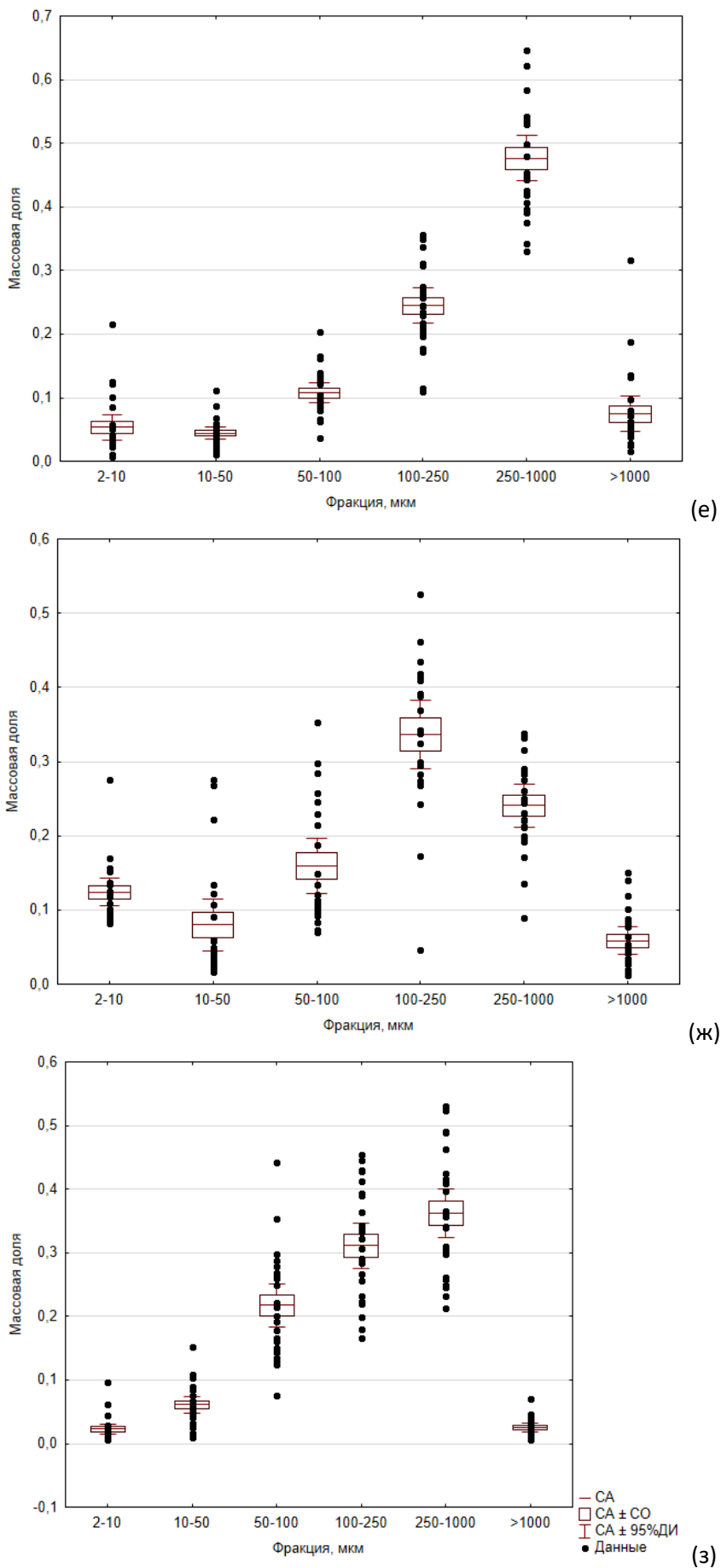


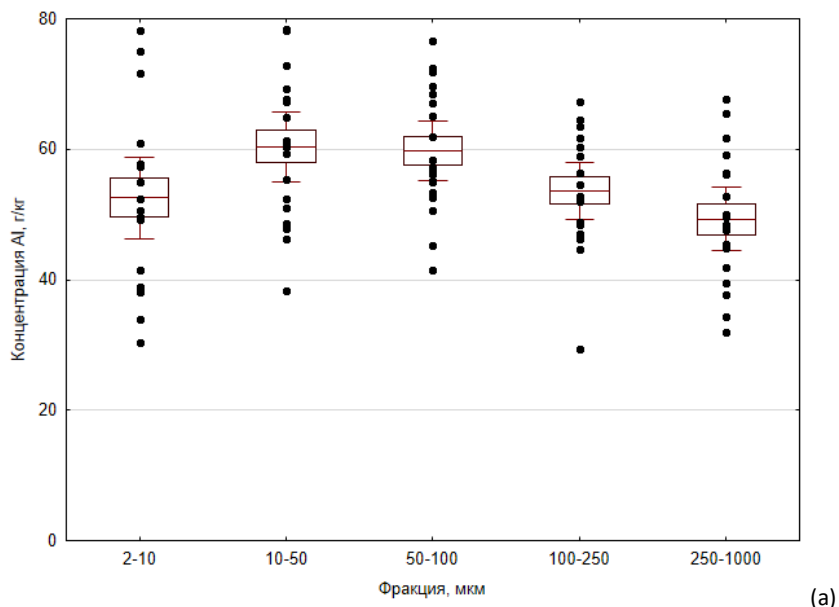
Рис. 2. Гранулометрический состав осадка в городах: (а) Екатеринбург, (б) Новосибирск, (в) Владивосток, (г) Тюмень, (д) Челябинск, (е) Мурманск, (ж) Ростов-на-Дону, (з) Нижний Новгород. СО – стандартная ошибка

3.2. Содержание Al, Pb и кварца в гранулометрических фракциях осадка

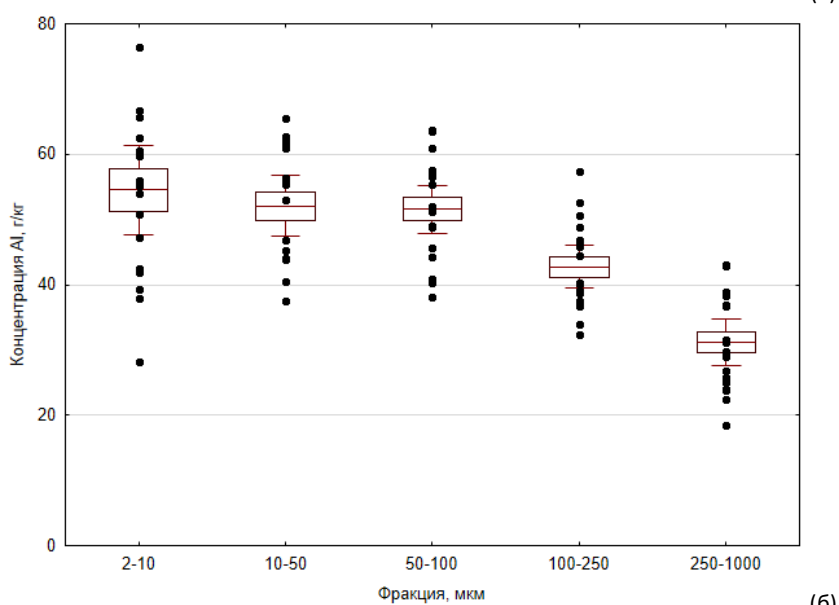
В табл. 5 и на рис. 3 показаны статистические параметры распределения концентрации Al в гранулометрических фракциях в осадке в городах. Получены различные паттерны распределения Al в гранулометрических фракциях в городах. Наибольшее содержание Al приходится на фракции 2–100 мкм [68]. Содержание Al уменьшается с увеличением размера фракции.

Таблица 5. Статистические параметры распределения концентрации Al в гранулометрических фракциях в осадке в городах

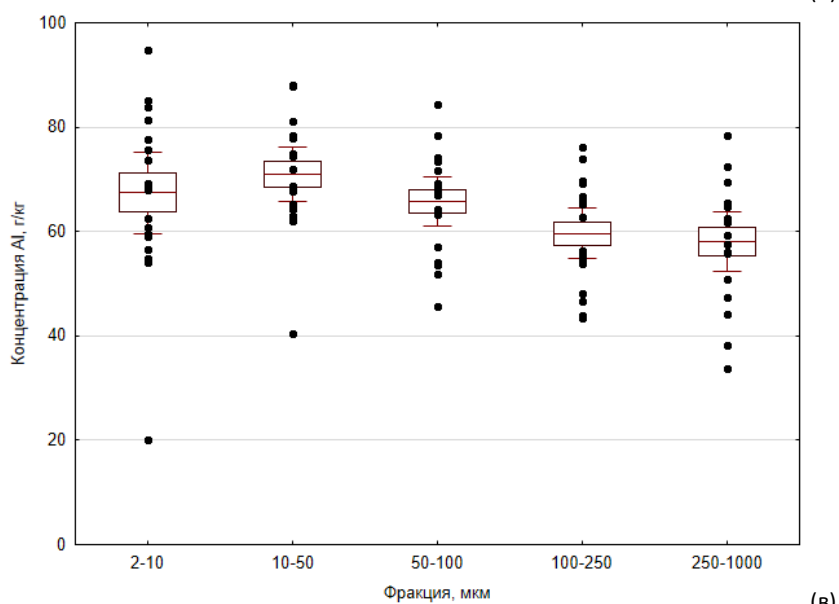
Фракция, мкм	N	СА	СГ	Мед.	СОткл.	КВ, %
Екатеринбург						
2–10	19	53	51	51	13	25
10–50	19	60	59	61	11	18
50–100	19	60	59	57	10	16
100–250	19	54	53	53	9	17
250–1 000	19	49	48	48	10	20
Новосибирск						
2–10	20	55	53	55	13	24
10–50	20	53	52	55	9	17
50–100	21	52	52	52	8	15
100–250	21	43	43	43	7	15
250–1 000	21	32	31	30	8	24
Владивосток						
2–10	19	67	65	69	16	24
10–50	19	71	70	72	11	15
50–100	19	66	65	67	10	15
100–250	19	60	59	56	10	17
250–1 000	18	58	57	61	12	20
Тюмень						
2–10	15	30	28	27	14	45
10–50	15	31	30	29	11	35
50–100	14	33	32	33	8	24
100–250	15	19	19	19	6	29
250–1 000	15	17	16	15	6	36
Челябинск						
2–10	12	69	68	67	9	13
10–50	12	62	62	61	6	10
50–100	12	61	61	61	5	8
100–250	12	40	39	42	9	23
250–1 000	12	47	46	48	6	13
Мурманск						
2–10	24	59	58	56	14	23
10–50	23	55	54	52	11	20
50–100	23	63	62	62	10	16
100–250	21	58	58	60	7	11
250–1 000	23	59	59	59	5	9
Ростов-на-Дону						
2–10	18	33	27	27	22	65
10–50	20	43	42	41	9	21
50–100	22	36	34	34	11	30
100–250	22	8	8	8	3	38
250–1 000	21	9	7	7	6	68
Нижний Новгород						
2–10	22	27	24	25	13	48
10–50	25	40	39	42	8	20
50–100	25	34	33	33	7	21
100–250	25	9	9	9	1	16
250–1 000	25	5	5	5	1	15



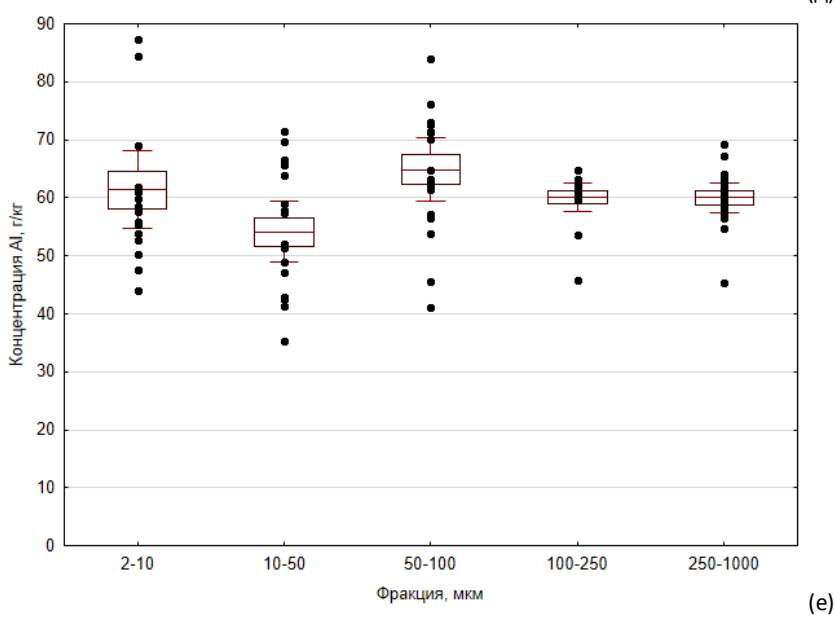
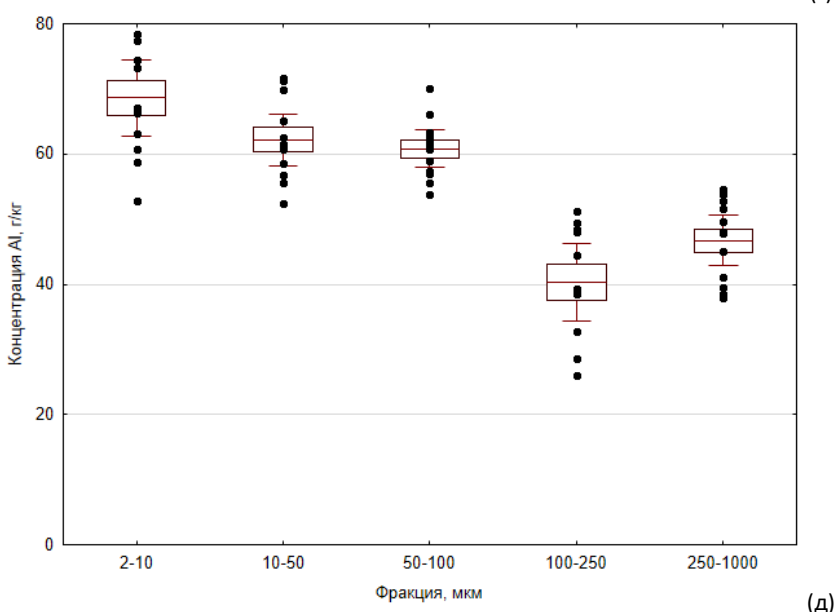
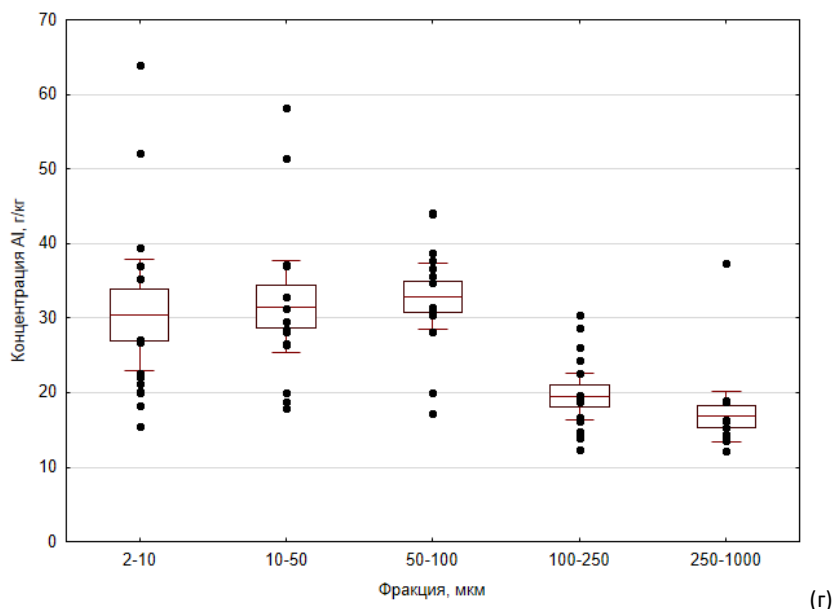
(a)



(б)



(B)



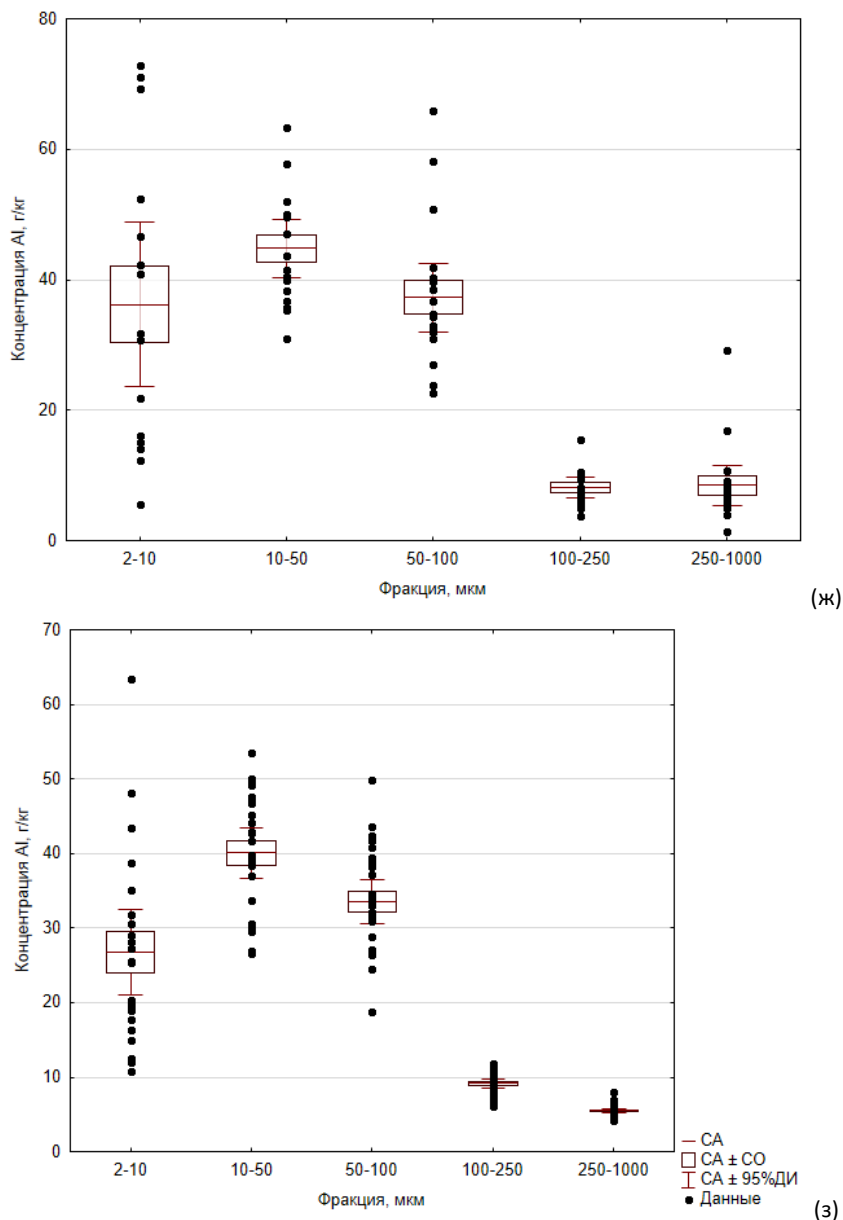


Рис. 3. Содержание Al в гранулометрических фракциях в осадке в городах: (а) Екатеринбург, (б) Новосибирск, (в) Владивосток, (г) Тюмень, (д) Челябинск, (е) Мурманск, (ж) Ростов-на-Дону, (з) Нижний Новгород. CO – стандартная ошибка

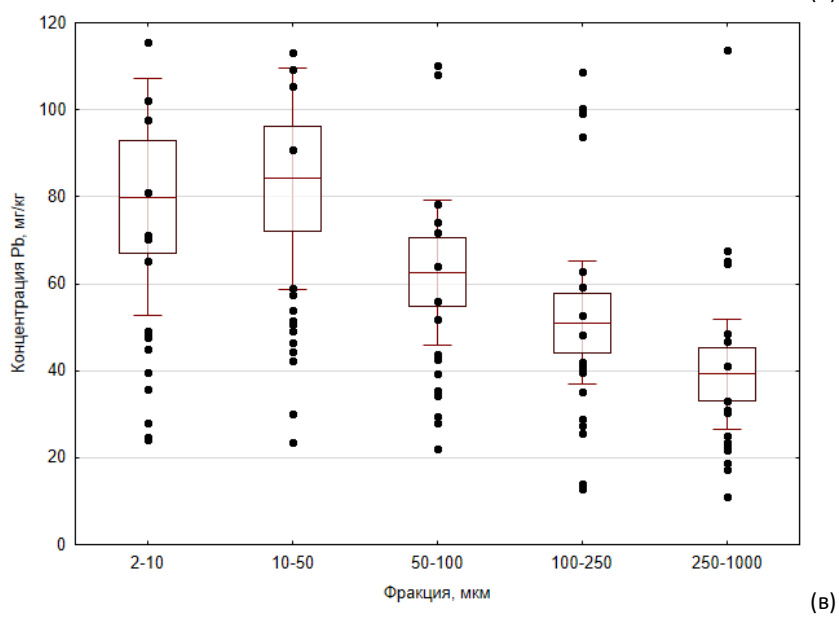
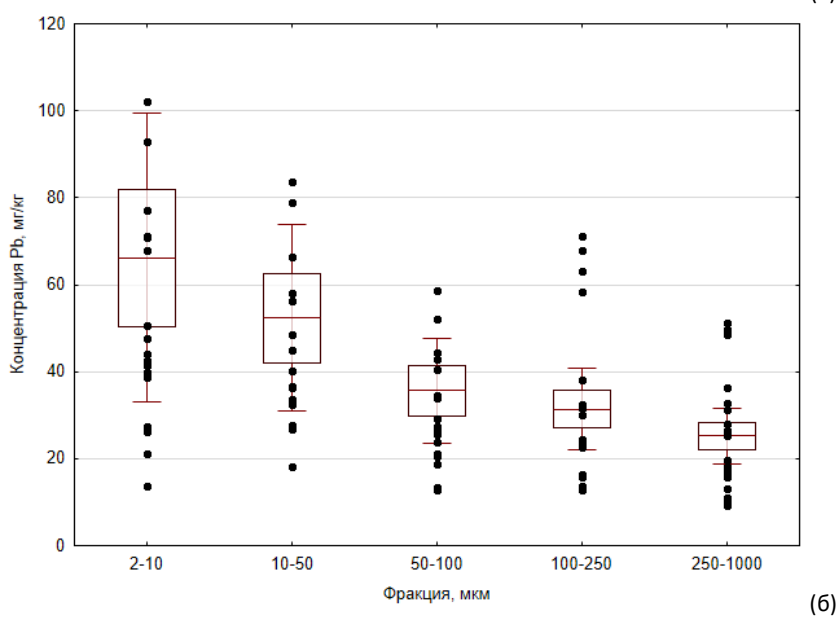
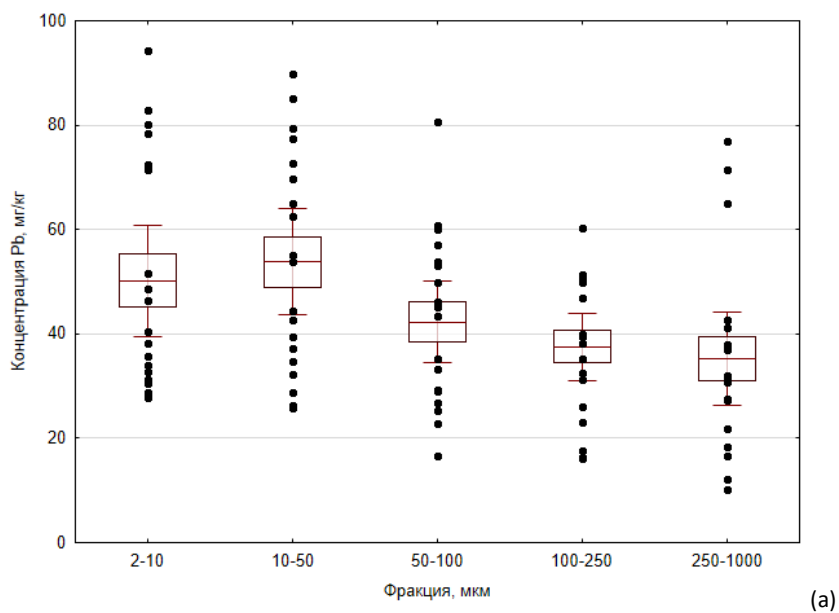
В табл. 6 и на рис. 4 показано распределение концентрации Pb по гранулометрическим фракциям. Концентрация Pb увеличивается с уменьшением размера фракции [68].

