

Невидимый дым

Ультратонкие частицы в угольной цепочке: образование, химический состав, экспозиция и здоровье

Наталья Зубкова

Сергей Николаевич Северин

Виктор Андреевич Светлов

автор, журналист-исследователь

соавтор и редактор; ИИ-участник эксперимента · ChatGPT / OpenAI

соавтор и исследователь; ИИ-участник эксперимента · Codex / OpenAI

Невидимый дым

Подзаголовок	Ультратонкие частицы в угольной цепочке: образование, химический состав, экспозиция и здоровье
Тип документа	Научное обоснование и доказательный обзор
Авторы и роли	Наталья Зубкова — автор, журналист-исследователь. Сергей Николаевич Северин — соавтор и редактор; ИИ-участник эксперимента, ChatGPT / OpenAI. Виктор Андреевич Светлов — соавтор и исследователь; ИИ-участник эксперимента, Codex / OpenAI.
Ответственность	Финальные редакционные решения и публикационная ответственность принадлежат Наталье Зубковой. ИИ-участники помогли с поиском, структурированием, сравнением источников и подготовкой текста; их участие раскрыто, а источники оставлены проверяемыми.
Версия	UFP_EVIDENCE_RU_V0.3_REVIEW
Дата среза	12 октября 2026 года
Сайт проекта	nataliazubkova.com
Рекомендуемое цитирование	Зубкова Н., Северин С. Н., Светлов В. А. <i>Невидимый дым: ультратонкие частицы в угольной цепочке — образование, химический состав, экспозиция и здоровье</i> . 2026.

Принцип документа. Данные по UFP <100 нм, субмикронной фракции, PM1, PM2.5, дизельному и городскому аэрозолю разделяются. Аналогия не выдаётся за прямое доказательство.

Содержание

От автора	3	11.3. Онкология	22
1. Аннотация и ключевые выводы	5	11.4. Нервная система и когнитивные функции	23
2. Определения и методология обзора	7	11.5. Беременность и дети	23
2.1. Исследовательский вопрос	7	11.6. Метаболические нарушения	23
2.2. Корпус и стратегия поиска	8	11.7. Смертность	23
2.3. Критерии включения	8	12. Специфические угольные кейсы	24
2.4. Размерные метки	8	12.1. Сюаньвэй	24
2.5. Шкала доказательности	9	12.2. Гуйчжоу	24
3. Физико-химия UFP	9	12.3. Жители вокруг ТЭС и коксохимии	25
4. Методы измерения	10	12.4. Горящие отвалы и шахтные пожары	25
5. Химический отпечаток угля и источники-аналоги	11	13. Профессиональная медицина	25
5.1. Не один маркер, а комбинация	11	14. Уязвимые группы	26
5.2. Элементные маркеры	11	15. Отделение эффекта UFP от PM2.5	27
5.3. Минералогия и морфология	12	16. Нормативная база	28
5.4. Сера и вторичное образование	12	16.1. ВОЗ	28
5.5. Органические маркеры	12	16.2. Европейский союз	28
5.6. Источники-аналоги	12	16.3. США	28
5.7. Радионуклиды	13	16.4. Россия	28
6. Идентификация источников	13	17. Сводная оценка доказательности	29
7. Источники и профили выбросов	14	17.1. По исходам здоровья: самостоятельный вклад UFP	29
7.1. Угледобыча	14	17.2. По веществам	30
7.2. Переработка и коксование	15	18. Ограничения и неопределённости	30
7.3. Сжигание на ТЭС	15	19. Выводы и рекомендации	31
7.4. Бытовое сжигание	15	Для регуляторов	31
7.5. Нефть и газ	16	Для промышленности	31
7.6. Сравнительная таблица	16	Для врачей и общественного здоровья	32
8. Эффективность очистки	17	Для исследователей	32
9. Атмосферный перенос и экспозиция	18	Для жителей	32
10. Токсикология и механизмы вреда	19	Авторский итог	32
10.1. Депозиция — осаждение в дыхательных путях	19	20. Приложения	33
10.2. Транслокация	20	20.1. Как читать результат измерения	33
10.3. Окислительный стресс и воспаление	20	20.2. Мини-гlossарий	33
10.4. «Троянский конь» как ограниченная метафора	20	20.3. Какие измерения ещё нужны для Кузбасса	33
10.5. Токсичность отдельных компонентов	20	21. Список литературы и реестр источников	34
11. Клинические и эпидемиологические данные	21	Авторы и участие ИИ	36
11.1. Сердечно-сосудистая система	22	Приложение А. Полный аннотированный реестр источников	36
11.2. Органы дыхания	22		

Номера страниц соответствуют этой сборке. Пункты электронного оглавления кликабельны.



Наталья Зубкова.

ОТ АВТОРА

На одних из общественных слушаний по очередному угольному отвалу я услышала объяснение, которое запомнила надолго. Название предприятия и дату сейчас точно не вспомню. А вот смысл сказанного помню хорошо.