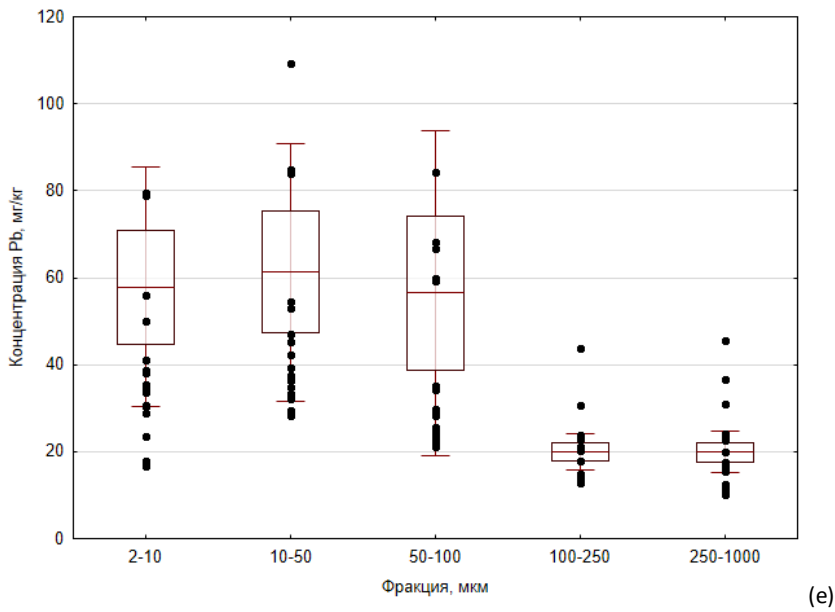
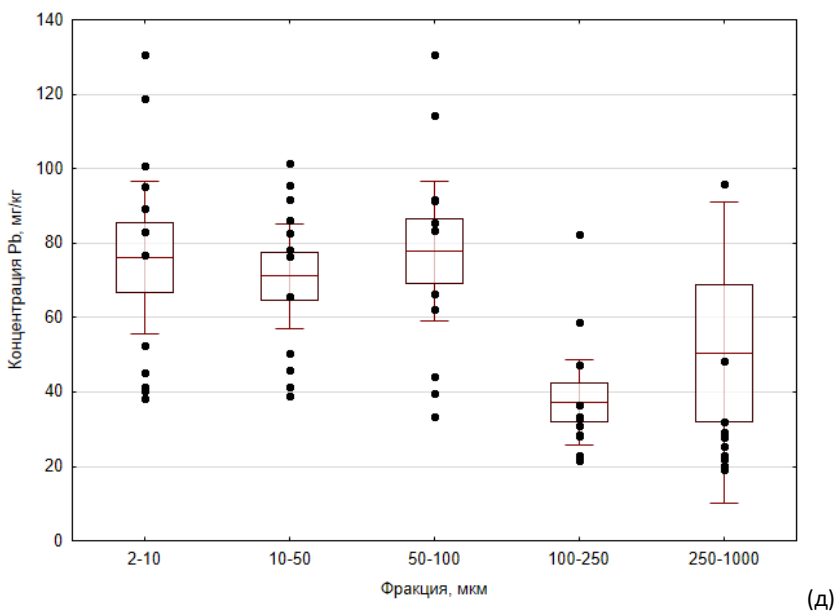
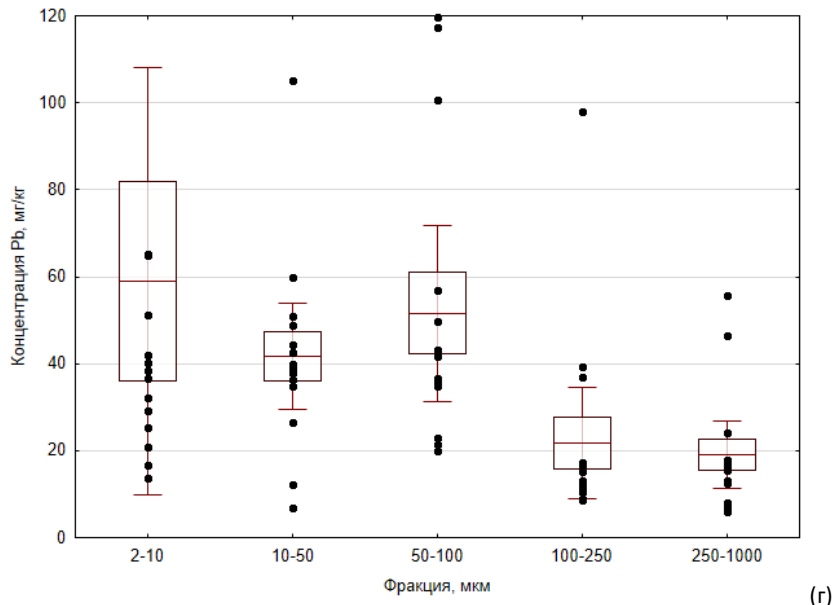
Таблица 6. Статистические параметры распределения концентрации Pb в гранулометрических фракциях в осадке в городах

Фракция, мкм	N	CA	СГ	Мед.	СОткл.	КВ, %
Екатеринбург						
2–10	19	50	46	40	22	44
10–50	19	54	50	54	21	39
50–100	19	42	39	43	16	39
100–250	19	38	35	38	13	36
250–1 000	19	35	31	31	19	53
Новосибирск						
2–10	20	64	50	43	64	100
10–50	20	51	42	39	41	81
50–100	21	35	30	27	24	68
100–250	21	31	26	24	19	61
250–1 000	21	26	22	20	14	55

Окончание табл. 6

Владивосток						
2–10	19	80	65	65	56	71
10–50	19	84	71	58	53	63
50–100	19	63	55	52	35	55
100–250	19	51	43	41	29	58
250–1 000	18	39	33	31	25	65
Тюмень						
2–10	15	59	39	37	89	151
10–50	15	42	36	40	22	53
50–100	14	52	43	39	35	68
100–250	15	22	16	13	23	106
250–1 000	15	19	16	16	14	73
Челябинск						
2–10	12	76	70	80	32	42
10–50	12	71	68	77	22	31
50–100	12	78	72	84	30	38
100–250	12	37	34	32	18	48
250–1 000	12	51	35	27	64	126
Мурманск						
2–10	24	55	42	35	54	97
10–50	23	60	49	42	54	90
50–100	23	55	41	34	68	122
100–250	21	20	19	18	7	37
250–1 000	23	20	18	17	9	45
Ростов-на-Дону						
2–10	18	33	29	26	19	57
10–50	20	49	44	39	25	50
50–100	22	42	37	34	24	58
100–250	22	16	13	13	11	69
250–1 000	21	17	14	16	9	53
Нижний Новгород						
2–10	22	39	33	31	27	70
10–50	25	58	49	47	42	72
50–100	25	46	38	41	37	80
100–250	25	13	10	9	13	96
250–1 000	25	16	10	10	22	139





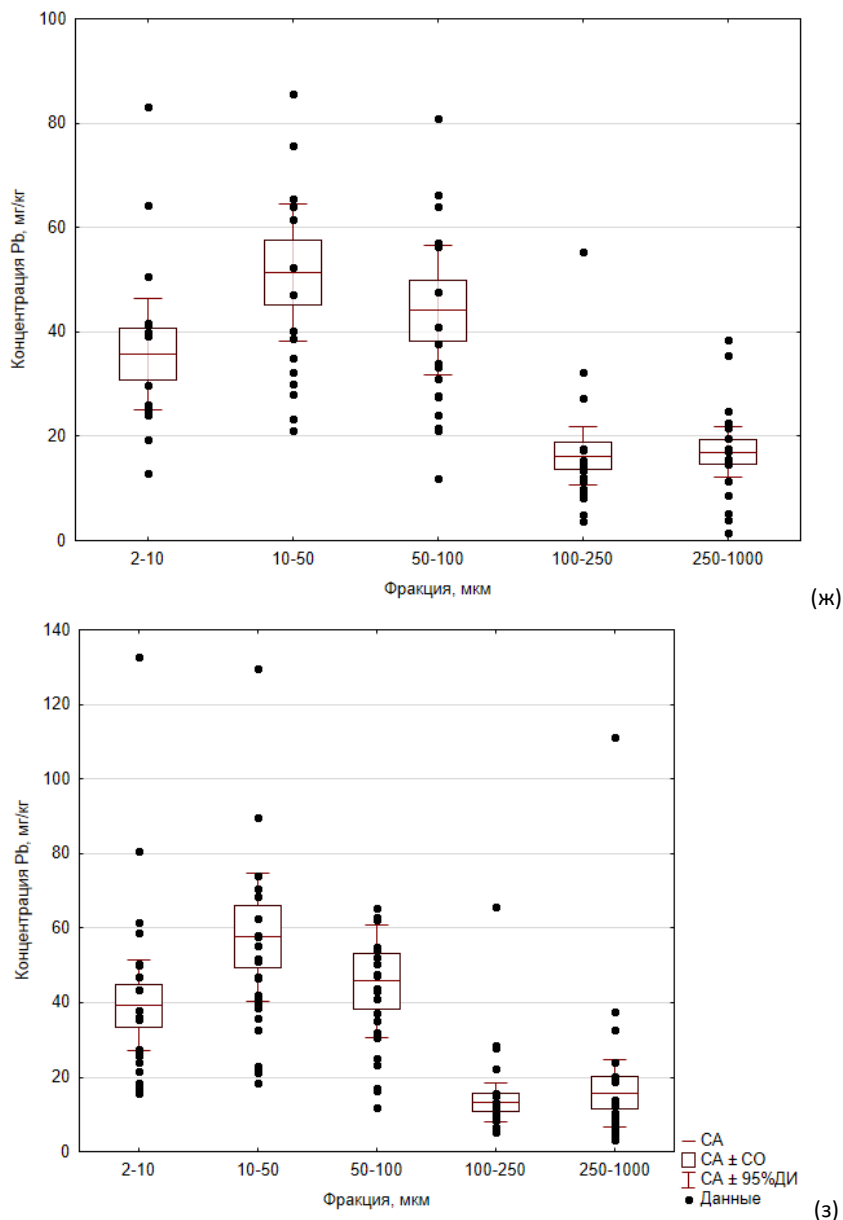


Рис. 4. Содержание Pb в гранулометрических фракциях в осадке в городах: (а) Екатеринбург, (б) Новосибирск, (в) Владивосток, (г) Тюмень, (д) Челябинск, (е) Мурманск, (ж) Ростов-на-Дону, (з) Нижний Новгород. CO – стандартная ошибка

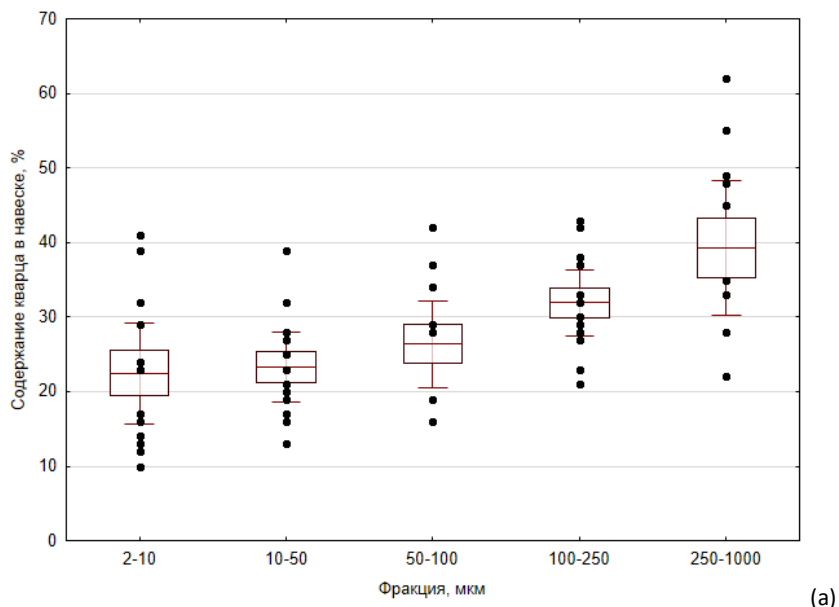
В табл. 7 и на рис. 5 показано распределение содержания кварца в гранулометрических фракциях в осадке.

Таблица 7. Статистические параметры распределения содержания кварца в гранулометрических фракциях в осадке в городах

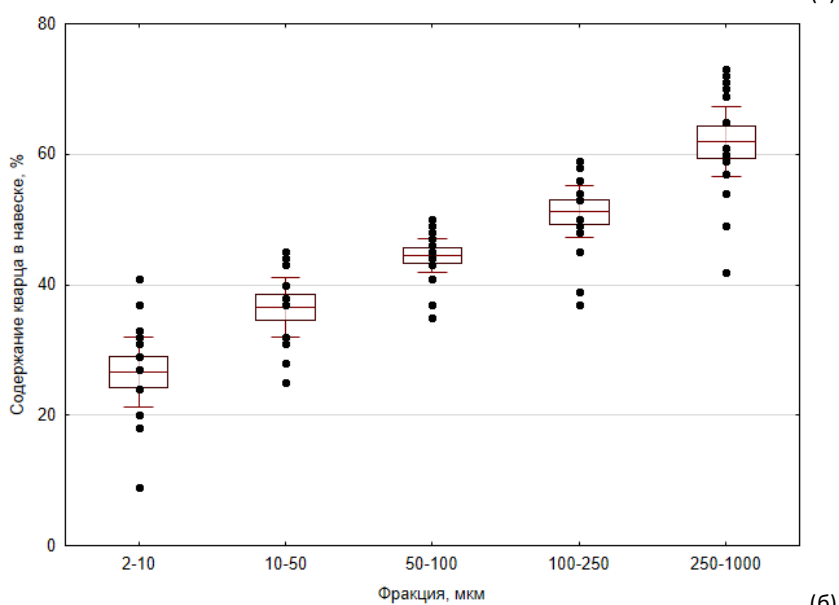
Фракция, мкм	N	СА	СГ	Мед.	СОткл.	КВ, %
Екатеринбург						
2–10	12	23	20	20	11	47
10–50	12	23	22	22	7	32
50–100	11	26	25	28	9	33
100–250	12	32	31	31	7	22
250–1 000	11	39	37	35	13	34
Новосибирск						
2–10	14	26	24	27	9	34
10–50	14	36	35	38	8	22
50–100	15	44	43	45	5	12
100–250	15	51	50	53	7	13
250–1 000	15	61	60	61	9	15

Окончание табл. 7

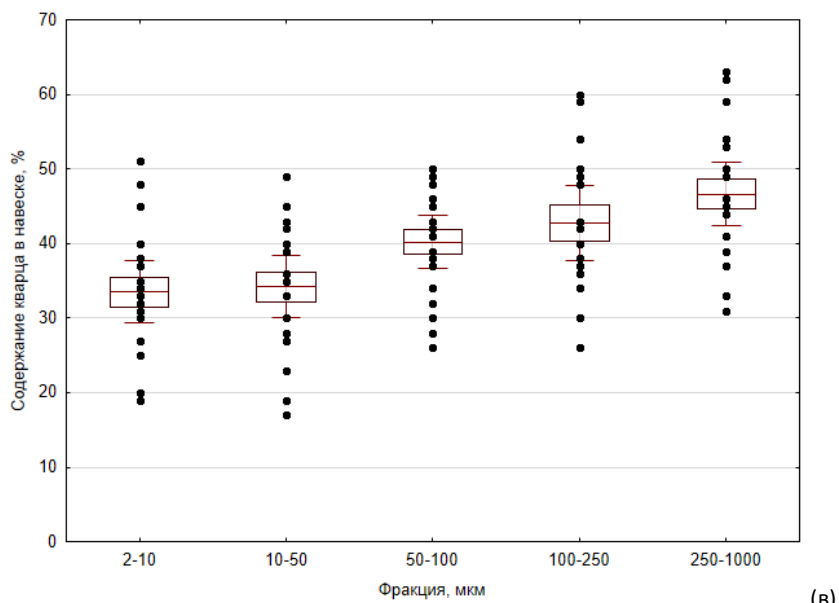
Владивосток						
2–10	19	34	32	33	9	26
10–50	19	34	33	35	9	25
50–100	19	40	40	41	7	19
100–250	19	43	42	40	10	24
250–1 000	19	47	46	45	9	19
Тюмень						
2–10	15	45	43	46	11	25
10–50	14	31	30	30	8	26
50–100	9	42	41	42	8	20
100–250	15	66	64	71	14	22
250–1 000	15	63	60	66	17	28
Челябинск						
2–10	11	29	28	32	9	29
10–50	11	30	29	29	8	26
50–100	12	31	30	29	8	27
100–250	12	60	60	59	9	15
250–1 000	12	53	53	52	10	18
Мурманск						
2–10	24	29	27	31	8	29
10–50	21	22	21	22	6	25
50–100	23	26	25	28	8	30
100–250	24	34	34	34	5	15
250–1 000	24	39	39	39	4	11
Ростов-на-Дону						
2–10	17	50	48	49	15	29
10–50	19	47	46	44	8	18
50–100	22	56	56	55	8	14
100–250	21	83	83	83	8	9
250–1 000	22	79	78	81	11	14
Нижний Новгород						
2–10	17	49	48	45	10	21
10–50	25	42	41	42	8	19
50–100	25	58	57	58	8	13
100–250	25	85	84	85	5	6
250–1 000	24	87	87	87	5	6



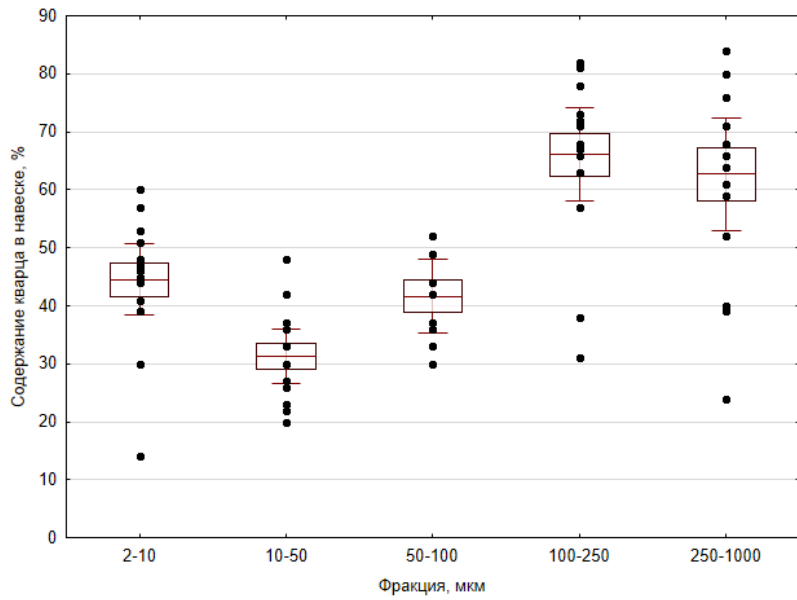
(a)



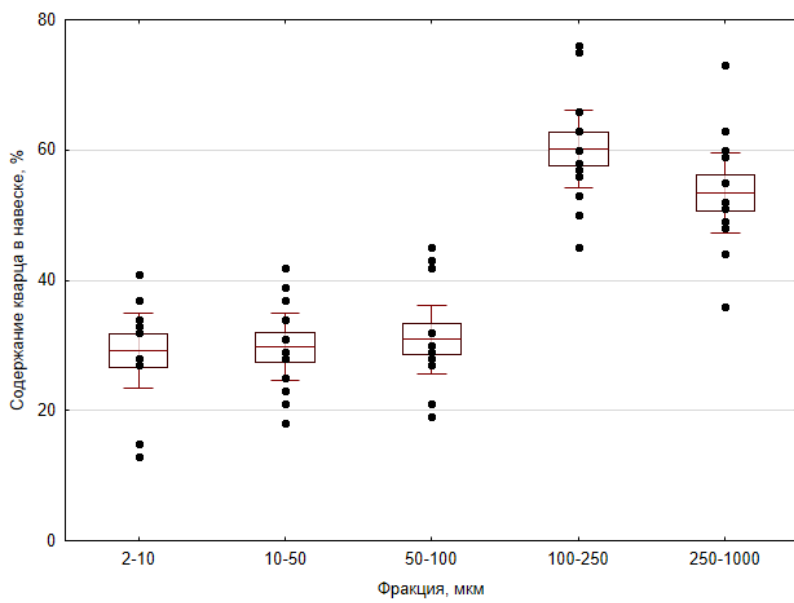
(б)



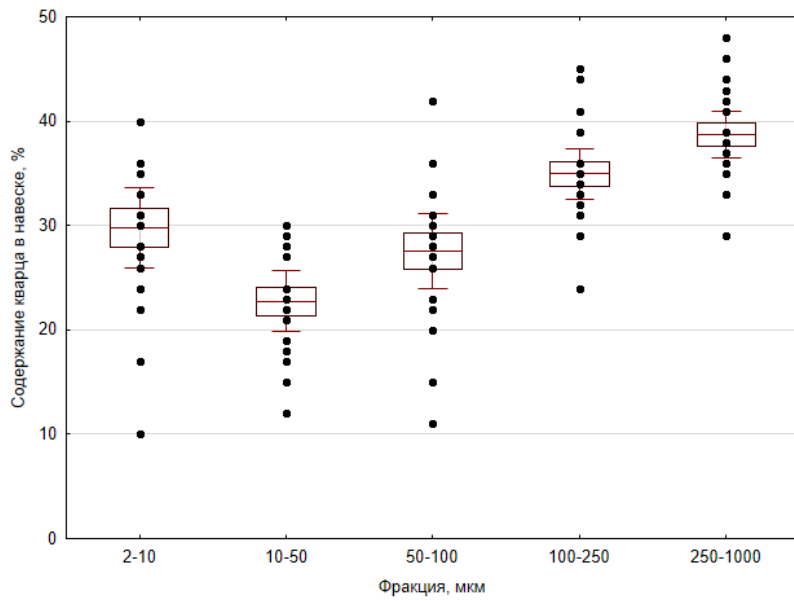
(B)



(г)



(д)



(е)

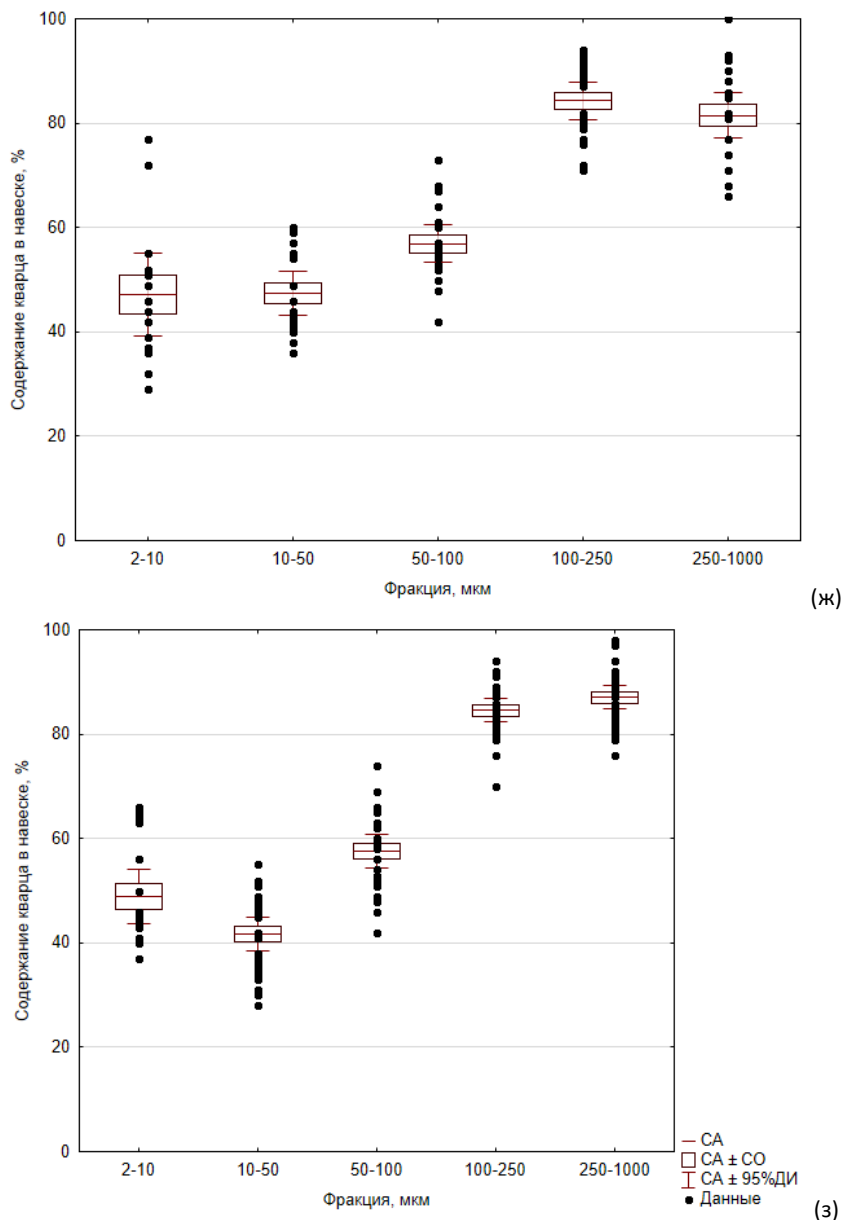


Рис. 5. Содержание кварца в гранулометрических фракциях в осадке в городах: (а) Екатеринбург, (б) Новосибирск, (в) Владивосток, (г) Тюмень, (д) Челябинск, (е) Мурманск, (ж) Ростов-на-Дону, (з) Нижний Новгород. СО – стандартная ошибка

Разделение проб по предлагаемому методу позволяет получить специфические паттерны содержания кварца в гранулометрических навесках осадка. В исследуемых городах заметно увеличение кварца во фракциях 100–250 и 250–1000 мкм по сравнению с фракцией 2–10 мкм. При этом могут выделяться города с более высоким содержанием минерала. Наибольшие концентрации наблюдаются в Нижнем Новгороде и Ростове-на-Дону.

4. Обсуждение

4.1. Формирование осадка

Во всех городах на жилых территориях присутствуют современные осадки. Состав осадков отражает геохимические характеристики территории жилого квартала от момента формирования ландшафта до момента отбора образца [63–65, 67]. При формировании осадка на внутривортовой территории реализуется бассейновый принцип. Двор представляет собой локальный седиментационный бассейн; твердые осадки собираются в депо – понижениях микрорельефа. Жилая зона города может

быть представлена в виде множества локальных бассейнов, каждый из которых представляет собой жилой квартал, в каждом из которых происходят современные седиментационные процессы. Множество сборных проб осадка с жилой территории города характеризует ее экологическое и геохимическое состояние. Жилая территория города состоит из районов (которые состоят в свою очередь из микрорайонов) разных лет застройки, разделенных между собой лесопарковыми и парковыми зонами, промышленными территориями, реками, транспортными магистралями (железными и автодорогами) и другими объектами. Рассматривая город в целом, сеть отбора проб осадка имеет нерегулярный вид, в то время как в отдельном жилом районе реализуется регулярная сеть отбора. При этом в каждом жилом районе отбирается 3–8 проб [69]. Сеть из 40 проб на территории города может быть охарактеризована как оптимальная для проведения геохимического исследования [70]. При проведении исследований по двум схемам вещественный состав выбранной случайным образом группы равномерно распределенных по территории города проб может характеризовать вещественный состав проб на территории города в целом.

Селитебные территории городов, располагающихся в разных природных климатических географических, геологических и экономических зонах России, были обследованы по единой методике. Жилые территории городов с многоквартирными домами имеют одинаковую планировочную структуру. Интенсивная урбанизация и развитие территорий в обследованных городах пришлись на вторую половину XX в.

Пробы проходили единую процедуру подготовки к гранулометрическому анализу: использование пестика с резиновым наконечником исключало разрушение минеральных, органических и техногенных компонентов осадка; просеивание пробы через сито с размером ячеек 3 мм исключало из анализа крупные частицы: обломки горных пород, крупные обломки твердых коммунальных отходов, растительные фрагменты (корни, листья, ветки), металлические фрагменты и др. Выбор представительной навески массой 100–300 г обусловлен необходимостью получить материал для определения в нем минерального и элементного состава [39]. Процедура фракционного разделения современных осадков аналогична комбинации отмучивания и просеивания, применяемой другими исследователями для городских почв [71].

4.2. Гранулометрический состав и содержание Al, Pb и кварца в гранулометрических фракциях осадка

Материал осадка, отобранный по единой методике в городах в разных природных географических, климатических, геологических, промышленных зонах, раздели на гранулометрические фракции. Каждая полученная гранулометрическая фракция характеризуется своими уникальными статистическими параметрами (средним, медианным содержанием, дисперсией, размером и др.). По средним содержаниям гранулометрической фракции в осадке может быть построен уникальный паттерн гранулометрического состава осадка в городе. Полученные различные паттерны распределения доли гранулометрической фракции в осадке в общем соответствуют паттернам, получаемым в других работах для объектов городской среды, схожих по генезису рассматриваемым осадкам: дорожная пыль и городские почвы [66, 71]. Содержание гранулометрических фракций в осадке может как отличаться, так и быть равным. Достаточно широкий разброс полученных значений доли гранулометрической фракции осадка (табл. 4 и рис. 2), высокая вариативность полученных результатов гранулометрического анализа ($KV > 20\%$) на территории города может быть обусловлена:

- различием подходов к благоустройству и содержанию жилых кварталов на территории города (в одном районе уборка лучше, в другом хуже),
- разницей проб в жилых кварталах разного возраста постройки (старые ландшафты больше подвержены эрозии и выветриванию),

- количеством автомобилей в жилых районах (автомобили при парковке на газонах разрушают их, а в каких-то районах парковка на газоне запрещена),
- различием состава поверхностей жилых территорий, где происходит осадкообразование (в одних дворах преобладают газоны, в других – асфальт и тротуарная плитка).

Поскольку осадок с селитебной территории представляет собой комплексную среду, смесь – из частиц органического и минерального происхождения, то при отмучивании более легкие частицы органического происхождения, но крупного размера могут попасть в более мелкие фракции (< 50 мкм). В общем неоднородность гранулометрического состава осадка связана с особенностями комплекса процессов современного седиментогенеза на городской территории, учет которых труден и зачастую невозможен. Учет таких факторов воздействия на ландшафты требует проведения отдельных исследований. Полученные размеры выборок недостаточны для подтверждения статистической значимости различий между количеством (долями) отдельных крупных (> 100 мкм) и мелких (2–100 мкм) гранулометрических фракций осадка во всех обследованных городах, хотя на отдельных диаграммах (рис. 3) прослеживаются тенденции разделения отложений по гранулометрическому составу. Принимая во внимание число отобранных и фракционированных проб осадка в городах, полученные результаты в своем роде уникальны в мировой практике геохимических исследований городских территорий.

Полученные распределения по гранулометрическому составу осадка содержания Al, Pb и кварца также характеризуются статистическими параметрами (средним, медианным содержанием, дисперсией, диапазоном и др.). При этом для большинства гранулометрических фракций характерно, что среднее арифметическое, среднее геометрическое и медианное содержание Al принимают близкие значения. Такая же тенденция наблюдается для содержания кварца. Для свинца распределение концентрации в гранулометрической фракции имеет высокую вариативность. Попарное сравнение выборок значений содержания Al, Pb и кварца в гранулометрических фракциях в осадке, согласно критерию Манна – Уитни, показало как наличие статистически значимых различий между ними, так и их отсутствие для отдельных городов. При этом удалось достичь физического разделения материала осадка на гранулометрические навески разного зернового состава. Охарактеризовать состав навесок можно путем оценки статистических параметров для гранулометрической фракции. Использование критерия Манна – Уитни обусловлено малым размером полученных выборок. В данном случае это дополнительный инструмент анализа, хотя на таких выборках мы можем предполагать вид распределения содержания Al, Pb и кварца в той или иной гранулометрической фракции.

Получены следующие паттерны для элементов в осадке, аналогичные литературным данным [68, 71–74]:

- преобладание содержания Al и Pb в мелких фракциях;
- преобладание кварца в песчаных фракциях.

4.3. Источники неопределенности получаемых результатов

Предложенная комбинация отмучивания и просеивания позволяет разделить образец осадка на ряд размерных фракций, использует взаимодополняющие подходы, направленные на разделение материала разных размеров.

Источники неопределенности получаемых результатов:

- достижение прозрачности воды в стаканах при проведении отмучивания (шаги 2 и 3) зависит от восприятия оператора и освещенности помещения лаборатории. Пробы различного вещественного состава имеют различную прозрачность. Преобладание глинистых минералов и легкорастворимых веществ (противогололедные материалы и химикаты для уборки дворов, уличные шампуни и

др.) в пробе требует большего количества дистиллированной воды для отмучивания, прозрачность воды трудно достижима;

– количество органического вещества в пробе. Органическое вещество имеет меньшую плотность по сравнению с минеральным, поэтому органические частицы (остатки растений, листьев, хвоя, панцири насекомых и др.) крупного размера легко всплывают на поверхность вместе с мелкими фракциями осадка;

– случайные ошибки оператора при проведении отмучивания, в том числе сливание суспензии большего объема (с нужной гранулометрической фракцией могли быть слиты частицы крупного размера) и неточное выдерживание времени осаждения частиц в стаканах (мог быть слит меньший объем суспензии);

– при фильтровании часть материала мелких фракций могла проходить через участки замятого фильтра на воронках Бюхнера в фильтрат. К тому же у самого фильтра есть погрешность фильтрации (размер пор варьируется при некотором среднем заявленном номинальном значении);

– условия влажности помещения лаборатории, в котором происходила сушка фильтров, могли повлиять на результат взвешивания мелких фракций с фильтром;

– пористый материал бумажных фильтров накапливает влагу и становится тяжелее;

– лабораторные сита имеют класс точности и погрешность размера ячеек;

– работа оператора пестиком с резиновым наконечником при истирании крупных агрегатов на металлических ситах могла иметь разные приложенные усилия (в конечном счете сита выходили из строя), при этом через ячейки сит могли проходить более крупные частицы (потенциально происходит смешивание разных зерновых фракций);

– погрешность взвешивания аналитических весов;

– условия проведения процедуры отмучивания мелких фракций: допущение сферической формы частиц; нормальные условия в лаборатории; принятие вязкости дистиллированной воды при нормальных условиях. При этом работы по отмучиванию проводились в теплый и холодный сезоны, температура в помещении лаборатории могла варьироваться. Частицы не имели сферической формы, плотность частиц различалась в зависимости от их происхождения (минеральное вещество, техногенные включения, органические частицы). Условия проведения отмучивания идеализированы.

5. Выводы

Предложенный подход позволил уверенно разделить на размерные фракции осадок с жилых территорий городов. Подход основан на комбинации методов отмучивания мелких фракций и мокрого просеивания крупных. Универсальность использования подхода продемонстрирована для городов, располагающихся в разных природных климатических, географических и геологических зонах на территориях России, различающихся экономической специализацией. Полученные результаты вещественного состава гранулометрических фракций позволяют получить специфические паттерны распределения поллютантов и других веществ в объектах окружающей среды на городских территориях и в значительной степени дополняют представления о закономерностях миграции и накопления вещества в городских ландшафтах. Подход был валидирован и верифицирован путем анализа статистических параметров содержания типичных веществ природного и антропогенного происхождения на городских территориях (Al, Pb и кварца). Полученные закономерности распределения вещественного состава осадков по гранулометрическим фракциям сопоставимы с результатами других исследований.

6. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-17-20036) и Правительства Свердловской области (проект № 24-17-20036).

7. Список литературы

1. Уровни и факторы накопления металлов и металлоидов в придорожных почвах, дорожной пыли и их фракции PM10 в Западном округе Москвы / Д. В. Власов, О. В. Кукушкина, Н. Е. Кошелева, Н. С. Касимов // Почвоведение. – 2022. – № 5. – С. 538–555. – DOI 10.31857/S0032180X22050112. – EDN ISCVPM.
2. Granulometric distribution of metals in road-deposited sediments by using different sieving methods / L. Gelhardt, B. Kuch, U. Dittmer, A. Welker // Environmental Advances. – 2021. – Vol. 5. – P. 100094. – DOI 10.1016/j.envadv.2021.100094. – EDN YOOYQJ.
3. *Gunawardana, C.* Role of particle size and composition in metal adsorption by solids deposited on urban road surfaces / C. Gunawardana, P. Egodawatta, A. Goonetilleke // Environ. Pollut. – 2014. – Vol. 184. – P. 44–53. – DOI 10.1016/j.envpol.2013.08.010.
4. *Kettler, T. A.* Simplified Method for Soil Particle-Size Determination to Accompany Soil-Quality Analyses / T. A. Kettler, J. W. Doran, T. L. Gilbert // Soil Science Society of America Journal. – 2001. – Vol. 65. – P. 849–852. – DOI 10.2136/sssaj2001.653849x.
5. *Cambardella, C. A.* Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence / C. A. Cambardella, E. T. Elliott // Soil Science Society of America Journal. – 1992. – Vol. 56. – P. 777–783. – DOI 10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x.
6. *Świercz, A.* Accumulation of heavy metals in the urban soils of the city of Skarżysko-Kamienna (Poland) with regard to land use / A. Świercz, E. Zajecka // Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences. – 2018. – Vol. 13. – No 1. – P. 249–266. – DOI 10.26471/cjees/2018/013/022.
7. *Wu, J.* Urban Ecology and Sustainability: The State-of-the-Science and Future Directions / J. Wu // Landscape and Urban Planning. – 2014. – Vol. 125. – P. 209–221. – DOI 10.1016/j.landurbplan.2014.01.018.
8. Введение почв и почвоподобных образований городских территорий в классификацию почв России / Т. В. Прокофьева, М. И. Герасимова, О. С. Безуглова [и др.] // Почвоведение. – 2014. – № 10. – С. 1155–1164. – DOI 10.7868/S0032180X14100104. – EDN SNWNIZ.
9. *Агаркова-Лях, И. В.* Адаптация метода гранулометрического анализа для изучения микропластикового загрязнения отложений прибрежной зоны моря / И. В. Агаркова-Лях, Е. Н. Сибирцова // Принципы экологии. – 2019. – № 3. – С. 155–162. – DOI 10.15393/j1.art.2019.8622.
10. *Guzmán, R.* Granulometric characterization of sediments in the anastomosed system of the Apure river Venezuela / R. Guzmán, M. Bezada, I. Rodríguez-Santalla // Journal of South American Earth Sciences. – 2021. – Vol. 109. – P. 103274. – DOI 10.1016/j.jsames.2021.103274.
11. *Wu, J.* The effect of settlement on wastewater carbon source availability based on respirometric and granulometric analysis / J. Wu, C. He // Chemical Engineering Journal. – 2012. – Vol. 189–190. – P. 250–255. – DOI 10.1016/j.cej.2012.02.066.
12. *Selbig, W. R.* From streets to streams: assessing the toxicity potential of urban sediment by particle size / W. R. Selbig, R. Bannerman, S. R. Corsi // Sci. Total Environ. – 2013. – Vol. 444. – P. 381–391. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2012.11.094.
13. Гранулометрический анализ атмосферных взвесей экологически благополучного и неблагополучного районов Владивостока / В. И. Янькова, Т. А. Гвозденко, К. С. Голохваст [и др.] // Здоровье. Медицинская экология. Наука. – 2014. – № 2 (56). – С. 62–66. – EDN SIELJT.
14. *Vu, T. V.* Review: particle number size distributions from seven major sources and implications for source apportionment studies / T. V. Vu, J. M. Delgado-Saborit, R. M. Harrison // Atmos. Environ. – 2015. – Vol. 122. – P. 114–132. – DOI 10.1016/j.atmosenv.2015.09.027.

15. Heavy metal atmospheric deposition study in Moscow region, Russia / K. Vergel, I. Zinicovskaia, N. Yushin, M. V. Frontasyeva // Bull. Environ. Contam. Toxicol. – 2019. – Vol. 103. – P. 435–440. – DOI 10.1007/s00128-019-02672-4.
16. Partitioning and solubilities of metals and metalloids in spring rains in Moscow megacity / D. Vlasov, N. Kasimov, I. Eremina [et al.] // Atmospheric Pollution Research. – 2021. – Vol. 12(1). – P. 255–271. – DOI 10.1016/j.apr.2020.09.012.
17. Временные вариации состава атмосферного аэрозоля в Москве весной 2020 года / Д. П. Губанова, А. А. Виноградова, М. А. Иорданский, А. И. Скороход // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 57. – № 3. – С. 334–348. – DOI 10.31857/S0002351521030056. – EDN ZQJRLH.
18. Гранулометрический состав осевшего аэрозольного вещества и соотношение фенольных соединений в хвое разного возраста / М. П. Тентюков, В. И. Михайлов, Д. А. Тимушев [и др.] // Оптика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 34, № 02. – С. 122–128. – DOI 10.15372/AOO20210207.
19. Granulometric analysis and heavy mineral studies of the sandstone facies exposed near Igbile, southwestern Nigeria / P. R. Ikhane, A. I. Akintola, S. I. Bankole [et al.] // International Research Journal of Geology and Mining (IRJGM). – 2013. – Vol. 3(4). – P. 158–178.
20. Dissolved and suspended forms of metals and metalloids in snow cover of megacity: Partitioning and deposition rates in Western Moscow / D. Vlasov, J. Vasil'chuk, N. Kosheleva, N. Kasimov // Atmosphere. – 2020. – Vol. 11. – 907. – DOI 10.3390/atmos11090907.
21. Многолетний мониторинг снежного покрова в условиях природных и урбанизированных ландшафтов Москвы и Подмоскovie / Л. Г. Богатырев, Н. И. Жилин, В. П. Самсонова [и др.] // Вестник Московского университета. – Серия 5. География. – 2018. – № 2. – С. 85–96.
22. *Rienda, I. C.* Road dust resuspension: A review / I. C. Rienda, C. A. Alves // Atmos. Res. – 2021. – Vol. 261. – 105740. – DOI 10.1016/j.atmosres.2021.105740.
23. Методика выделения гранулометрических фракций почв и пыли методом центрифугирования / Л. А. Безбердая, П. Р. Енчилик, Н. Е. Кошелева [и др.] // Инженерная экология: Доклады Международного симпозиума РНТОРЭС им. А. С. Попова, Москва, 2023 г. – Москва, 2023. – С. 178–182. – EDN NWOBMJ.
24. Particulate Matter deposition on Quercus ilex leaves in an industrial city of central Italy / G. Sgrigna, A. Sæbø, S. Gawronski [et al.] // Environ. Pollut. – 2015. – Vol. 197. – P. 187–194. – DOI 10.1016/j.envpol.2014.11.030.
25. *Васильев, С. Б.* Теоретические и практические аспекты рекультивации техногенных ландшафтов / С. Б. Васильев, А. Р. Родин // Вестник Московского государственного университета леса. – Лесной вестник. – 2016. – Т. 20, № 1. – С. 118–122. – EDN VNUGYZ.
26. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015 / A. J. Cohen, M. Brauer, R. Burnett [et al.] // Lancet. – 2017. – Vol. 389(10082). – P. 1907–1918. – DOI 10.1016/S0140-6736(17)30505-6.
27. The Lancet Commission on pollution and health / P. J. Landrigan, R. Fuller, N. J. R. Acosta [et al.] // Lancet. – 2018. – Vol. 391(10119). – P. 462–512. – DOI 10.1016/S0140-6736(17)32345-0. – Erratum in: Lancet. 2018. – 391(10119). – P. 430. – DOI 10.1016/S0140-6736(17)32817-9.
28. *Просвирякова, И. А.* Гигиеническая оценка содержания твердых частиц PM10 и PM2.5 в атмосферном воздухе и риска для здоровья жителей в зоне влияния выбросов стационарных источников промышленных предприятий / И. А. Просвирякова, Л. М. Шевчук // Анализ риска здоровью. – 2018. – № 2. – С. 14–22. – DOI 10.21668/health.risk/2018.2.02.
29. *Катола, В. М.* Пыль: источники образования, ее общая характеристика, пылевые заболевания (краткий обзор) / В. М. Катола, В. Е. Комогорцева // Бюллетень физиологии и патологии дыхания. – 2018. – № 67. – С. 111–116. – DOI 10.12737/article_5a9f2eaf492cf9.67393066.
30. *Романовская, А. Ю.* Аэрозольная пыль почвенного происхождения в атмосфере: источники, количество, свойства (обзор) / А. Ю. Романовская, И. Ю. Савин // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. – 2021. – № 109. – С. 36–95. – DOI 10.19047/0136-1694-2021-109-36-95.