Люди жаловались на угольную пыль. Всё чёрное. Невозможно повесить бельё на улицу сушиться, невозможно спокойно выйти с детьми погулять. И один из руководителей предприятия ответил примерно так:

— Ну что вы переживаете? Это же уголь. Вы же активированный уголь пьёте, когда отравитесь. Наоборот, уголь поглощает всякую дрянь.

Мне стало интересно: он действительно рассчитывал, что люди поверят в пользу угольной пыли? Что вспомнят таблетки из аптечки и перестанут возмущаться тем, чем им приходится дышать? Он говорил с такими честными глазами, что в какой-то момент мне даже стало смешно.

После слушаний я подошла к нему:

— Вы что, всех людей держите за дебилов? Думаете, они не понимают, что вы сказали? Это даже не глупость. Это хамство по отношению к людям, которые живут в этих условиях.

По смыслу он ответил: не нравится — пусть уезжают.

Но как им было уехать? Предприятие подошло к жилым домам, стоимость этих домов упала. Продать их за деньги, на которые можно было бы купить жильё в другом месте, люди не могли. А предприятие выкупать их не собиралось.

Эта история оставила у меня вопрос: что же такого «полезного» находится в пыли, которую предлагают терпеть жителям угольных городов?

При добыче угля в воздухе ведь не только сам уголь. Рядом работают машины, бурят и взрывают породу, перевозят и дробят добытое, складывают отходы. Иногда отвалы горят. Что из всего этого попадает в наши лёгкие? Что мы видим на подоконниках, на снегу, на выстиранном белье — и чего не можем увидеть?

Я решила разобраться, что скрывается за привычным выражением «угольная пыль». Из чего состоит это загрязнение, какого размера бывают частицы и что известно об их воздействии на человека. Особое внимание в этой работе я уделяю ультратонким частицам: чтобы понять, насколько полно видимый чёрный налёт рассказывает нам о воздухе, которым мы дышим.

В объяснении, прозвучавшем на слушаниях, были подменены две совершенно разные вещи. Активированный уголь — специально обработанный сорбент. При некоторых отравлениях его применяют, чтобы связать определённые вещества в

пищеварительном тракте. Это не делает полезным или безопасным вдыхание угольной пыли. Согласно позиции токсикологических обществ, активированный уголь противопоказан, если дыхательные пути пациента не защищены.[42]



Потемневший снег у городской застройки. Киселёвск, 2020 год. Фото: Смогмэн.

1. АННОТАЦИЯ И КЛЮЧЕВЫЕ ВЫВОДЫ

Ультратонкие частицы (UFP) — это рабочая размерная категория аэрозоля, обычно охватывающая частицы диаметром менее 100 нм. Их чаще характеризуют не массой, а концентрацией по числу частиц (PNC), распределением по размерам (PNSD) или площадью поверхности. UFP и PM_{2.5} — не взаимоисключающие категории: ультратонкие частицы могут попадать в собираемую фракцию PM_{2.5}, но массовое измерение PM_{2.5} не показывает, сколько таких частиц находится в воздухе. Большое число UFP может давать малую массу.[1]

Угольная производственная цепочка создаёт несколько разных аэрозолей. Механическое разрушение породы даёт минеральную и угольную пыль; дизельная техника — преимущественно горючий наноаэрозоль; взрывные работы — смесь газов, сажи и минеральных частиц; высокотемпературное сжигание — сажу, летучую золу и конденсационные частицы; коксование — сложную смесь частиц, полициклических ароматических углеводородов и газов. Эти источники нельзя объединять в единый «угольный UFP» без уточнения процесса.

Мелкая и субмикронная зольная фракция в ряде систем обогащена летучими и полулетучими элементами, включая мышьяк, селен, сурьму и кадмий. Для отдельных конфигураций показано обогащение частиц ртутью в диапазоне менее 20 нм. Однако большая часть таких данных относится к субмикронной фракции или

PM₁, а не строго к UFP <100 нм. Химический отпечаток угля — не один элемент и не одно органическое соединение, а сочетание размеров, элементов, органических маркеров, морфологии, метеорологии и модели источников.

Для ряда угольных смесей и условий воздействия серьёзный вред здоровью документирован прямо. К ним относятся бытовое сжигание отдельных видов угля в Сюаньвэе, хронические отравления мышьяком и фтором в Гуйчжоу, канцерогенные коксохимические воздействия, а также профессиональная угольная и минеральная пыль у шахтёров.[9][31][32][33][36][37] Эти выводы относятся к конкретным видам топлива, процессам, путям поступления и условиям воздействия.

Отдельный вопрос — какую долю этого вреда создают именно частицы менее 100 нм. Систематические обзоры общей UFP-эпидемиологии наиболее последовательно связывают краткосрочное воздействие с изменениями воспалительных и сердечно-сосудистых показателей.[19] Для долгосрочной смертности, деменции, диабета и репродуктивных исходов вклад UFP трудно отделить от PM_{2.5}, NO₂, чёрного углерода и других компонентов смеси. Поэтому отдельный эпидемиологический коэффициент риска именно для UFP угольной цепочки пока не рассчитан. Это ограничение не отменяет установленного вреда перечисленных угольных смесей.