31. Экоотоксичность городской пыли: существующие практики и перспективы применения биотестирования (обзор) / О. В. Николаева, С. А. Кулачкова, А. А. Астайкина [и др.] // Вестник Московского университета. – Серия 17. Почвоведение. – 2022. – № 3. – С. 3–19. – EDN TVRANF.
32. Адушкин, В. В. Мелкодисперсные частицы в природных и техногенных геосистемах / В. В. Адушкин, С. И. Попель // Физика Земли. – 2012. – № 3. – С. 81–92. – EDN OWENXN.
33. Sotnezov, A. Morphological Composition of Solid Municipal Waste / A. Sotnezov, V. Zaytsev, N. P. Tarasova // Safety in Technosphere. – 2015. – №. 4. – P. 10–15. – DOI 10.12737/14429.
34. Алхимова, О. Д. Отходы как фактор деградации окружающей среды / О. Д. Алхимова, С. В. Миськееич // Изучение, сохранение и восстановление естественных ландшафтов. Материалы IV Международной научно-практической конференции «Изучение, сохранение и восстановление естественных ландшафтов» (Волгоград, 15–19 сентября 2014 года). – Волгоград: ООО «Волгоградское научное издательство», 2014. – С. 296–301. – EDN VNARML.
35. ISO 14688-1:2017 standard «Geotechnical investigation and testing – Identification and classification of soil – Part 1: Identification and description». Edition 2. International Organization for Standardization (ISO), 2017.
36. Williams, S.J. Surficial sediment character of the Louisiana offshore Continental Shelf region: a GIS Compilation / S. J. Williams, M. A. Arsenault, B. J. Buczkowski [et al.] // U.S. Geological Survey Open-File Report 2006-1195. – 2006. – <http://pubs.usgs.gov/of/2006/1195/index.htm>.
37. От понятия элементарной почвенной частицы к гранулометрическому и микроагрегатному анализам (обзор) / А. В. Юдина, Д. С. Фомин, А. Д. Котельникова, Е. Ю. Милановский // Почвоведение. – 2018. – № 11. – С. 1340–1362. – DOI 10.1134/S0032180X18110096. – EDN PILSPH.
38. Шеин, Е. В. Гранулометрический состав почв: проблемы исследования, интерпретации результатов и классификаций / Е. В. Шеин // Почвоведение. – 2009. – № 3. – С. 309–317. – EDN JWNNST.
39. Вадюнина, А. Ф. Методы исследования физических свойств почв / А. Ф. Вадюнина, З. А. Корчагина. – М. : Агропромиздат, 1986. – 415 с. – EDN DYLNHL.
40. Setume, B. The Basic Principles of Sieve Analysis / B. Setume. – 2014. – https://www.academia.edu/98942379/The_Basic_Principles_of_Sieve_Analysis.
41. Beavers, A. H. Elutriator for Fractionating Silt / A. H. Beavers, R. L. Jones // Soil Science Society of America Journal. – 1966. Vol. 30. – P. 126–126. – <https://doi.org/10.2136/sssaj1966.03615995003000010040x>.
42. Коузов, П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П. А. Коузов; изд-е 3, перераб. – Л. : Химия, 1987. – 264 с.
43. Методические указания по дробному гранулометрическому анализу седиментационным способом (с применением гидравлического седиментатора ГС-1). – Л. : ВНИГРИ, 1989. – 181 с.
44. Comparison of particle-size analyzing laboratory methods / C. Centeri, G. Jakab, S. Szabo [et al.] // Environmental engineering and management journal. – 2015. – Vol. 14. – P. 1125–1135. – DOI 10.30638/eemj.2015.123.
45. Comparison of grain-size analysis methods for sand-dominated fluvial sediments / M. Cheetham, A. Keene, R. Bush [et al.] // Sedimentology. – 2008. – Vol. 55. – P. 1905–1913. – DOI 10.1111/j.1365-3091.2008.00972.x.
46. Faé, G. S. Making soil particle size analysis by laser diffraction compatible with standard soil texture determination methods / G. S. Faé, F. Montes, E. Bazilevskaya [et al.] // Soil Science Society of America Journal. – 2019. – Vol. 83. – 1244–1252. – DOI 10.2136/sssaj2018.10.0385.
47. Шеин, Е. В. Современные методы и приборная база мониторинга окружающей среды: лекции / Е. В. Шеин. – М. : Лекции ученых МГУ, 2016. – 62 с.
48. Comparison of Various Particle Size Distribution Measurement Methods: Role of Particle Shape Descriptors / M. Roostaei, M. Soroush, S. A. Hosseini [et al.] // SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control. – 2020. – DOI 10.2118/199335-MS.
49. Sieve analysis of fine and coarse aggregates. – Texas, USA: TxDOT Tex-200-F. Construction division, 2016. – 10 p. – <https://aandastone.com/wp-content/uploads/2019/04/bit200.pdf>.

50. *Carpenter, F. G.* Methods of sieve analysis with particular reference to Bone Char / F. G. Carpenter, V. R. Deitz // *Journal of Research of the National Bureau of Standards.* – 1950. – Vol. 45. – No 4. – P. 328–336.
51. Sieve Analysis. Taking a close look at quality. Expert guidance on particle size analysis. – RETSCH GmbH Haan. – 2015. <https://www.retsch.com/files/8785/expert-guide-sieving.pdf>.
52. *Román-Sierra, J.* Influence of sieving time on the efficiency and accuracy of grain-size analysis of beach and dune sands / J. Roman-Sierra, J. Muñoz-pérez, M. Navarro-Pons // *Sedimentology.* – 2013. – Vol. 60. – P. 1484–1497. – DOI 10.1111/sed.12040.
53. *Kumara, G. H.* Image analysis techniques on evaluation of particle size distribution of gravel / G. H. Kumara, K. Hayano, K. Ogiwara // *International Journal of Geomate.* – 2012. – Vol. 3. – P. 290–297. – DOI 10.21660/2012.5.1261.
54. *Rancourt, D.* Magnetic granulometry from equilibrium magnetization measurements: Mineral magnetometry of superparamagnetic particles and application to synthetic ferrihydrites / D. Rancourt, F. González-Lucena, P. Thibault // *American Mineralogist.* – 2004. – Vol. 89. – Iss. 7. – P. 987–997. – DOI 10.2138/am-2004-0709.
55. *Wen, B.* Comparative Study of Particle Size Analyses by Sieve-Hydrometer and Laser Diffraction Methods / B. Wen, A. Aydin, N. S. Duzgoren-Aydin // *Geotechnical Testing Journal.* – 2002. – Vol. 25. – Issue 4. – P. 434–442. – DOI 10.1520/GTJ11289J.
56. Comparison of infrared spectroscopy and laser granulometry as alternative methods to estimate soil aggregate stability in Mediterranean badlands / A. Erktan, C. Legout, S. De Danieli [et al.] // *Geoderma.* – 2016. – Vol. 271. – P. 225–233. – DOI 10.1016/j.geoderma.2016.02.025.
57. Shall we abandon sedimentation methods for particle size analysis in soils? / M. Bittelli, M. C. Andrenelli, G. Simonetti [et al.] // *Soil and Tillage Research.* – 2019. – Vol. 185. – P. 36–46. – DOI 10.1016/j.still.2018.08.018.
58. *Li, M.* Comparison of particle size distributions measured using different techniques / M. Li, D. Wilkinson, K. Patchigolla // *Particulate Science and Technology.* – 2005. – Vol. 23(3). – P. 265–284. – DOI 10.1080/02726350590955912.
59. Sieveless particle size distribution analysis of particulate materials through computer vision / C. Igathinathane, L. O. Pordesimo, E. P. Columbus [et al.] // *Computers and Electronics in Agriculture.* – 2009. – Vol. 66(2). – P. 147–158. – DOI 10.1016/j.compag.2009.01.005.
60. Comparison of granulometric methods and sampling strategies used in marine habitat classification and Ecological Status assessment / J. Forde, P. C. Collins, A. Patterson, R. Kennedy // *Marine pollution bulletin.* – 2012. – Vol. 64(5). – P. 1018–1028. – DOI 10.1016/j.marpolbul.2012.01.036.
61. *Shulkin, V. M.* Particle-Size Analysis of Modern Bottom Sediments by the Laser Diffraction and Sieve Methods / V. M. Shulkin, A. Y. Strukov // *Russian Journal of Pacific Geology.* – 2020. – Vol. 14. – P. 378–386. – DOI 10.1134/S1819714020040053.
62. *Taylor, K. G.* Sediments in urban river basins: A review of sediment–contaminant dynamics in an environmental system conditioned by human activities / K. G. Taylor, P. N. Owens // *J. Soils Sediments.* – 2009. – Vol. 9, No 4. – P. 281–303. DOI 10.1007/s11368-009-0103-z.
63. Обоснование экологической геоиндикаторной роли современных поверхностных пылегрязевых отложений городской среды / А. А. Селезнев, И. В. Ярмошенко, А. В. Шевченко, Г. П. Малиновский // *Метеорология и гидрология.* – 2023. – № 5. – С. 107–122. – DOI 10.52002/0130-2906-2023-5-107-122. – EDN TKBTBK.
64. *Seleznev, A. A.* Urban geochemical changes and pollution with potentially harmful elements in seven Russian cities / A. A. Seleznev, I. V. Yarmoshenko, G. P. Malinovsky // *Scientific Reports.* – 2020. – Vol. 10. – P. 1668. – DOI 10.1038/s41598-020-58434-4.
65. *Seleznev, A. A.* ¹³⁷Cs in puddle sediments as timescale tracer in urban environment / A. A. Seleznev, I. V. Yarmoshenko, A. P. Sergeev // *Journal of Environmental Radioactivity.* – 2015. – Vol. 142. – P. 9–13. DOI 10.1016/j.jenvrad.2015.01.001.
66. *Breault, R. F.* Residential street-dirt accumulation rates and chemical composition, and removal efficiencies by mechanical- and vacuum-type sweepers. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5184 / R. F. Breault, K. P. Smith, J. R. Sorenson. – New Bedford, Massachusetts, 2003–04, 2005. – 27 p.
67. landscape study of sediment formation and transport in the urban environment / I. Yarmoshenko, G. Malinovsky, E. Baglaeva, A. Seleznev // *Atmosphere.* – 2020. – Vol. 11. – No 12. – P. 1320. – DOI 10.3390/atmos11121320.

68. Sparks, D. L. Environmental soil chemistry. Third Edition / D. L. Sparks, B. Singh, M. G. Siebecker. – Elsevier, 2022. 466 p. – DOI 10.1016/C2022-0-03090-7.
69. Seleznev, A. A. Study of urban puddle sediments for understanding heavy metal pollution in an urban environment / A. A. Seleznev, I. V. Yarmoshenko // Environmental Technology & Innovation. – 2014. – Vol. 1–2. – P. 1–7. – DOI 10.1016/j.eti.2014.08.001.
70. Gy, P. Part IV: 50 years of sampling – a personal history / P. Gy // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. – 2004. – Vol. 74(1). – P. 49–60. – DOI 10.1016/j.chemolab.2004.05.014.
71. Yutong, Z. Distribution, bioavailability, and leachability of heavy metals in soil particle size fractions of urban soils (northeastern China) / Z. Yutong, X. Qing, L. Shenggao // Environ Sci Pollut Res. – 2016. – 23(14). – P. 14600–14607. – DOI 10.1007/s11356-016-6652-y.
72. Шванов, В. Н. Песчаные породы и методы их изучения: (распространение, структуры, текстуры) / В. Н. Шванов. – Ленинград : Недра, 1969. – 248 с.
73. Herngren, L. Analysis of heavy metals in road deposited sediments / L. Herngren, A. Goonetilleke, G. A. Ayoko // Anal. Chim. Acta. – 2006. – Vol. 571(2). – P. 270–278. – DOI 10.1016/j.aca.2006.04.064.
74. Pollutant transport analysis and source apportionment of the entire non-point source pollution process in separate sewer systems / Y. Ma, S. Hao, H. Zhao [et al.] // Chemosphere. – 2018. – Vol. 211. – P. 557–565. – DOI 10.1016/j.chemosphere.2018.07.184.

Сведения об авторах:

Селезнев Андриан Анатольевич, к. г.-м. н., старший научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 20. Эл. почта: sandrian@rambler.ru.

Душевина Елизавета Сергеевна, инженер Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

AN APPROACH FOR DETERMINING THE PARTICLE SIZE COMPOSITION OF CONTEMPORARY SURFACE-DEPOSITED SEDIMENTS OF AN URBAN ENVIRONMENT

A. A. Seleznev¹, E.S. Dushevina^{1,2}

¹ *Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia*

² *Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia*

The aim of the study was to develop an approach to the particle size analysis of contemporary surface sediments of the urban environment. The following tasks were undertaken:

- sampling of the sediment in urban areas located in different natural climatic, geographical, and geological zones and differing in industrial specialisation;*
- separation of samples into size fractions by sequentially washing out fine dust fractions 2–10 and 10–50 μm and wet sieving of fine and coarse sand fractions 50–100, 100–250, 250–1000 and $> 1000 \mu\text{m}$;*
- the determination of Al and Pb concentrations in the obtained granulometric fractions 2-10, 10-50, 50-100, 100-250 and 250-1000 μm using inductively coupled plasma mass spectrometry and the quartz content using X-ray diffraction analysis;*
- validation of the obtained data on the granulometric composition of sediment samples by analysing the statistical parameters of Al, Pb and quartz content in the samples.*

A total of 157 sediment samples were collected in residential areas in eight Russian cities: Vladivostok, Yekaterinburg, Murmansk, Nizhny Novgorod, Novosibirsk, Rostov-on-Don, Tyumen, and Chelyabinsk. The samples were divided into six granulometric fractions. The granulometric composition of sediment samples in cities and the distribution of Al, Pb, and quartz content by granulometric fractions were obtained. Various specific patterns of distribution of Al, Pb and quartz in granulometric fractions in cities were obtained. The proposed approach made it possible to reliably divide sediments in residential areas in cities into size fractions. The content of Al, Pb and quartz in samples can be characterised by evaluating the statistical parameters for the granulometric fraction. The obtained regularities in the distribution of the material composition of sediments by granulometric fractions are comparable with the results of other studies.

Key words: urban environment; contemporary surface-deposited sediments; particle-size composition; decantation; sieving; metals; minerals.

References

1. Levels and Factors of the Accumulation of Metals and Metalloids in Roadside Soils, Road Dust and Their PM10 Fraction in the Western Okrug of Moscow / D. V. Vlasov, O. V. Kukushkina, N. E. Kosheleva, N. S. Kasimov // *Soil Sciences*. – 2022. – No 5. – P. 538–555. – DOI 10.31857/S0032180X22050112. – EDN ISCVPM. (In Russian).
2. Granulometric distribution of metals in road-deposited sediments by using different sieving methods / L. Gelhardt, B. Kuch, U. Dittmer, A. Welker // *Environmental Advances*. – 2021. – Vol. 5. – P. 100094. – DOI 10.1016/j.envadv.2021.100094. – EDN YOOYQJ.
3. *Gunawardana, C.* Role of particle size and composition in metal adsorption by solids deposited on urban road surfaces / C. Gunawardana, P. Egodawatta, A. Goonetilleke // *Environ. Pollut.* – 2014. – Vol. 184. – P. 44–53. – DOI 10.1016/j.envpol.2013.08.010.
4. *Kettler, T. A.* Simplified Method for Soil Particle-Size Determination to Accompany Soil-Quality Analyses / T. A. Kettler, J. W. Doran, T. L. Gilbert // *Soil Science Society of America Journal*. – 2001. – Vol. 65. – P. 849–852. – DOI 10.2136/sssaj2001.653849x.
5. *Cambardella, C. A.* Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence / C. A. Cambardella, E. T. Elliott // *Soil Science Society of America Journal*. – 1992. – Vol. 56. – P. 777–783. – DOI 10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x.

6. Świercz, A. Accumulation of heavy metals in the urban soils of the city of Skarzysko-Kamienna (Poland) with regard to land use / A Świercz, E. Zajecka // Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences. – 2018. – Vol. 13. – No 1. – P. 249–266. – DOI 10.26471/cjees/2018/013/022.
7. Wu, J. Urban Ecology and Sustainability: The State-of-the-Science and Future Directions / J. Wu // Landscape and Urban Planning. – 2014. – No 125. – P. 209–221. – DOI 10.1016/j.landurbplan.2014.01.018.
8. Integration of soils and pedosimilar formations of urban areas into the classification of soils in Russia / T. V. Prokofieva, M. I. Gerasimova, O. S. Bezuglova [et al.] // Soil Science. – 2014. – No 10. – P. 1155–1164. – DOI 10.7868/S0032180X14100104. – EDN SNWNIZ. (In Russian)
9. Agarkova-Lyakh, I. V. Adaptation of a method of the granulometric analysis for studying of microplastic pollution of deposits of a coastal zone of the sea / I. V. Agarkova-Lyakh, E. N. Sibirtsova // Principles of the Ecology. – 2019. – No 3. – P. 155–162. – DOI 10.15393/j1.art.2019.8622. (In Russian)
10. Guzmán, R. Granulometric characterization of sediments in the anastomosed system of the Apure river Venezuela / R. Guzmán, M. Bezada, I. Rodríguez-Santalla // Journal of South American Earth Sciences. – 2021. – Vol. 109. – 103274. – DOI 10.1016/j.jsames.2021.103274.
11. Wu, J. The effect of settlement on wastewater carbon source availability based on respirometric and granulometric analysis / J. Wu, C. He // Chemical Engineering Journal. – 2012. – Vol. 189–190. – P. 250–255. – DOI 10.1016/j.cej.2012.02.066.
12. Selbig, W. R. From streets to streams: assessing the toxicity potential of urban sediment by particle size / W. R. Selbig, R. Bannerman, S. R. Corsi // Sci. Total Environ. – 2013. – Vol. 444. – P. 381–391. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2012.11.094.
13. Granulometric analysis of atmospheric particles from environmentally favorable and problematic areas of Vladivostok / V. I. Yankova, T. A. Gvozdenko, K. S. Golokhvast [et al.] // Health. Medical ecology. Science. – 2014. – No 2 (56). – P. 62–66. – EDN SIELJT. (In Russian)
14. Vu, T. V. Review: particle number size distributions from seven major sources and implications for source apportionment studies / T. V. Vu, J. M. Delgado-Saborit, R. M. Harrison // Atmos. Environ. – 2015. – Vol. 122. – P. 114–132. – DOI 10.1016/j.atmosenv.2015.09.027.
15. Heavy metal atmospheric deposition study in Moscow region, Russia / K. Vergel, I. Zinicovscaia, N. Yushin, M. V. Frontasyeva // Bull. Environ. Contam. Toxicol. – 2019. – Vol. 103. – P. 435–440. – DOI 10.1007/s00128-019-02672-4.
16. Partitioning and solubilities of metals and metalloids in spring rains in Moscow megacity / D. Vlasov, N. Kasimov, I. Eremina [et al.] // Atmospheric Pollution Research. – 2021. – Vol. 12(1). – P. 255–271. – DOI 10.1016/j.apr.2020.09.012.
17. Temporal Variations in Composition of Atmospheric Aerosol in Moscow in the Spring of 2020 / Gubanov D. P., Vinogradova A. A., Iordanskii M. A., Skorokhod A. I. // Izvestiya of the Russian Academy of Sciences. Physics of the atmosphere and ocean. – 2021. – Vol. 57. – No 3. – P. 334–348. – DOI 10.31857/S0002351521030056. – EDN ZQJRLH. (In Russian)
18. Granulometric composition of settled aerosol substance and ratio of phenolic compounds in needles of different age / M. P. Tentukov, V. I. Mikhailov, D. A. Timushev [et al.] // Optics of atmosphere and ocean. – 2021. – Vol. 34. – No 02. – P. 122–128. – DOI 10.15372/AOO20210207. (In Russian)
19. Ikhane, P. R. Granulometric analysis and heavy mineral studies of the sandstone facies exposed near Igbile, southwestern Nigeria / P. R. Ikhane, A. I. Akintola, S. I. Bankole [et al.] // International Research Journal of Geology and Mining (IRJGM). – 2013. – Vol. 3(4). – P. 158–178.
20. Dissolved and suspended forms of metals and metalloids in snow cover of megacity: Partitioning and deposition rates in Western Moscow / D. Vlasov, J. Vasil'chuk, N. Kosheleva, N. Kasimov // Atmosphere. – 2020. – Vol. 11. – 907. – DOI 10.3390/atmos11090907.
21. Long-term monitoring of snow cover within natural and urbanized landscapes of the Moscow region / L. G. Bogatyrev, N. I. Zhilin, V. P. [et al.] // Vestnik Moskovskogo universiteta. – Seriya 5, Geografiya. – 2018. – No 2. – P. 85–96. (In Russian)
22. Rienda, I. C. Road dust resuspension: A review / I. C. Rienda, C. A. Alves // Atmos. Res. – 2021. – Vol. 261. – 105740. – DOI 10.1016/j.atmosres.2021.105740.
23. Methodology for the separation of soil and dust particle size fractions by the centrifugation method / L. A. Bezberdaya, P. R. Enchilik, N. E. Kosheleva [et al.] // Engineering Ecology: Proceedings of the International Symposium named after A.S. Popov, Moscow, 2023. – Moscow, 2023. – P. 178–182. – EDN NWOBMJ. (In Russian)

24. Particulate Matter deposition on *Quercus ilex* leaves in an industrial city of central Italy / G. Sgrigna, A. Sæbø, S. Gawronski [et al.] // *Environ. Pollut.* – 2015. – Vol. 197. – P. 187–194. – DOI 10.1016/j.envpol.2014.11.030.
25. *Vasilyev, S. B.* Theoretical and practical aspects of recultivation of technogenic landscapes / S. B. Vasilyev, A. R. Rodin // *Lesnoy Vestnik / Forestry Bulletin.* – 2016. – Vol. 20(1). – P. 118–122. – EDN VNUGYZ. (In Russian)
26. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015 / A. J. Cohen, M. Brauer, R. Burnett [et al.] // *Lancet.* – 2017. – Vol. 389(10082). – P. 1907–1918. – DOI 10.1016/S0140-6736(17)30505-6.
27. The Lancet Commission on pollution and health / P. J. Landrigan, R. Fuller, N. J. R. Acosta [et al.] // *Lancet.* – 2018. – Vol. 391(10119). – P. 462–512. – DOI 10.1016/S0140-6736(17)32345-0. – Erratum in: *Lancet.* 2018. – Vol. 391(10119). – P. 430. – DOI 10.1016/S0140-6736(17)32817-9.
28. *Prosviryakova, I. A.* Hygienic assessment of PM10 and PM2.5 contents in the atmosphere and population health risk in zones influenced by emissions from stationary sources located at industrial enterprises / I. A. Prosviryakova, L. M. Shevchuk // *Health Risk Analysis.* – 2018. – No 2. – P. 14–22. – DOI 10.21668/health.risk/2018.2.02.eng. (In Russian).
29. *Katola, V. M.* Dust: sources of formation, its general characteristics and dust diseases (brief review) / V. M. Katola, V. E. Komogorceva // *Bulletin physiology and pathology of respiration.* – 2018. – No 67. – P. 111–116. – DOI 10.12737/article_5a9f2eaf492cf9.67393066. (In Russian)
30. *Romanovskaya, A. Yu.* Soil dust aerosol in the atmosphere: sources, quantities, properties (overview). / A. Yu. Romanovskaya, I. Yu. Savin // *Dokuchaev Soil Bulletin.* – 2021. – No 109. – P. 36–95. – DOI 10.19047/0136-1694-2021-109-36-95. (In Russian)
31. Ecotoxicity of urban dust: existing practices and perspectives for the bioassay application (review) / O. V. Nikolaeva, S. A. Kulachkova, A. A. Astaikina [et al.] // *Moscow University Soil Studies Bulletin.* – 2022. – No 3. – P. 3–19. – EDN TVRANF. (In Russian)
32. *Adushkin, V. V.* Fine particles in natural and technogenic geosystems / V. V. Adushkin, S. I. Popel // *Physics of the Earth.* – 2012. – No 3. – P. 81–92. – EDN OWENXN. (In Russian)
33. *Sotnezov, A.* Morphological Composition of Solid Municipal Waste / A. Sotnezov, V. Zaytsev, N. P. Tarasova // *Safety in Technosphere.* – 2015. – Vol. 4. – P. 10–15. – DOI 10.12737/14429.
34. *Alkhimova, O. D.* Waste as a factor of environmental degradation / O. D. Alkhimova, S. V. Miskeich // *Study, conservation and restoration of natural landscapes. Proceedings of the IV International Scientific and Technical Conference 'Study, Conservation and Restoration of Natural Landscapes' (Volgograd, 15–19 September 2014).* – Volgograd: Volgograd Scientific Publishing House Ltd., 2014. – P. 296–301. – EDN VNARML. (In Russian)
35. ISO 14688-1:2017 standard «Geotechnical investigation and testing – Identification and classification of soil – Part 1: Identification and description». Edition 2. International Organization for Standardization (ISO), 2017.
36. *Williams, S. J.* Surficial sediment character of the Louisiana offshore Continental Shelf region: a GIS Compilation / S. J. Williams, M. A. Arsenault, B. J. Buczkowski [et al.] // *U.S. Geological Survey Open-File Report 2006-1195.* – 2006. – <http://pubs.usgs.gov/of/2006/1195/index.htm>.
37. From the Notion of Elementary Soil Particle to the Particle-Size and Microaggregate-Size Distribution Analyses: A Review / A. V. Yudina, D. S. Fomin, A. D. Kotelnikova, E. Yu. Milanovskii // *Eurasian Soil Science.* – 2018. – Vol 51(11). – P. 1240–1262. – DOI 10.1134/S0032180X18110096. – EDN PILSPH. (In Russian)
38. *Shein, E. V.* Granulometric composition of soils: issues in study, interpretation of results, and classification / E. V. Shein // *Soil Science.* – 2009. – No 3. – P. 309–317. – EDN JWNNST. (In Russian)
39. *Vadyunina, A. F.* Methods to study the physical properties of soils / A. F. Vadyunina, Z. A. Korchagina. – Moscow: Agropromizdat, 1986. – 415 p. – EDN DYLLHL. (In Russian)
40. *Setume, B.* The Basic Principles of Sieve Analysis / B. Setume. – 2014. – https://www.academia.edu/98942379/The_Basic_Principles_of_Sieve_Analysis.
41. *Beavers, A. H.* Elutriator for Fractionating Silt / A. H. Beavers, R. L. Jones // *Soil Science Society of America Journal.* – 1966. Vol. 30. – P. 126–126. – <https://doi.org/10.2136/sssaj1966.03615995003000010040x>.
42. *Kouzov, P. A.* Fundamentals of analysis of the particle size distribution of industrial dusts and crushed materials / P. A. Kouzov. – 3rd ed., rev. – L.: Chemistry, 1987. – 264 p. (In Russian).
43. Methodological guidelines for fractional granulometric analysis using the sedimentation method (employing the GS-1 hydraulic sedimentator). – L.: VNIGRI, 1989. – 181 p. (In Russian).

44. Comparison of particle-size analyzing laboratory methods / C. Centeri, G. Jakab, S. Szabo [et al.] // *Environmental engineering and management journal*. – 2015. – Vol. 14. – P. 1125–1135. – DOI 10.30638/eemj.2015.123.
45. Comparison of grain-size analysis methods for sand-dominated fluvial sediments / M. Cheetham, A. Keene, R. Bush [et al.] // *Sedimentology*. – 2008. – Vol. 55. – P. 1905–1913. – DOI 10.1111/j.1365-3091.2008.00972.x.
46. Faé, G. S. Making soil particle size analysis by laser diffraction compatible with standard soil texture determination methods / G. S. Faé, F. Montes, E. Bazilevskaya [et al.] // *Soil Science Society of America Journal*. – 2019. – Vol. 83. – P. 1244–1252. – DOI 10.2136/sssaj2018.10.0385.
47. Shein, E. V. Contemporary methods and instrument base for environmental monitoring. Lectures by scientists of Moscow State University / E. V. Shein. – Moscow, Moscow State University, 2016. – 62 p. (In Russian).
48. Comparison of Various Particle Size Distribution Measurement Methods: Role of Particle Shape Descriptors / M. Roostaei, M. Soroush, S. A. Hosseini [et al.] // *SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control*. – 2020. – DOI 10.2118/199335-MS.
49. Sieve analysis of fine and coarse aggregates. – Texas, USA: TxDOT Tex-200-F. Construction division, 2016. – 10 p. – <https://aandastone.com/wp-content/uploads/2019/04/bit200.pdf>.
50. Carpenter, F. G. Methods of sieve analysis with particular reference to Bone Char / F. G. Carpenter, V. R. Deitz // *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. – 1950. – Vol. 45. – No 4. – P. 328–336.
51. Sieve Analysis. Taking a close look at quality. Expert guidance on particle size analysis. – RETSCH GmbH Haan. – 2015. <https://www.retsch.com/files/8785/expert-guide-sieving.pdf>.
52. Román-Sierra, J. Influence of sieving time on the efficiency and accuracy of grain-size analysis of beach and dune sands / J. Roman-Sierra, J. Muñoz-pérez, M. Navarro-Pons // *Sedimentology*. – 2013. – Vol. 60. – P. 1484–1497. – DOI 10.1111/sed.12040.
53. Kumara, G. H. Image analysis techniques on evaluation of particle size distribution of gravel / G. H. Kumara, K. Hayano, K. Ogiwara // *International Journal of Geomate*. – 2012. – Vol. 3. – P. 290–297. – DOI 10.21660/2012.5.1261.
54. Rancourt, D. Magnetic granulometry from equilibrium magnetization measurements: Mineral magnetometry of superparamagnetic particles and application to synthetic ferrihydrites / D. Rancourt, F. González-Lucena, P. Thibault // *American Mineralogist*. – 2004. – Vol. 89. – Iss. 7. – P. 987–997. – DOI 10.2138/am-2004-0709.
55. Wen, B. Comparative Study of Particle Size Analyses by Sieve-Hydrometer and Laser Diffraction Methods / B. Wen, A. Aydin, N. S. Duzgoren-Aydin // *Geotechnical Testing Journal*. – 2002. – Vol. 25. – Issue 4. – P. 434–442. – DOI 10.1520/GTJ11289J.
56. Comparison of infrared spectroscopy and laser granulometry as alternative methods to estimate soil aggregate stability in Mediterranean badlands / A. Erktan, C. Legout, S. De Danieli [et al.] // *Geoderma*. – 2016. – Vol. 271. – P. 225–233. – DOI 10.1016/j.geoderma.2016.02.025.
57. Shall we abandon sedimentation methods for particle size analysis in soils? / M. Bittelli, M. C. Andrenelli, G. Simonetti [et al.] // *Soil and Tillage Research*. – 2019. – Vol. 185. – P. 36–46. – DOI 10.1016/j.still.2018.08.018.
58. Li, M. Comparison of particle size distributions measured using different techniques / M. Li, D. Wilkinson, K. Patchigolla // *Particulate Science and Technology*. – 2005. – Vol. 23(3). – P. 265–284. – DOI 10.1080/02726350590955912.
59. Sieveless particle size distribution analysis of particulate materials through computer vision / C. Igathinathane, L. O. Pordesimo, E. P. Columbus [et al.] // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2009. – Vol. 66(2). – P. 147–158. – DOI 10.1016/j.compag.2009.01.005.
60. Comparison of granulometric methods and sampling strategies used in marine habitat classification and Ecological Status assessment / J. Forde, P. C. Collins, A. Patterson, R. Kennedy // *Marine pollution bulletin*. – 2012. – Vol. 64(5). – P. 1018–1028. – DOI 10.1016/j.marpolbul.2012.01.036.
61. Shulkin, V. M. Particle-Size Analysis of Modern Bottom Sediments by the Laser Diffraction and Sieve Methods / V. M. Shulkin, A. Y. Strukov // *Russian Journal of Pacific Geology*. – 2020. – Vol. 14. – P. 378–386. – DOI 10.1134/S1819714020040053.
62. Taylor, K. G. Sediments in urban river basins: A review of sediment–contaminant dynamics in an environmental system conditioned by human activities / K. G. Taylor, P. N. Owens // *J. Soils Sediments*. – 2009. – Vol. 9. – No 4. – P. 281–303. DOI 10.1007/s11368-009-0103-z.

63. Rationale for the Ecological Geoindicator Role of Contemporary Surface Sediments of Dust and Dirt in Urban Environment / A. A. Seleznev, I. V. Yarmoshenko, A. V. Shevchenko [et al.] // *Russ. Meteorol. Hydrol.* – 2023. – No 5. – P. 107–122. – DOI 10.52002/0130-2906-2023-5-107-122. – EDN TKBTBK. (In Russian)
64. *Seleznev, A. A.* Urban geochemical changes and pollution with potentially harmful elements in seven Russian cities / A. A. Seleznev, I. V. Yarmoshenko, G. P. Malinovsky // *Scientific Reports.* – 2020. – Vol. 10. – P. 1668. – DOI 10.1038/s41598-020-58434-4.
65. *Seleznev, A. A.* ¹³⁷Cs in puddle sediments as timescale tracer in urban environment / A. A. Seleznev, I. V. Yarmoshenko, A. P. Sergeev // *Journal of Environmental Radioactivity.* – 2015. – Vol. 142. – P. 9–13. DOI 10.1016/j.jenvrad.2015.01.001.
66. *Breault, R. F.* Residential street-dirt accumulation rates and chemical composition, and removal efficiencies by mechanical- and vacuum-type sweepers. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5184 / R. F. Breault, K. P. Smith, J. R. Sorenson. – New Bedford, Massachusetts, 2003–04, 2005. – 27 p.
67. landscape study of sediment formation and transport in the urban environment / I. Yarmoshenko, G. Malinovsky, E. Baglaeva, A. Seleznev // *Atmosphere.* – 2020. – Vol. 11. – No 12. – P. 1320. – DOI 10.3390/atmos11121320.
68. *Sparks, D. L.* Environmental soil chemistry. Third Edition / D. L. Sparks, B. Singh, M. G. Siebecker. – Elsevier, 2022. 466 p. – DOI 10.1016/C2022-0-03090-7.
69. *Seleznev, A. A.* Study of urban puddle sediments for understanding heavy metal pollution in an urban environment / A. A. Seleznev, I. V. Yarmoshenko // *Environmental Technology & Innovation.* – 2014. – Vol. 1–2. – P. 1–7. – DOI 10.1016/j.eti.2014.08.001.
70. *Gy, P.* Part IV: 50 years of sampling – a personal history / P. Gy // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems.* – 2004. – Vol. 74(1). – P. 49–60. – DOI 10.1016/j.chemolab.2004.05.014.
71. *Yutong, Z.* Distribution, bioavailability, and leachability of heavy metals in soil particle size fractions of urban soils (northeastern China) / Z. Yutong, X. Qing, L. Shenggao // *Environ Sci Pollut Res.* – 2016. – 23(14). – P. 14600–14607. – DOI 10.1007/s11356-016-6652-y.
72. *Shvanov, V. N.* Sandy rocks and methods of their study: (Distribution, structures, textures) / V. N. Shvanov. – Leningrad: Nedra, 1969. – 248 p. (In Russian)
73. *Herngren, L.* Analysis of heavy metals in road deposited sediments / L. Herngren, A. Goonetilleke, G. A. Ayoko // *Anal. Chim. Acta.* – 2006. – Vol. 571(2). – P. 270–278. – DOI 10.1016/j.aca.2006.04.064.
74. Pollutant transport analysis and source apportionment of the entire non-point source pollution process in separate sewer systems / Y. Ma, S. Hao, H. Zhao [et al.] // *Chemosphere.* – 2018. – Vol. 211. – P. 557–565. – DOI 10.1016/j.chemosphere.2018.07.184.

ПОЛУЧЕНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ НИОБАТА ЛИТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ РАСТВОРОВ НИТРАТА ЛИТИЯ

Д. В. Иваненко

Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева ФИЦ «КНЦ РАН», г. Апатиты, Россия

Исследовано получение монофазных мелкодисперсных порошков ниобата лития (LiNbO_3) жидкофазным методом. Проведено сравнение характеристик мелкодисперсных порошков по удельной поверхности и пористости. Предложены условия образования монофазного порошка LiNbO_3 . Проведена оценка влияния концентрации ионов Li^+ на размеры и пористость частиц порошка.

Ключевые слова: ниобат лития; жидкофазный синтез; удельная поверхность; пористость.

1. Введение

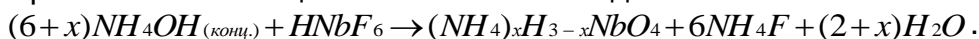
В настоящее время монокристаллические и керамические сегнетоэлектрические материалы на основе ниобата лития (LiNbO_3) привлекают все большее внимание исследователей для приложений в микроэлектронике, квантовой и акустоэлектронике, интегральной и тепловизионной оптике [1]. При этом потребности рынка предъявляют все более высокие требования к качеству характеристик получаемых материалов. Кроме того, наблюдается тенденция отказа от применения дорогостоящих монокристаллических материалов и замена их керамическими материалами [2]. Необходимо отметить, что условия синтеза исходных порошков для создания керамики сильно различаются в зависимости от технических приложений. При этом синтез порошков жидкофазным методом, в отличие от классического твердофазного синтеза, позволяет добиться существенного понижения размеров частиц при условии качественного помола порошков, что важно для увеличения плотности и структурной однородности керамического материала. Существует несколько вариантов синтеза, которые отличаются на этапе фильтрации способом отделения твердой фазы от раствора. При использовании фильтрации из растворов одновалентных анионов кислот получают очень мелкие и однородные частицы порошка [3], в то время как при выпаривании смеси прекурсора и щелочной компоненты происходит объединение частиц в агломераты, связанные компонентами раствора из-за пересыщения щелочными ионами, и появляется перспектива появления фазы Li_3NbO_4 . Появление второй фазы приводит к снижению однородности состава и ухудшению электрофизических свойств керамики, поэтому цель работы – определить условия жидкофазного синтеза, позволяющие получить монофазные мелкодисперсные порошки ниобата лития.

2. Экспериментальная часть

При получении керамики исходные порошки должны удовлетворять определенным требованиям по монофазности, примесному составу и морфологии частиц. Производился синтез порошков LiNbO_3 в диапазоне величины $R=\text{Li}/\text{Nb} = 1,0\text{--}1,3$. Порошки были получены из гидратированного ниобата аммония и раствора нитрата лития. При синтезе порошков исходные компоненты вводились в качестве реагентов, имеющих состав: гидратированный ниобат аммония содержал 40,0–42,0 мас.% Nb_2O_5 , раствор нитрата лития имел концентрацию $[\text{Li}^+] \sim 0,469\text{--}0,470$ г/л. Для получения гидратированного ниобата аммония использовался раствор Nb_2O_5 в

40 % HF (осч).

Осадок ниобата аммония получали путем постепенного добавления фторидного раствора ниобия к концентрированному раствору аммиака (23 %) при перемешивании и pH ~ 10–11. Реакция синтеза имела вид:



Смесь выдерживали при перемешивании в течение 30 мин. Затем проводилась фильтрация твердого осадка ниобата аммония с последующей репульпацией в 3 % NH_4OH для окончательной очистки осадка от F^- -ионов.

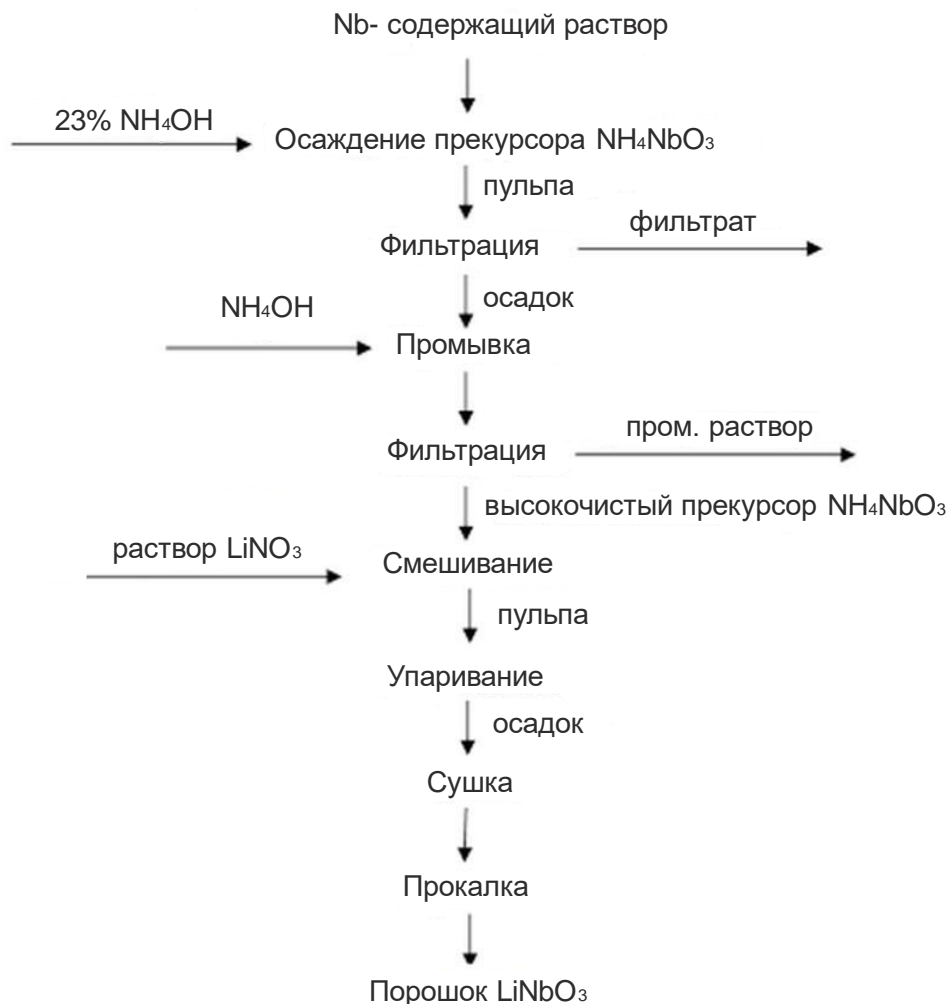


Рис. 1. Технологическая схема получения порошков ниобата лития из Nb-содержащих растворов

Гидратированный ниобат аммония помещали в пластиковый стакан с герметичной крышкой (от высыхания на воздухе) для увеличения времени хранения. К навеске гидратированного ниобата аммония добавляли раствор нитрата лития с разной величиной $R = Li/Nb$ и репульпировали в течение 30 мин. при комнатной температуре. Вводимый раствор $LiNO_3$ выдерживался при перемешивании в течение 2 ч.

Приготовление раствора $LiNO_3$ проводилось путем растворения Li_2CO_3 (ч) в HNO_3 (осч).

Фазовый состав порошков определяли методом рентгенофазового анализа на дифрактометре ДРОН-2 со скоростью движения счетчика 2 град/мин. Идентификация фаз производилась по базам данных JCPDS.

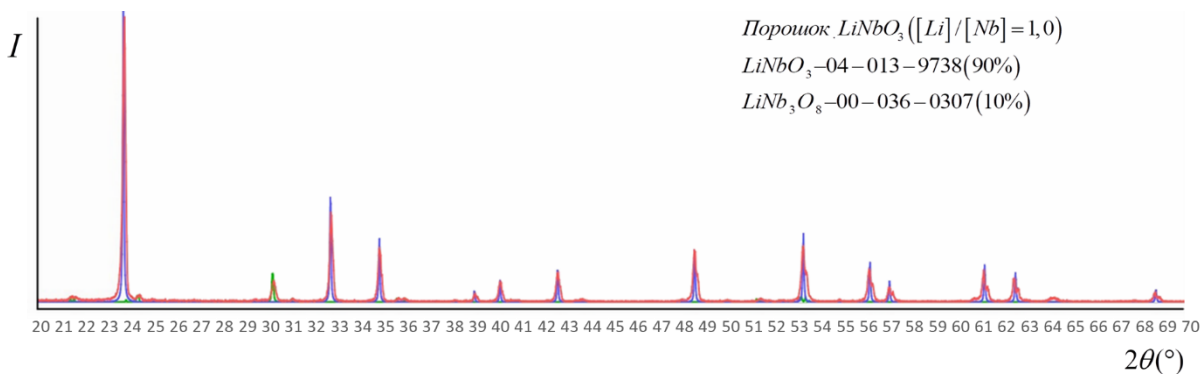
Измерение удельной поверхности порошков производилось методом низкотемпературной адсорбции азота (БЭТ, TriStar 3020 V1.03, FlowSorb II 2300).

3. Результаты

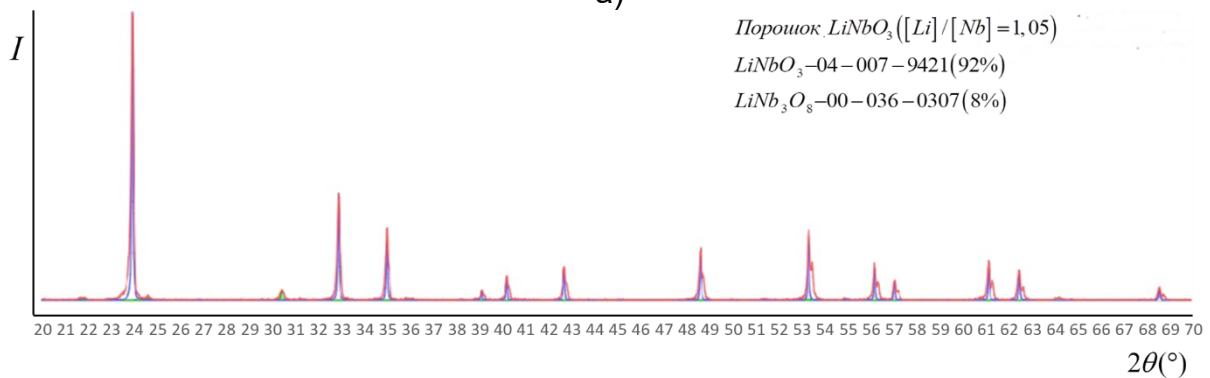
Результаты рентгенофазового анализа показали, что нижняя граница области образования монофазных порошков ниобата лития находится в диапазоне величины $R = \text{Li}/\text{Nb} = 1,0\text{--}1,3$. Сложная форма поверхности полученных порошков характеризовалась наличием конгломератов различного размера, имеющих сложную форму.

Монофазный ниобат лития получался при введении концентрации $\text{Li}^+ \approx 1,3$, что выше стехиометрического $R = \text{Li}/\text{Nb} = 1$, поскольку при выпаривании предположительно происходит процесс окисления прекурсора в растворе и уменьшение его активности для вступления во взаимодействие с катионами Li^+ . Выпаривание происходит при 100°C , в течение 25 ч, что, возможно, является причиной разрушения прекурсора и его слабого взаимодействия с компонентами раствора.

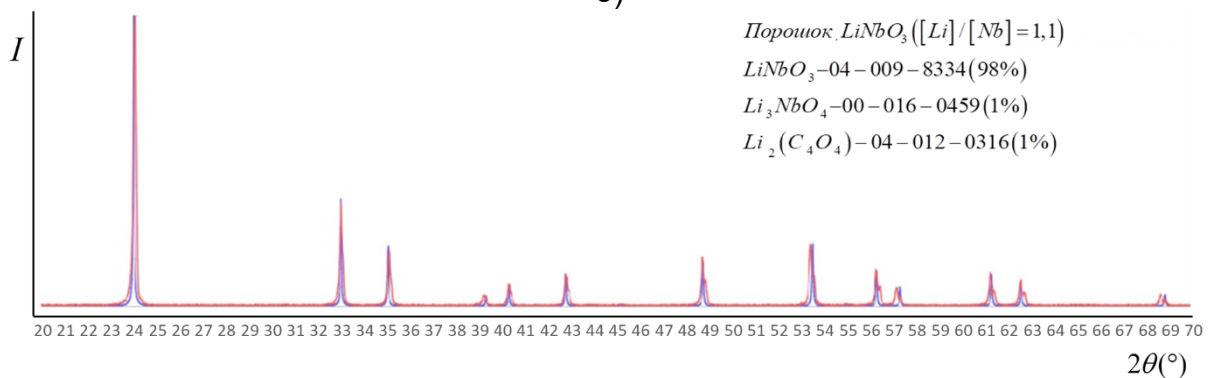
Фазовый состав полученных порошков определяли методами рентгенофазового анализа (рис. 2).



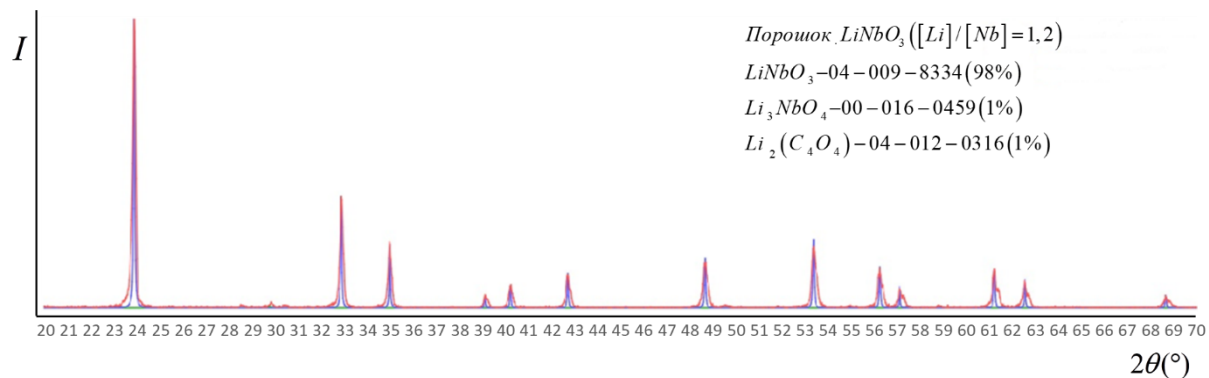
а)



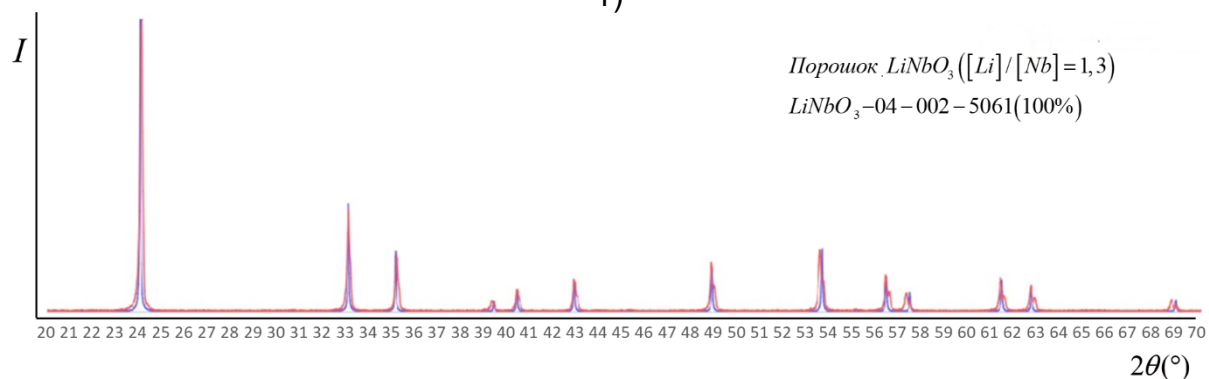
б)



в)



г)



д)

Рис. 2. Рентгенограммы порошков LiNbO_3 , полученных жидкофазным методом, при разных отношениях Li/Nb : а – $\text{Li/Nb} = 1,0$; б – $\text{Li/Nb} = 1,05$; в – $\text{Li/Nb} = 1,1$; г – $\text{Li/Nb} = 1,2$; д – $\text{Li/Nb} = 1,3$

По размерам частиц порошков ниобата лития можно получить представление о скорости образования кристаллов. В табл. 1 приведены характеристики порошков, полученных жидкофазным методом, в сравнении с порошком LiNbO_3 стехиометрического состава ($R=\text{Li/Nb} = 1,0$), полученного методом твердофазного синтез путем прокалывания при $800\text{ }^\circ\text{C}$ с последующей механоактивацией в течение 15 мин.

Таблица 1. Сводная таблица характеристик порошков LiNbO_3

Соотношение $[\text{Li}^+]/[\text{Nb}^{5+}]$, моль/моль	Площадь удельной поверхности, $\text{м}^2/\text{г}$	Общий объем пор, $\text{см}^3/\text{г}$	Средний размер пор, нм
1,0 (механоактивация)	3,8257	0,005308	5,54973
1,05	0,5006	0,000260	2,07386
1,3	0,4924	0,000227	1,84671

Примечание: характеристики образцов с соотношением $R=\text{Li/Nb} = 1,0$ моль/моль; 1,1 моль/моль и 1,2 моль/моль не удалось измерить из-за значительного количества газа, сорбированного в порах.

4. Обсуждение

Порошки LiNbO_3 получали при отношении $\text{Li/Nb} = 1,0\text{--}1,3$. Монофазный состав имели только порошки, полученные при отношении $\text{Li/Nb} = 1,3$ [4], что предположительно связано со слабым взаимодействием частиц гидратированного прекурсора ниобата аммония в слабоконцентрированных растворах LiNO_3 из-за низких концентраций Li^+ в приповерхностном объеме раствора вблизи поверхности зерен гидратированного ниобата аммония.

Избыток лития в растворе приводит к увеличению проводимости буферного раствора и изменяет концентрацию вводимой компоненты лития в твердых осадках за счет влияния на процессы электростатического взаимодействия ионов при потере объема воды, сопровождаемого пересыщением раствора ионами Li^+ с параллельно идущим процессом замещения катионов NH_4^+ на катионы Li^+ в твердой фазе зерен прекурсора.

Из табл. 1 видно значительное отличие удельной поверхности порошков, полученных жидкофазным методом, от полученных механоактивацией (более чем в 7,6 раза). Это свидетельствует о меньшей дисперсности порошков, полученных при выпаривании из-за более высокой агломерации самих частиц компонентами раствора, в то же время аналогичные результаты были получены в расплавах солей [5]. В растворе происходит разрастание структуры из множества частиц, в результате чего возникает сильно развитая поверхность с высокой удельной площадью, которая сорбирует значительные количества CO_2 при дегидратации и дальнейшей термообработке. Повышение концентрации LiNO_3 приводит к повышению введения лития в структуру частиц и, следовательно, понижает дисперсность вследствие уменьшения кристаллической массы состава LiNb_3O_8 (увеличение $R=\text{Li}/\text{Nb}$ приводит к уменьшению дисперсности).

Отличие размеров зерен связано с концентрацией литиевой компоненты и примесной фазы, а также с условиями синтеза (выпаривание из раствора с разной концентрацией лития). Мелкие зерна керамики на основе порошков с низкой крупностью могут проявлять большую активность при спекании керамики и уменьшать время спекания порошков и керамики на их основе [6]. Малые размеры частиц порошков, полученных твердофазным синтезом, делают их более пригодными для высокочастотной керамики, чем порошки, полученные из раствора, так как их дисперсность приводит к увеличению передачи тепла по границам зерен и уменьшению трещинообразования в сравнении с керамиками, полученными жидкофазным методом (сорбированный газ увеличивает диэлектрическую проницаемость керамики). Исходя из анализа результатов, можно предположить, что механоактивация порошков, синтезированных жидкофазным методом, приведет к более мелким размерам частиц порошков, чем при твердофазном синтезе [7].

Увеличение $R = \text{Li}/\text{Nb}$ в растворе приводит к его пересыщению ионами лития и увеличению поверхности частиц порошков в процессе испарения воды. В результате растет размер агломератов частиц, связанных закристаллизовавшимся литийсодержащими компонентами буферного раствора, что, в свою очередь, приводит к низким значениям величин площади удельной поверхности из-за высокой пористости агломератов частиц.

5. Заключение

Проанализированы процессы получения порошков в области концентраций образования стехиометрического ниобата лития жидкофазным методом. Определена граница области образования стехиометрического LiNbO_3 для получения монофазных порошков, соответствующая соотношению $R = \text{Li}/\text{Nb} = 1,3$. Присутствие избытка Li^+ в растворе приводит к увеличению осаждения лития из раствора в твердую фазу, что позволяет получить монофазный состав LiNbO_3 без наличия второй фазы LiNb_3O_8 , препятствующего получению стехиометрического состава.

Исследованы особенности условий синтеза, влияющие на структуру и размеры частиц полученных порошков. Определено влияние метода синтеза на дисперсность порошков, что показывает дальнейшую перспективу получения материалов на основе LiNbO_3 .

6. Список литературы

1. Кузьминов, Ю. С. Ниобат и танталат лития – материалы для нелинейной оптики / Ю. С. Кузьминов. – М.: Наука, 1975.
2. Получение и исследование микрокристаллических порошков ниобата и танталата лития / С. М. Маслбоева, М. Н. Палатников, Л. Г. Арутюнян, Д. В. Иваненко // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2016. – № 8. – С. 239–246. – DOI 10.26456/pcascnn/2016.8.239. – EDN XERSTD.
3. Кобылянская, С. Д. Синтез наноразмерных частиц $(Li, La)\{Ti, Nb, Ta\}O_3$ золь-гель методом / С. Д. Кобылянская, О. Н. Гавриленко, А. Г. Белоус // Журнал неорганической химии. – 2013. – Т. 58, № 6. – С. 725. – DOI 10.7868/S0044457X13060135. – EDN QAXLNL.
4. Керамический ниобат лития: получение, структура и свойства / М. Н. Палатников, О. Б. Щербина, С. М. Маслбоева, В. В. Ефремов // Физика и технология наноматериалов и структур : Сб. науч. ст. 3-й Междунар. науч.-практ. конф.: в 2-х т., Курск, 23–25 мая 2017 года. Т. 1. – Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2017. – С. 291–298. – EDN ZBAQKR.
5. Структурные и морфологические особенности порошков ниобата и танталата лития, синтезированных в хлоридных расплавах / В. А. Хохлов, В. Н. Докутович, Н. А. Вьюгин, К. О. Боброва // Расплавы. – 2018. – № 6. – С. 597–607. – DOI 10.1134/S0235010618060038. – EDN YQIQEH.
6. Зависимость прочностных свойств ниобатной сегнетокерамики от дисперсности пентаоксида ниобия / М. И. Коваленко, Л. А. Резниченко, О. Н. Разумовская, С. О. Крамаров // Письма в Журнал технической физики. – 2000. – Т. 26, № 24. – С. 1–6. – EDN RYPAGH.
7. Синтез ниобата и танталата лития в хлоридных расплавах / Н. А. Вьюгин, К. О. Боброва, В. Н. Докутович, В. А. Хохлов // Четвертый междисциплинарный научный форум с международным участием «новые материалы и перспективные технологии», Москва, 27–30 ноября 2018 года. Т. II. – М. : ООО «Буки Веди», 2018. – С. 329–333. – EDN DXAQPQ.

Сведение об авторе:

Иваненко Дмитрий Владимирович, инженер-исследователь, Академгородок, 26а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, Эл. почта: d.ivanenko@ksc.ru, dviv89@yandex.ru.

PRODUCTION OF FINE-DISPERSED LITHIUM NIOBITE POWDERS USING CONCENTRATED LITHIUM SOLUTIONS

D. I. Ivanenko

*Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Resources
named by I. V. Tananaev, Apatity, Russia*

The production of single-phase fine lithium niobate (LiNbO₃) powders by the liquid-phase method was studied. The specific surface area and porosity characteristics of the fine powders were compared. Conditions for the formation of single-phase LiNbO₃ powder were proposed. The effect of Li⁺ ion concentration on the powder particle size and porosity was assessed.

Key words: lithium niobate; liquid-phase synthesis; specific surface area; porosity.

References

1. *Kuzminov, Yu. S.* Lithium niobate and tantalate – materials for nonlinear optics / Yu. S. Kuzminov. – Moscow: Nauka, 1975. (in Russian).
2. Obtaining and research of microcrystal powders of lithium niobate and tantalate / S. M. Masloboeva, M. N. Palatnikov, L. G. Arutjunjan, D. V. Ivanenko // Physical and chemical aspects of the study of custers, nanostructures and nanomaterials. – 2016. – № 8. – P. 239–246. – DOI 10.26456/pcascnn/2016.8.239. – EDN XERSTD.
3. *Kobylyanskaya, S. D.* Synthesis of nanosized (Li,LA){Ti,NB,TA}O₃ particles using the sol-gel method / S. D. Kobylyanskaya, O. N. Gavrilenko, A. G. Belous // Journal of Inorganic Chemistry. – 2013. – Vol. 58, № 6. – P. 725. – DOI 10.7868/S0044457X13060135. – EDN QAXLNL.
4. Ceramic lithium niobate: obtaining, structure and properties / M. N. Palatnikov, O. B. Shcherbina, S. M. Masloboeva, V. V. Efremov // Physics and technology of nanomaterials and structures: Proc. of the 3rd Int. Sci.-Pract. Conf.: in 2 vols., Kursk, May 23–25, 2017. Vol. 1. – Kursk: University Book, 2017. – P. 291–298. – EDN ZBAQKR.
5. Structural and morphological peculiarities of the lithium niobate and lithium tantalate powders synthesized in chloride melts / V. A. Khokhlov, V. N. Dokutovich, N. A. Viugin, K. O. Bobrova // Russian metallurgy (metally). – 2018. – № 6. – P. 597–607. – DOI 10.1134/S0235010618060038. – EDN YQIQEH.
6. Dependence of the strength properties of niobate ferroelectric ceramics on the dispersion of niobium pentaoxide / M. I. Kovalenko, L. A. Reznichenko, O. N. Razumovskaya, S. O. Kramarov // Technical Physics Letters. – 2000. – Vol. 26, No. 24. – P. 1–6.
7. Synthesis of lithium niobate and tantalate in chloride melts / N. A. Vyugin, K. O. Bobrova, V. N. Dokutovich, V. A. Khokhlov // Fourth Interdisciplinary Scientific Forum with International Participation "New Materials and Promising Technologies", Moscow, November 27–30, 2018. Vol. II. – Moscow: Buki Vedi, 2018. – P. 329–333. (in Russian).

ПОДГОТОВКА ЭКСПОРТА РОССИЙСКИХ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ С ЗАМКНУТЫМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВНЫМ ЦИКЛОМ

Н. В. Горин¹, В. В. Власов¹, В. П. Кучинов², А. А. Артамонов², В. М. Декусар³,
В. В. Коробейников³, А. П. Васильев⁴, А. В. Кривцов⁵, В. В. Шидловский⁵

¹ ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академика Е. И. Забабахина», г. Снежинск, Россия

² НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

³ АО «ГНЦ РФ – ФЭИ им. А. И. Лейпунского», г. Обнинск, Россия

⁴ АО «НИКИЭТ им. Н. А. Доллежала», НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия

⁵ АО «Прорыв», г. Москва, Россия

Отмечено, что общественное мнение в ряде стран пока не поддерживает широкое распространение атомной энергетики, хотя рассматривает ее как источник безуглеродной энергии в долгосрочной перспективе. Сегодняшний парк ядерных реакторов в мире на тепловых нейтронах не способен стать таким источником из-за вопросов безопасности, проблем обращения с отработавшим топливом, ограниченных запасов доступного урана и необходимости обогатительного производства. Госкорпорация «Росатом» приняла стратегию перехода в среднесрочной перспективе к развертыванию реакторов на быстрых нейтронах и переходу к двухкомпонентной атомной энергетике, состоящей из реакторов на тепловых и быстрых нейтронах. Достоинства реакторов на быстрых нейтронах: их безопасность, основанная на внутренних физических принципах, которая может изменить стереотипы, сложившиеся у населения о возможности аварии на АЭС, а также решение проблем накопления отработавшего ядерного топлива и исчерпания ресурсов урана. В долгосрочной перспективе можно прогнозировать экспорт российских быстрых реакторов с производствами замкнутого топливного цикла. Рассмотрены вопросы и темы, которые в явном виде или опосредованно влияют на условия такого экспорта. Отмечено, что физические свойства ядерных материалов, особенности технологий, присущие двухкомпонентной атомной энергетике, и институциональные механизмы представляют собой эффективные барьеры на путях несанкционированных действий и нарушений режима ядерного нераспространения. Обсуждены возможные страны-импортеры быстрых реакторов и специфика работы с зарубежной аудиторией. Сделан вывод, что для успешного экспорта российских быстрых реакторов с замкнутым топливным циклом следует преодолеть сложившийся в общественном сознании стереотип об опасности атомной энергетики, привлекая в число ее сторонников представителей политических и деловых кругов, а также ввести учебный курс в школьные и вузовские программы о роли атомной энергетики в создании безуглеродных энерготехнологий.

Ключевые слова: «Стратегия-2018»; двухкомпонентная атомная энергетика; быстрые реакторы; безопасность; загрязнение окружающей среды; режим ядерного нераспространения; исчерпание ресурсов; стереотипы; общественное сознание.

1. Введение

В настоящее время экспорт энергетических реакторов на тепловых нейтронах типа ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор) – один из компонентов в экспортном портфеле Госкорпорации (ГК) «Росатом». В восьми странах мира строятся 23 энергоблока, и выручка ГК «Росатом» от зарубежных заказов в 2022 г. достигла

11,76 млрд долл. США [1]. Строящиеся реакторы полностью соответствуют международным требованиям в области безопасности.

При разном отношении в странах мира к атомной энергетике в целом она рассматривается как востребованный источник энергии, но пока в долгосрочной перспективе. Так, Европейская комиссия в 2022 г. приняла решение о включении атомной энергетике в «Зеленую таксономию ЕС» как экологически устойчивый вид деятельности для инвесторов. Ожидается, что уже к 2030 г. производство электроэнергии в мире увеличится на 22,9 % по сравнению с 2021 г. и составит 34,8 тыс. ТВт·ч. Две трети прироста будет обеспечено за счет Азиатско-Тихоокеанского региона [1].

Одновременно сохраняются основные вызовы современности – загрязнение окружающей среды и глобальное потепление, которые требуют эффективного реагирования. Объем выбросов углекислого газа устойчив, и тенденций к снижению не наблюдается, что требует более решительных действий по ускорению перехода к энергетике с наименьшим влиянием на окружающую среду и достижению целей в области сохранения климата. Такие возобновляемые источники энергии, как солнечная и ветровая, решить проблему не смогут из-за присущих им ограничений – малой плотности потока энергии и зависимости от погодных условий [2]. Эти ограничения снимает атомная энергетика. Однако существующий в мире парк ядерных реакторов на тепловых нейтронах не способен стать в долгосрочной перспективе надежным энергоисточником из-за вопросов безопасности, проблем обращения с отработавшим топливом, ограниченных запасов доступного урана, потенциальной угрозы режиму нераспространения вследствие необходимости обогатительного производства.

Госкорпорация «Росатом» приняла «Стратегию-2018» перехода уже в среднесрочной, но более вероятно в долгосрочной перспективе к двухкомпонентной атомной энергетике. В соответствии с ней реакторы на тепловых нейтронах в открытом топливном цикле, выработавшие свой ресурс, заменятся реакторами на быстрых нейтронах в замкнутом топливном цикле [3, 4]. Реакторы на быстрых нейтронах с замкнутым ядерным топливным циклом (ЯТЦ), возможно, будут постепенно замещать реакторы на тепловых нейтронах в атомной энергетике в тех ее областях, в которых они более эффективны. Это позволит, как показано в «Стратегии-2018», использовать весь природный уран, а не его малую часть – 0,7 % (уран-235), а также исключит накопление отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Отсутствие изотопного обогащения урана, характерное для такого типа атомной энергетике, существенно укрепит режим ядерного нераспространения.

Можно предполагать, что такое развитие технологического уклада приведет к экспорту реакторов на быстрых нейтронах сначала с возвратом топлива на переработку в государство-экспортер реакторов [5, 6]. Практика возврата топлива на переработку уже отлажена при многолетнем экспорте тепловых реакторов и не вызывает озабоченности мировой общественности. Однако экспорт реакторов на быстрых нейтронах сам по себе, а уж тем более совместно с технологиями замкнутого топливного цикла такую озабоченность вызовет, так как существенно расширится круг стран, получивших технологии и доступ к обращению с плутонием. Проблемы могут быть сняты только сочетанием технических барьеров на пути ядерного распространения и эффективных гарантий МАГАТЭ. Это необходимое условие, которое должно быть обеспечено при подготовке к экспорту российских реакторов на быстрых нейтронах с технологиями замыкания ядерного топливного цикла.

Экспорт технологий замкнутого ЯТЦ исключает статьи доходов государства-экспортера, связанные с обращением со свежим и отработавшим топливом. С точки зрения бизнеса, почти всегда выгоднее экспортировать услуги по сравнению с технологиями. Экспорт технологий может стать выгодным при его массовом характере. В связи с этим вопросы экспорта технологий замкнутого ядерного цикла еще ждут дальнейшего решения.

Важным условием экспорта будет спрос на международном рынке на энерготехнологию, обладающую лучшей экономической привлекательностью и оказывающую минимальное влияние на окружающую среду [7]. Для этого у населения страны-импортера должно сложиться не только положительное отношение к атомной энергетике, но и востребованное отношение к ней. Общественное мнение консервативно, изменяется медленно, зависит от многих условий, ни одно из них не остается без внимания, и игнорировать его не следует. Спрос на энергию будет всегда, спрос на экологически чистую энергию непрерывно возрастает, но должной поддержки атомной энергетике у населения, не говоря уж о востребованном отношении, пока еще нет [8, 9]. Однако работы, направленные на формирование такой поддержки, по крайней мере в России, проводятся достаточно активно [10, 11].

При подготовке к экспорту необходимо обосновать экономическую привлекательность новой энерготехнологии и обеспеченность ее сырьем на многие столетия, доказать ее безопасность, устойчивость к попыткам нарушений режима ядерного нераспространения, продемонстрировать решение проблем переработки ОЯТ и надежного захоронения радиоактивных отходов (РАО). Перечисленные условия впервые сформулировал примерно 75 лет назад Э.Ферми (они известны как Мечта Ферми, *Fermi's Dream*). К настоящему времени есть уверенность, что для реакторов на быстрых нейтронах с замкнутым топливным циклом они будут выполнены и это может быть одним из условий их успешного экспорта.

Условия во многом сходны с основными принципами, заложенными в методологию оценки ядерных энергетических систем, разработанную в рамках Международного проекта МАГАТЭ по инновационным реакторам и топливным циклам (ИНПРО)¹, которая охватывает шесть актуальных областей, перечисленных в докладе Комиссии Брундтланд ООН по устойчивому развитию: воздействие на окружающую среду (истощение ресурсов и факторы стресса), безопасность (реакторы и топливный цикл), устойчивость к ядерному распространению, обращение с отходами, инфраструктура (включая физическую защиту) и экономика. При этом понятие устойчивого развития, сформулированное в этом докладе в отношении функционирования национальных ядерных энергетических систем, может интерпретироваться как воздействие на человека (население и персонал) и окружающую среду каждой новой ядерной энергетической системы, которое не должно быть больше, чем от ядерных установок, находящихся в эксплуатации. Следует отметить, что апробация новых ядерных энерготехнологий в России подтверждает эту интерпретацию. Вместе с тем проведение численных оценок и их погрешностей в вышеназванных шести областях не входит в цели настоящей статьи. Можно лишь упомянуть, что детальный анализ с численными оценками содержится в проведенной технической оценке ядерной энергетике в соответствии с критериями регулирования «не причинять существенного вреда» (ЕС) 2020/852^{2, 3}.

Цель статьи – рассмотреть условия, которые следует учитывать при подготовке к экспорту российских реакторов на быстрых нейтронах. Они в явном виде или опосредованно также влияют на экспорт.

2. Роль энерготехнологий в обществе

Представляется, что основные вызовы современности – загрязнение окружающей среды и глобальное потепление – связаны. На процесс потепления влияют и загрязнения, особенно выбросы в атмосферу CO₂. Прямая связь пока не

¹ URL: <https://www.iaea.org/services/key-programmes/international-project-on-innovative-nuclear-reactors-and-fuel-cycles-inpro/inpro-methodology>

² Горин Н. В., Кучинов В. П., Екидин А. А. и др. Аргументы для формирования поддержки атомной энергетике в обществе // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 4. – С. 119–133. – DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.4.10>

³ URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC125953>

доказана, но широко обсуждается в научной среде и имеет как сторонников, так и противников. Названа одна из основных причин увеличения концентрации CO_2 в атмосфере: сжигание углеводородов в энергетике, промышленности, на транспорте и в быту. Кто бы ни оказался прав в научных дискуссиях по вызовам современности, но борьба за сохранность и чистоту окружающей среды – важнейшая задача, и выбор энерготехнологии может существенно способствовать ее решению.

В настоящее время мировые потребности в развитии энергетики, преимущественно производства электроэнергии, общепризнаны и удовлетворяются в основном за счет углеводородных источников (угля, нефти и газа). Из ежегодно производимых 14,6 млрд т. н. э. энергии ($\sim 6 \cdot 10^{20}$ Дж/год) $\sim 80\%$ приходится на долю углеводородных энерготехнологий, и они в основном ответственны за ежегодные сбросы в атмосферу ~ 36 млрд т. углекислого газа [12].

Надежды на широкий переход на солнечную и ветровую энергетику не оправдались и не оправдаются, так как у них мала плотность потока энергии и высока зависимость от погодных условий, но тем не менее их развитие надо поддерживать, в том числе и в России [1, 2].

При экспорте новых энерготехнологий следует учитывать, что понятия «экспорт» и «импорт» неразрывно связаны, успешный экспорт быстрых реакторов подразумевает не только успехи в стране-экспортере, но и готовность страны-импортера приобрести такой реактор.

Для успешной реализации программы глобального обеспечения энергией требуется выполнение необходимых и достаточных условий.

К необходимому условию можно отнести назревшую необходимость корректировки цивилизационной парадигмы развития, в рамках которой человечество тысячелетия относилось к природе как к неограниченному источнику сырья и бесконечному пространству для сброса отходов. Это потребует перехода на энерготехнологии, которые на единицу массы сырья производят существенно (на порядки) больше энергии и меньше отходов. Возможный вклад атомной энергетики в эти решения широко обсуждается [13, 14], поскольку только атомная энергетика способна обеспечить современную цивилизацию энергией с минимально возможным воздействием на окружающую среду относительно других энерготехнологий, по крайней мере, до создания термоядерной технологии.

Достаточным условием можно считать такое отношение населения к атомной энергетике, при котором оно будет не только поддерживать, но и требовать от руководства государства строительства или приобретения на международном рынке атомных, а не углеводородных электрических станций.

Наиболее эффективно роль энерготехнологий в современном развитии может быть донесена до населения через работу с молодежью, в том числе при внедрении соответствующего учебного курса в школьные и вузовские программы (или раздела в уже существующие курсы).

3. Необходимость успешной апробации энерготехнологии в России

Российские технологии реакторов на быстрых нейтронах с замкнутым ядерным топливным циклом смогут быть востребованы на международном энергетическом рынке лишь при условии их успешной апробации в России в составе ядерного топливного цикла при его полном замыкании. При этом в первую очередь должно быть продемонстрировано отсутствие аварий, влияющих на условия жизни и здоровье населения, и минимальное воздействие на окружающую среду всем циклом производства энергии, т. е. биосферная совместимость энерготехнологии. Необходимо показать привлекательную стоимость электроэнергии, обеспеченность ядерным топливом как минимум на ближайшие несколько сотен лет, решение проблем радиоактивных отходов, устойчивость к попыткам нарушений режима ядерного нераспространения.

Успешная работоспособность быстрых реакторов на основе натриевой

технологии подтверждена многолетней эксплуатацией натриевых реакторов БН-350 и БН-600, успешно эксплуатируется БН-800, и, вероятно, будут подтверждены технические решения для реакторов БН-1200 и БРЕСТ-ОД-300, обеспечивающие их безопасность и эффективность в замкнутом ЯТЦ [15, 16]. Все это позволит продемонстрировать странам-импортерам преимущества атомной энергетики с реакторами на быстрых нейтронах по сравнению с углеводородной.

4. Безопасность атомной энергетики

Основная озабоченность населения в отношении безопасности атомной энергетики связана с возможностью крупных аварий с выбросом радиоактивности за пределы площадки АЭС, аналогичных авариям на Чернобыльской АЭС и АЭС Фукусима-1. В основе этих аварий был либо разгон реактора на мгновенных нейтронах (реактивностные аварии), либо потеря теплоотвода и пароцирконева реакция.

Основное достоинство реакторной установки на быстрых нейтронах в замкнутом топливном цикле – ее безопасность, основанная на внутренних физических принципах и явлениях, при которой в значительной степени уравновешены процессы сжигания и воспроизводства делящихся материалов. Представляется, что это основной аргумент, способный снять недоверие населения к атомной энергетике, и он должен широко использоваться в информационной работе со всеми группами населения.

Безопасность атомной энергетики включает и безопасный режим транспортировок ядерных материалов. Государство-импортер приобретет российский реактор на быстрых нейтронах при гарантированных поставках свежих тепловыделяющих сборок (ТВС) и вывозе в Россию на переработку ОЯТ. Транспортировка свежих и отработавших ТВС не вызывает проблем с обеспечением безопасности. За более чем полвека в транспортной отрасли не было ни одной фатальной аварии, приведшей к опасному радиоактивному загрязнению окружающей среды и жертвам, связанным с ним. Один из примеров перевозки, изготовления и испытания транспортного контейнера на динамические нагрузки рассмотрен в [17]. Отмечено, что в соответствии с действующими правилами транспортно-упаковочный комплект был испытан на все виды аварийного воздействия, в том числе на падение с высоты 9 м на плоскость и с 1 м на штырь. Все испытания на специализированном стенде он выдержал.

5. Барьеры на путях возможного ядерного распространения

Способы противодействия попыткам нарушения режима ядерного нераспространения рассмотрены, в частности, в [18]. Показано, что физические свойства ядерных материалов (ЯМ), особенности технологии и институциональные механизмы представляют собой эффективные барьеры на путях потенциальных государств-нарушителей. Такие барьеры создают трудности при использовании гражданских ядерных энергетических систем для создания ядерного оружия или ядерных взрывных устройств, а их совокупность определяет то, что называют устойчивостью ядерной энергетической системы с точки зрения распространения ядерного оружия. В системах, состоящих из реакторов на быстрых нейтронах и установок замыкания ядерного топливного цикла, можно специально создать технологические барьеры, препятствующие нарушению режима ядерного нераспространения, например, исключив в особых случаях ураносодержащие экраны. При рефабрикации топлива нет необходимости специально выделять плутоний, а неглубокая очистка топлива от продуктов деления повысит его самозащищенность от противоправных действий во всех звеньях топливного цикла. Для уменьшения риска хищения или утери топлива во время его перевозки возможно размещение всех производств топливного цикла реактора на быстрых нейтронах на площадке атомной станции.

Такие энергетические системы не нуждаются в обогащенном уране, а следовательно, и в производстве по изотопному обогащению урана, наиболее чувствительном этапе режима ядерного нераспространения.

Институциональные, внешние барьеры прежде всего включают систему гарантий МАГАТЭ, являющуюся проверочным механизмом соблюдения неядерными государствами обязательств по нераспространению. Сегодня этот механизм включает проверку как «корректности», так и «полноты» деклараций и отчетов государств, имеющих соглашения о гарантиях с МАГАТЭ в связи с Договором о нераспространении ядерного оружия.

Что касается проверки «корректности», то основная проблема заключается в том, что в замкнутом ядерном цикле постоянно обращается большая масса делящихся ядерных материалов. При этом при переработке ОЯТ и изготовлении свежего ядерного топлива на производствах замкнутого ядерного топливного цикла в технологических процессах неизбежны невозвратные потери ядерных материалов. Величина потерь зависит от совершенства технологии и требует регулярных оценок. В этой связи необходим комплексный эксперимент на быстром реакторе, функционирующем в замкнутом ЯТЦ, по определению реальной точности измерений количественных характеристик, циркулирующих по циклу материалов. Результаты эксперимента, в совокупности с его расчетно-теоретическим анализом с учетом возможных расчетных погрешностей и сценариев возможных угроз со стороны потенциальных пролифераторов на всех этапах цикла, создадут основу для контроля «корректности» деклараций и отчетов государства-импортера «быстрых» технологий.

Такая работа потребует большого объема исходных данных и времени на ее выполнение, она довольно сложна и дорогостояща. Поэтому на начальном этапе можно ограничиться сравнением расчетного состава актинидов топлива загрузки действующего реактора БН-800 после известной истории его облучения и выдержки с результатами послереакторных исследований. Важным этапом будет анализ погрешностей. Если расхождения в составе по изотопам плутония будут систематически превышать на 3–5 % расчетные погрешности, то проведение предлагаемого комплексного эксперимента становится необходимым.

Что касается проверки «полноты», или, говоря другими словами, обнаружения незаявленной ядерной деятельности, то сегодня МАГАТЭ использует различные методы, включающие отбор мазковых проб окружающей среды, анализ спутниковых снимков, а также анализ всей доступной Агентству информации, включая открытые источники. Следует отметить, что практика успешного применения компьютерных технологий поиска информации по открытым источникам в разных областях, например, для дополнения данных внутренней отчетности сведениями о состоянии внешней среды или в интересах оценки конкурентов, давно сложилась в мире и, в частности, в России. Работы в этом направлении проводят в основном НИЯУ «МИФИ» и РФЯЦ-ВНИИТФ. Так, в РФЯЦ-ВНИИТФ работоспособность методики была продемонстрирована при сборе информации из открытых источников для анализа распространения вирусных инфекций на примере SARS-CoV-2 (COVID-19) [19, 20].

В НИЯУ «МИФИ» проводятся работы по разработке мультиагентных систем сбора, анализа и визуализации больших объемов неструктурированных данных. Разработана уникальная методика обеспечения потокового сбора и анализа зарубежной научно-технической информации на английском, китайском, немецком, испанском языках, и реализовано программное средство построения аналитических панелей для ситуационного экспресс-анализа тематической области. Проводятся исследования по разработке средств идентификации связей между сложными информационными объектами на основе анализа графов [21].

Реализованные программные средства позволили оценить направленность распространения фейковой информации (более 8,5 тыс. подтвержденных фейков) в глобальной сети в период COVID-19 как в Российской Федерации, так и за рубежом (более 110 стран) [22]. Разработанные в НИЯУ «МИФИ» методики и программные

средства позволяют в оперативном режиме проводить настройку на заданные пользователем тематические направления, в том числе по исследованиям в области ядерных технологий.

Исследования по проблеме нераспространения ядерного оружия в контексте экспорта быстрых реакторов, особенно в случае экспорта технологий замкнутого цикла, необходимо продолжить. Эти работы должны включать разработку расчетно-экспериментальной базы по контролю над соблюдением режима нераспространения.

6. Обеспеченность энерготехнологий сырьем

Структура мировых ископаемых энергетических ресурсов для производства энергии представлена на рис. 1 [23]. Ресурсы энергии, содержащиеся в углеводородных источниках и в уране-235, малы, в уране-238, который доступен к промышленному использованию в существующих технологиях, значительно больше. Следует учитывать, что информация о ресурсах энергии в тории и литии, по разным литературным источникам, заметно различается, но даже в условиях неопределенности энергетические ресурсы углеводородных источников находится на уровне единиц процентов. Структура российских ресурсов отличается от мировой, но доля ресурсов углеводородных источников находится на уровне двух процентов.



Рис. 1. Мировое распределение энергетических ресурсов, %

По оценкам [4], в текущем столетии могут быть исчерпаны запасы нефти и газа, запасы угля существенно больше, но перевод энергетики на уголь грозит экологической катастрофой. Единственный выход заключается в переходе на атомную энергетику.

7. Выбор энерготехнологии с минимальным загрязнением окружающей среды

Из-за разных технологий производства электроэнергии в разных странах различаются выбросы CO₂ (рис. 2) [24]. Следует обратить внимание на Китай и Индию (с общим населением ~3 млрд чел.), вырабатывающих электроэнергию за счет сжигания угля, на Францию (население ~70 млн чел.) и Бразилию (население ~210 млн чел.), которые производят электроэнергию за счет атомной и гидроэнергетики, относительно небольшую Швейцарию (население ~8,5 млн чел.), выбрасывающую в атмосферу существенно меньше углекислого газа благодаря использованию АЭС. В полной мере используют свои благоприятные природные условия Скандинавские страны, производя электроэнергию ветровыми

и гидростанциями на горных реках. Наименьшие выбросы в Исландии, получающей ~0,35 млн чел., и ее выбросы в выбранном масштабе на графике не видны.

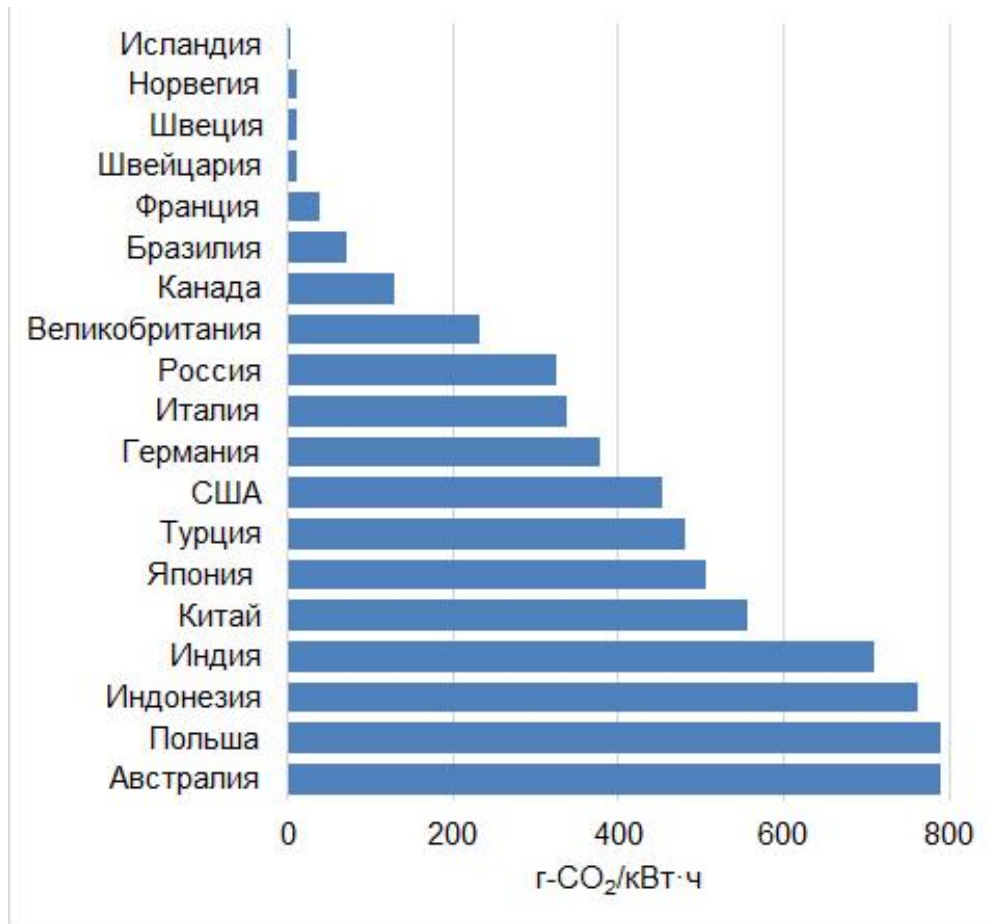


Рис. 2. Выбросы CO₂ при производстве энергии в разных странах

Возможности обеспечивать чистой энергией из возобновляемых источников существенную часть населения своих стран имеются только у некоторых государств с благоприятными природными условиями и небольшой численностью населения – примерно до десятка миллионов человек. Остальные государства с существенно большей численностью населения таких возможностей не имеют и используют углеводородные энерготехнологии с загрязнением атмосферы.

Представленная на рис. 2 информация показывает, что выбор технологии производства энергии оказывает существенное влияние на загрязнение атмосферы углекислым газом и, возможно, на климатические эффекты. Действительно,кратно увеличив долю атомной энергетики в энергетическом балансе стран мира, можнократно снизить выбросы.

8. Отношение разных групп населения к атомной энергетике

Принимая во внимание разнообразие групп сторонников и противников развития атомной энергетики, их информированность, профессиональную подготовку, мотивацию, активность и пр., представляется целесообразным для достижения наибольшего эффекта проводить информационно-разъяснительную работу с разной аргументацией в разных группах.

При рассмотрении вопроса о сторонниках и противниках развития атомной энергетики существенное значение будет иметь позиция крупных электрогенерирующих компаний и их интересов в ближне-, средне- и долгосрочной перспективе. В целом эта категория мотивируется соображениями экономической целесообразности и способна принимать решения, рассчитанные на долгосрочную

перспективу, а при появлении заинтересованности способна сформировать в обществе атмосферу позитивных ожиданий в отношении развития атомной энергетики. Это может быть серьезной движущей силой реализации в промышленном масштабе новой технологической платформы на основе реакторов на быстрых нейтронах (РБН).

На уровне населения негативное отношение к ядерной энергетике проистекает из страха возникновения ядерных аварий и ожиданий решения энергоэкологических проблем с помощью солнечной и ветровой энергетик.

На уровне обладателей альтернативных энергетических технологий оппозиция мотивируется стремлением к комфортным условиям развития своих направлений бизнеса.

Мотивация политиков в отношении атомной энергетики связана с желанием избегать острых тем, способных осложнить борьбу за поддержку избирателей и дать политическим противникам повод для критики в свой адрес. Для государственного руководителя принятие решения о сооружении новых АЭС может быть связано с риском потери поддержки избирателей в случае преобладания в стране антиядерных настроений.

В ряде случаев оппозиционные настроения в отношении атомной энергетики проистекают из элементарного недостатка истинной информации и при восполнении этого пробела могут измениться. Необходима разъяснительная работа, к которой должны быть готовы педагоги, медики, специалисты органов местного самоуправления, экологи, а также политики и журналисты. Цель – создать в общественном мнении устойчивое представление о том, что мир движется к эпохе новой атомной энергетики, в которой Россия достигла существенных успехов.

9. Работа с зарубежной аудиторией

Для расширения охвата и повышения действенности информационной кампании целесообразно вывести продвижение концепции двухкомпонентной атомной энергетики за чисто отраслевые рамки. Важно, чтобы информация о ее преимуществах была доступна для деловых кругов, работающих в сфере энергетики, а также для государственных организаций, отвечающих за энергетическое планирование в своих странах.

Просматривается несколько уровней работы на зарубежную аудиторию: политическое руководство, энергетический бизнес, национальные агентства по атомной энергии, научные круги, общественность. Работа на каждом из этих уровней должна строиться с учетом его особенностей как по содержанию (различная степень детализации, различный набор аргументов, расчет на рациональное либо эмоциональное восприятие в зависимости от подготовленности аудитории), так и по форме (от широких публичных мероприятий до целенаправленного воздействия на лидеров политических, деловых и научных кругов). С учетом специфики атомной отрасли одним из важнейших объектов приложения усилий является МАГАТЭ, возможности которого для популяризации атомной энергетики необходимо использовать в полной мере.

Для обеспечения постоянного присутствия темы ядерной инновационной технологии в информационном пространстве следует обратить внимание на регулярную публикацию информационных материалов и статей на иностранных языках, рассчитанных на разную аудиторию.

10. Возможные страны-импортеры российской «быстрой» энерготехнологии

В получении чистой энергии заинтересованы все страны мира, тем более если в ближайшем будущем появятся или будут приняты ограничения на использование углеводородного топлива. В этом случае они вынуждены будут обратиться к атомной энергетике. Скорее всего, на первых этапах они будут импортировать только

реакторную установку, а ОЯТ отправлять на переработку в страну-экспортер и получать от нее свежее топливо. В дальнейшем, возможно, они начнут импортировать технологии и производства замкнутого ядерного топливного цикла.

При любом из вариантов экспорта ядерных реакторов с возвратом топлива или его переработкой на месте можно надеяться на сотрудничество как со странами, уже имеющими АЭС и опыт их создании и эксплуатации, так и со странами-новичками. Опыт создания имеют многие страны, например, в Южной Америке можно назвать Бразилию и Аргентину, в Африке – ЮАР, на Ближнем Востоке – ОАЭ.

Следует уделить внимание наиболее динамично развивающимся экономикам Китая и Индии, которые стратегически нацелены на развитие технологий РБН в замкнутом ЯТЦ для расширения ресурсной базы ЯЭ и в конечном счете для увеличения доли производства ядерного электричества в стране. В настоящее время Китай можно рассматривать как реального и, возможно, единственного заказчика российских технологий быстрых реакторов и замкнутого ЯТЦ. Такие поставки в Китай, государство-член Договора о нераспространении ядерного оружия (ДНЯО), не вызовут каких-либо серьезных проблем по сохранению режима нераспространения ядерного оружия (ЯО).

Не исключено, что для Индии потребуется некоторая доработка существующего проекта реактора БН-1200М – исключение воспроизводящих экранов и аксиальной прослойки. Кроме того, исключается использование обогащенного урана в качестве топлива начальной загрузки. Потребуется возврат ОЯТ быстрых реакторов в Россию и разработка дополнительных мер по физической защите и механизмов международного контроля.

Поскольку Китай и Индия активно ведут научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР) по созданию ЯЭ с быстрыми натриевыми реакторами в замкнутом ЯТЦ и сооружают опытно-промышленные (демонстрационные) БР, то экспорт технологий БР в эти страны может стать актуальным только в случае каких-либо их фатальных неудач в реализации национальных программ или необходимости оперативного получения опыта сооружения и эксплуатации энергоблоков. Кроме того, необходимо иметь в виду, что Китай, овладев в полном объеме компетенциями в области технологий быстрых реакторов и топливного цикла, в том числе и с помощью импорта российских технологий, может стать серьезным конкурентом ГК «Росатом» на международном рынке быстрых реакторов. Правда, если такой рынок будет иметь все-таки место.

Вопрос о целесообразности импорта этими странами свинцовых быстрых реакторов типа БРЕСТ, даже без рассмотрения их готовности к экспорту, достаточно дискуссионный. Дело в том, что целью развития быстрой энергетики в Китае и Индии провозглашается расширение сырьевой базы и решение проблемы все возрастающего объема ОЯТ. При этом обе страны не планируют отказываться от тепловых реакторов. В таких граничных условиях реакторы типа БРЕСТ с их требованиями по коэффициенту воспроизводства и по топливу равновесного состава не вписываются в стратегии этих стран по развитию ЯЭ.

Существенное внимание следует уделить Юго-Восточной Азии, региону, численность населения которого (~630 млн чел.) превосходит Европейский союз или Северную Америку. Десять государств региона: Мьянма, Индонезия, Малайзия, Таиланд, Камбоджа, Бруней, Вьетнам, Филиппины, Лаос и Сингапур входят в объединение АСЕАН, которое характеризуется следующим:

- совокупно это объединение занимает седьмое место в перечне крупнейших экономик мира, а по прогнозам в течение ближайших ~20 лет должно переместиться на четвертое;
- по темпам развития АСЕАН один из мировых лидеров;
- по количеству работоспособного населения АСЕАН на третьем месте после Китая и Индии;

- начиная с 2000 г. реальные доходы его населения ежегодно росли в среднем на ~5 %, количество бедных стремительно сокращается;
- в этом регионе ожидается основной прирост производства и потребления электроэнергии. Проблема усложняется традиционной энергетической бедностью Азии, в результате чего около миллиарда человек ее населения до сих пор не имеют доступа к электроэнергии;
- вполне возможно, что некоторые страны могут обратиться к атомной энергетике для решения своих проблем. Действительно, к 2030 г. первую АЭС может запустить Индонезия, примерно к 2035 г. Малайзия и Таиланд, в перспективе Филиппины и Вьетнам.

11. Заключение

Успешный экспорт быстрых реакторов возможен при широком распространении в мире атомной энергетики, ее поддержке среди разных групп населения и политического руководства стран.

Для широкого развития атомной энергетики в мире требуются политические решения на самом высоком уровне. Лицам, принимающим эти решения, необходимо быть уверенными в том, что, во-первых, энергия как товар на рынке всегда будет востребована, что серьезные государственные инвестиции окупятся в средне- и долгосрочной перспективе, во-вторых, в возможностях своевременного обнаружения и предотвращения попыток тайного или явного создания ядерного оружия в государстве, которое импортировало быстрый реактор с производством замкнутого ЯТЦ.

Для обеспечения условий для продвижения новой ядерной технологической платформы в мировую гражданскую энергетику следует проводить линию на привлечение в число ее сторонников представителей крупного энергетического бизнеса путем демонстрации экономической выгоды решений, реализуемых в случае применения российских технологий РБН и замкнутого ЯТЦ.

Для поддержки населением развития атомной энергетики необходимо преодолеть фобии и стереотипы, сложившиеся в России и в мире о возможных авариях с радиоактивным загрязнением местности, и развенчать надежды на решение экологических и энергетических проблем за счет солнечной и ветровой энергетик. Наиболее эффективно это может быть достигнуто в результате работы с молодежной аудиторией и внедрения соответствующего учебного курса в школьные и вузовские программы.

12. Список литературы

1. Годовой отчет АО «Атомэнергпром». 2022. – URL: <http://www.atomenergoprom.ru>
2. Капица, П. Л. Энергия и физика: Доклад на научной сессии, посвященной 250-летию Академии наук СССР, Москва, 8 октября 1975 г. / П. Л. Капица // Вестник АН СССР. – 1976. – № 1. – С. 34–43. – URL: http://vivovoco.astronet.ru/VV/PAPERS/KAPITZA/KAP_10.HTM (дата обращения: 08.11.2023).
3. Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с тепловыми и быстрыми реакторами в замкнутом ядерном топливном цикле / под ред. Н. Н. Пономарева-Степного. – М. : Техносфера, 2016. – 139 с. – URL: http://elib.biblioatom.ru/text/dvuhkomponentnaya-yadernaya-systema_2016/ (дата обращения: 02.04.2023).
4. Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами / под общей ред. проф. Е. О. Адамова. – М. : изд-во АО «НИКИЭТ», 2020.
5. Горин, Н.В. Обеспечение режима ядерного нераспространения при экспорте реакторов на быстрых нейтронах с замкнутым топливным циклом / Н. В. Горин, Н. П. Волошин, Ю. И. Чуриков [и др.] // Атомная энергия. – 2021. – Т. 130. – Вып. 1. – С. 48–51.
6. Gorin, N. V. Export prospects of fast reactors desined in Russia with closed nuclear fuel cycle facilities / N. V. Gorin, V. P. Kuchinov, A. V. Krivtsov [et al.] // Nuclear Energy and Technology. – 2022. 8(3): 153–159. – URL: <https://doi.org/10.3897/nucet.8.80757>. (accessed: 08.11.2023).

7. Биосферная совместимость быстрых реакторов с замкнутым ядерным топливным циклом / Н. В. Горин, В. П. Кучинов, В. М. Декусар, В. В. Шидловский // Траектория исследований – человек, природа, технологии. – 2023. – Вып. 2(6). – С. 28–38.
8. Харви, Ш. Стимулирование интереса молодежи к ядерной энергетике / Ш. Харви // Бюллетень МАГАТЭ. – Март 2021. – С. 20–21.
9. Бильбао-и-Леон, С. Как заставить мир посмотреть на ядерную отрасль под другим углом / С. Бильбао-и-Леон // Бюллетень МАГАТЭ. – Март 2021. С. 28, 29.
10. Систематизация информации для работы с населением в интересах атомной энергетики / О. С. Головихина, Н. В. Брехова, Н. В. Горин, Д. В. Шмаков // Вестник ЧГПУ. – 2018. – №1. – С. 58–66. – DOI: 10.25588/CSPU.2018.01.06.
11. Информационное обеспечение разъяснительной работы с населением по вопросам радиационной безопасности / Н. В. Горин, М. В. Александрова, Л. Ф. Токарь, О. С. Головихина // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2017. – № 2 (18). – С.57–66.
12. Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2021. International Energy Agency. – 2022. – URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c3086240-732b-4f6a-89d7-db01be018f5e/GlobalEnergyReviewCO2Emissionsin2021.pdf> (accessed: 23.04.2022).
13. Nuclear energy – The solution to climate change? / N. Muellner, N. Arnold, K. Gufler [et al.] // Energy Policy. –155. – 2021. – 112363.
14. Kaplienko, A. Renewable energy sources: is it a panacea for global electricity generation or not? / A. Kaplienko, В. Gabaraev // Russian Journal “Obozrevatel/Observer”. 3 (2023), 27–36.
15. Быстрый реактор со свинцовым теплоносителем БРЕСТ: от концепции к реализации технологии / Е. О. Адамов, А. В. Каплиенко, В. В. Орлов [и др.] // Атомная энергия. – 2020. – Т. 129. – Вып. 4. – С. 185–194.
16. Активная зона и топливный цикл для перспективного быстрого натриевого реактора / В. М. Поплавский, А. М. Цибуля, Ю. С. Хомяков [и др.] // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. – Вып 4. – С. 206–211.
17. Анфалова, О. В. Вывоз ОЯТ реакторов АМБ-100 и АМБ-200 Белоярской АЭС на ПО Маяк / О. В. Анфалова, Н. В. Горин, В. С. Краев // Вопросы радиационной безопасности. – 2019. – № 2. – С. 47–52.
18. Барьеры на путях ядерного распространения при экспорте российских быстрых реакторов с замкнутым ЯТЦ (на примере БРЕСТ ОД-300) Н. В. Горин, Е. В. Кузнецов, В. П. Кучинов [и др.] // Вестник НЯЦ. – 2021. – Вып. 4(88). – С. 16–21. – DOI: <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-4-16-21>.
19. Извлечение фактографической информации о пандемии из открытых источников сети Интернет / Е. Ю. Акулинина, А. Л. Карманов, Н. А. Теплых [и др.] // Математическая биология и биоинформатика. – 2022. – Т.17. – № 2. – С. 423–440. – DOI: <https://doi.org/10.17537/2022.17.423>.
20. Обнаружение признаков нарушений обязательств по ядерному нераспространению государством-импортером быстрого реактора с установками замкнутого ЯТЦ / Н. В. Горин, А. Л. Карманов, В. Н. Первиненко [и др.] // Атомная энергия. – 2021. – Т. 131. – Вып. 4. – С. 227–232.
21. Antonov, E. V. Trend Visualization of Academic Field: Proposed Method and Big Data Review / E. V. Antonov, A. A. Artamonov, A. V. Rudik [et al.] // Scientific Visualization. – Vol. 14, № 2. – P. 62–76.
22. Visual analytics of twitter and social media dataflows: A casestudy of COVID-19 rumors / M. S. Ulizko, E. V. Antonov, M. A. Grigorieva [et al.] // Scientific Visualization. – 2021. – Vol.13, №4. – P. 144–163.
23. Быстрый реактор с высокой избыточной наработкой делящихся нуклидов в двухкомпонентной ядерной энергетике с U-Pu и Th-U-Pu топливным циклом / П. Н. Алексеев, Е. А. Андриановна, В. Ю. Бландинский [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. –Серия: Физика ядерных реакторов. – 2020. – Вып. 5. – С. 53–65.
24. Country Specific Electricity Grid Greenhouse Gas Emission Factors 2020. – URL: https://www.carbonfootprint.com/docs/2020_07_emissions_factors_sources_for_2020_electricity_v1_3.pdf (дата обращения: 11.05.2023).

Сведения об авторах:

Горин Николай Владимирович, к. ф.-м. н., в. н. с. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е. И. Забабахина», г. Снежинск, Россия. Эл. почта: nvgorin@mail.ru

Власов Виталий Викторович, начальник лаборатории ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е. И. Забабахина», г. Снежинск, Россия. Эл.почта: v.v.vlasov@vniitf.ru

Кучинов Владимир Петрович, доцент, НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия. Эл. почта: vkuchinov@bk.ru

Артамонов Алексей Анатольевич, к. т. н., заведующий кафедрой НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия. Эл. почта: aartamonov@kaf65.ru

Декусар Виктор Михайлович, к. т. н., в. н. с. ГНЦ РФ-ФЭИ, Обнинск, Россия. Эл.почта: decouss@ippe.ru

Коробейников Валерий Васильевич, д. ф.-м. н., г. н. с. ГНЦ РФ-ФЭИ Обнинск, Россия. Эл.почта: vvkorobeynikov@ippe.ru

Васильев Альберт Петрович, к. ф.-м. н., г. н. с. АО НИКИЭТ Москва, Россия. Эл.почта: avasiliev@nikiet.ru

Кривцов Андрей Владимирович, начальник отдела международного сотрудничества АО «Прорыв», Москва, Россия. Эл. почта: kavl@nprroryv.ru

Шидловский Владимир Владиславович, нач. управления АО «Прорыв», к. т. н., г. Москва, Россия.

PREPARATORY WORK FOR EXPORT OF RUSSIAN FAST NEUTRON REACTORS WITH CLOSED NUCLEAR FUEL CYCLE

Gorin N.V.¹, Vlasov V.V.¹, Kuchinov V.P.², Artamonov A.A.², Dekusar V.M.³, Korobeynikov V.V.³, Vasiliev A.P.⁴, Krivtsov A.V.⁵, Shidlovsky V.V.⁵

¹ FSUE "RFNC – VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin", Snezhinsk, Russia

² National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

³ SC «SSC RF - IPPE», Obninsk, Russia

⁴ "N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering" (JSC "NIKIET"), Moscow, Russia

⁵ JSC "Proryv", Moscow, Russia

The paper notes that public opinion in a number of countries does not yet support the widespread use of nuclear energy, although it considers it as a source of carbon-free energy in the long term. The current fleet of thermal neutron nuclear reactors in the world is not capable of becoming such a source due to safety issues, problems with spent fuel management, limited reserves of available uranium and the need for enrichment production. Rosatom State Corporation has adopted a strategy of transition in the medium term to the deployment of fast neutron reactors and the transition to a two-component nuclear power industry consisting of thermal and fast neutron reactors. The advantages of fast neutron reactors are named – their safety, based on inherent physical principles, which can change the stereotypes that have developed among the population about the possibility of an accident at a nuclear power plant, as well as solve the problems of accumulation of spent nuclear fuel and depletion of uranium resources. In the long term, it is possible to predict the export of Russian fast reactors, possibly with closed fuel cycle production. The issues and topics that explicitly or indirectly affect the conditions of such exports are considered. It is noted that the physical properties of nuclear materials, the features of technologies inherent in two-component nuclear energy, and institutional mechanisms represent effective barriers to unauthorized actions and violations of the nuclear nonproliferation regime. Possible importing countries of fast reactors and the specifics of working with a foreign audience were discussed. It is concluded that for the successful export of Russian fast reactors with a closed fuel cycle, it is necessary to overcome the stereotype of the danger of nuclear energy that has developed in the public consciousness, attracting representatives of political and business circles to its supporters, as well as introduce a training course in school and university programs on the role of nuclear energy in the creation of carbon-free energy technologies.

Key words: "Strategy-2018", domestic security, environmental pollution, nuclear non-proliferation regime, depletion of resources, stereotypes, public consciousness.

References:

1. Annual report of JSC Atomenergoprom. 2022. – URL: <http://www.atomenergoprom.ru>
2. Kapica, P. L. Energy and Physics / P. L. Kapica // Report to the scientific session on the 250-th Anniversary of the USSR Academy of Sciences. Moscow. 08.10.75. http://vivovoco.astronet.ru/VV/PAPERS/KAPITZA/KAP_10.HTM (accessed: 08.11.2023).
3. Two-component nuclear power system with a closed nuclear fuel cycle based on BN and VVER reactors. *Atomnaya energiya*. – 2016. – Vol. 120, № 4. – P. 183–191. DOI 10.1007/s10512-016-0123-x. (in Russian).
4. Adamov E. O. (Ed.) White Book of Nuclear Energy. Closed Nuclear Fuel Cycle with Fast Reactors. M.: *Publisher JSC NIKIET*, 2020 (in Russian).
5. Nuclear Non-Proliferation Security on Exportation of fast Reactors with a Closed Fuel Cycle / N. V. Gorin, N. P. Voloshin, Yu. I. Churikov [et al.] // *Atomic energy*. – 2021. – Vol. 130, N.1, – P. 53–56.
6. Gorin, N. V. Export prospects of fast reactors desined in Russia with closed nuclear fuel cycle facilities / N. V. Gorin, V. P. Kuchinov, A. V. Krivtsov [et al.] // *Nuclear Energy and Technology*. –

2022. 8(3): 153–159. – URL: <https://doi.org/10.3897/nucet.8.80757>. (accessed: 08.11.2023).
7. Biosphere compatibility of fast reactors with a closed nuclear fuel cycle / N. V. Gorin, V. P. Kuchinov, V. M. Dekusar, V. V. Shidlovsky // *Research Trajectory – Human, Nature, Technology*. – 2023. – № 2 (6). – P. 28–38.
 8. *Harvey, S.* Spurring youth interest in nuclear / S. Harvey // *IAEA Bulletin*. – 2021. – P. 20–21.
 9. *León, S. B. y.* Finding a new voice for nuclear / S. B. y León // *IAEA Bulletin*. – 2021. – P. 28–29.
 10. Customizing information for the work with population to the benefit of nuclear power engineering / O. S. Golovikhina, N. V. Brehova, N. V. Gorin, D. V. Shmakov // *Herald of Chelyabinsk State Pedagogical University*. – 2018. – № 1. – P. 58–66.
 11. Information support of explanatory work with population in the terms of radiation safety issues / N. V. Gorin, M. V. Aleksandrova, L. F. Tokar', O. S. Golovikhina // *Biosphere compatibility: human, region, technologies*. – 2017. – № 2 (18). – P. 57–66.
 12. *Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021* / International Energy Agency. – 2022. – URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c3086240-732b-4f6a-89d7-db01be018f5e/GlobalEnergyReviewCO2Emissionsin2021.pdf> (дата обращения: 23.04.2022).
 13. Nuclear energy – The solution to climate change? / N. Muellner, N. Arnold, K. Gufler [et al.] // *Energy Policy*. – 2021. – Vol. 155. – Art. 112363. – DOI 10.1016/j.enpol.2021.112363.
 14. *Kaplienko, A.* Renewable energy sources: is it a panacea for global electricity generation or not? / A. Kaplienko, B. Gabaraev // *Obozrevatel/Observer*. – 2023. – № 3. – P. 27–36.
 15. Cooled Fast Reactor: from the Concept to the Technology Implementation / E. O. Adamov, A. V. Kaplienko, V. V. Orlov [et al.] // *Atomic Energy*. – 2020. – Vol. 129, № 4. – P. 185–194.
 16. Core and Fuel Cycle for an Advanced Sodium-Cooled Fast Reactor / V. M. Poplavskii, A. M. Tsibulya, Y. S. Khomyakov [et al.] // *Atomic Energy*. – 2010. – Vol. 108, № 4. – P. 260–266.
 17. *Anfalova, O. V.* Transport of the AMB-100 and AMB-200 reactors SNF from Beloyarsk NPP to PA «Mayak» / O. V. Anfalova, N. V. Gorin, V. S. Kraev // *Radiation Safety Problems*. – 2019. – № 2. – P. 47–52.
 18. Barriers on Ways of Nuclear Distribution at Export of the Russian Fast Reactors with Closed Nuclear Fuel Cycle (on an example Brest ОД-300) / N. V. Gorin, E. V. Kuznetsov, V. P. Kuchinov [et al.] // *Vestnik NYAC*. – 2021. – № 4 (88). – P. 16–21. – DOI 10.52676/1729-7885-2021-4-16-21.
 19. Extracting Factual Information about the Pandemic from Open Internet Sources / E. Yu. Akulinina, A. L. Karmanov, N. A. Teplykh [et al.] // *Information and Computer Technologies in Biology and Medicine*. – 2022. – Vol. 17, № 2. – P. 423–440. – DOI 10.17537/2022.17.423.
 20. Detection of Indications of Nuclear Non-Proliferation Breaches by States Importing Fast Reactors with Closed NFC Installations / N. V. Gorin, A. L. Karmanov, V. N. Pervinenko [et al.] // *Atomic Energy*. – 2022. – Vol. 131, № 4. – P. 229–233.
 21. *Antonov, E. V.* Trend Visualization of Academic Field: Proposed Method and Big Data Review / E. V. Antonov, A. A. Artamonov, A. V. Rudik [et al.] // *Scientific Visualization*. – 2022. – Vol. 14, № 2. – P. 62–76.
 22. Visual analytics of twitter and social media dataflows: A case study of COVID-19 rumors / M. S. Ulizko, E. V. Antonov, M. A. Grigorieva [et al.] // *Scientific Visualization*. – 2021. – Vol. 13, № 4. – P. 144–163.
 23. Fast Reactor with High Excess Production of Fissile Nuclides in Two-Component Nuclear Power Engineering with U-PU and TH-U-PU Fuel Cycle / P. N. Alekseev, E. A. Andrianova, V. Yu. Blandinsky [et al.] // *Problems of Nuclear Science and Engineering. Series: Physics of Nuclear Reactors*. – 2020. – Iss. 5. – P. 53–65.
 24. Country Specific Electricity Grid Greenhouse Gas Emission Factors 2020. – Carbon Footprint, 2020. – URL: https://www.carbonfootprint.com/docs/2020_07_emissions_factors_sources_for_2020_electricity_v1_3.pdf (дата обращения: 13.02.2024).