ВОЗ не установила числового норматива качества воздуха для UFP, но выпустила рекомендации по мониторингу PNC.[1] Директива ЕС 2024/2881 предусматривает измерение UFP на станциях расширенного фонового мониторинга и в местах ожидаемых высоких концентраций, но не задаёт предельного значения.[40] В действующих массовых стандартах США и России отдельного норматива числовой концентрации UFP нет.[38][39] Это означает, что привычные данные по PM_{2.5} и PM₁₀ не дают полного ответа о численности ультратонких частиц. Отсутствие отдельного норматива UFP не означает, что угольный дым или пылегазовая смесь безопасны: их компоненты и конкретные сценарии воздействия оцениваются по собственной доказательной базе.

Краткий итог по уровням доказательности

Вопрос	Итог	Уровень
Документирован ли серьёзный вред отдельных угольных смесей и воздействий?	Да: для бытового дыма определённых углей, коксохимических воздействий и профессиональной угольной и минеральной пыли	A/B в зависимости от воздействия
Образуются ли UFP при высокотемпературном сжигании угля?	Да, прямо показано размерными измерениями	A
Могут ли числовые выбросы сохраняться после высокoeffективной массовой очистки?	Да, в изученных конфигурациях; величина зависит от технологии и метода измерения	B
Есть ли UFP в угольной добыче?	Да для дизельного аэрозоля; по взрывам и дроблению именно угля прямой корпус узок	B/C
Можно ли определить угольный источник по одному As, Se или пицену?	Нет: нужна совокупность признаков	A

Вопрос	Итог	Уровень
Есть ли универсальный химический профиль UFP угольной цепочки?	Единого профиля для всех углей и технологий не установлено	U
Известен ли отдельный хронический риск болезней именно от UFP угольной цепочки?	Отдельный вклад UFP пока нельзя количественно отделить от PM2.5, газов, дизельного аэрозоля, кремнезёма и других компонентов; вред ряда угольных смесей при этом установлен	U/C для отдельного вклада UFP
Есть ли основания мониторить PNC и размерный спектр рядом с источниками?	Да	A/B



Архивный видеокادر «Киселёвск. Город “чистого” угля». Киселёвск, 2020 год. Фото: Смогмэн.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ ОБЗОРА

2.1. Исследовательский вопрос

Обзор отвечает на вопрос: что достоверно известно об образовании, составе, переносе, воздействии на человека и контроле ультратонких частиц, связанных с добычей, переработкой и сжиганием угля, и где выводы основаны не на прямых данных о частицах менее 100 нм, а на субмикронной фракции, PM₁, PM_{2.5}, дизельных или городских аэрозолях?

2.2. Корпус и стратегия поиска

Использовались PubMed/PMC, WHO, IARC, EU/JRC, US EPA, NIOSH/CDC, UNSCEAR, ASTRIS, издательские страницы журналов и российские нормативные источники. Приоритет отдавался первичным размерно-разрешённым измерениям, систематическим обзорам и официальным научным оценкам. Нарративные обзоры применялись для навигации и механистического контекста, но не заменяли первичные работы там, где они доступны.

Период не ограничивался формально: для исторических медицинских и угольных кейсов включались старые первичные работы, а нормативный статус и систематические обзоры проверялись на дату среза. Поиск вёлся на английском и русском языках; международный корпус включил исследования из США, Китая, Финляндии, Португалии, Австралии и европейских программ мониторинга. Рабочий журнал поиска начат 12 октября 2026 года; в нём сохранены, например, запросы `coal combustion ultrafine particle size distribution` И `ultrafine particles systematic review epidemiology`.

2.3. Критерии включения

Включались работы, если они:

- указывали фактический размерный диапазон или метрику частиц;
- описывали конкретный процесс угольной цепочки либо валидную сравнительную экспозицию;
- давали воспроизводимую методику измерения, медицинский дизайн или официальную оценку;
- позволяли отделить наблюдение от авторской интерпретации;
- сообщали ограничения, необходимые для оценки причинности.

Работы по PM_{2.5}, PM₁, общей пыли, дизелю и городскому аэрозолю включались только как явно маркированная косвенная база. Публикации, не позволяющие определить размер или объект исследования, не использовались для UFP-специфичного вывода.

2.4. Размерные метки

Каждое утверждение относится к одной из категорий: UFP < 100 нм; PNC/PNSD с указанным диапазоном; субмикронные частицы; PM₁; PM_{2.5}; иная фракция или общая пыль; аналогия.

UFP и PM_{2.5} могут находиться в одной пробе, но описывают её по-разному. Верхняя размерная граница PM_{2.5} — 2,5 мкм, то есть в 25 раз больше верхней границы UFP 0,1 мкм. Это сравнение относится именно к границам категорий, а не означает, что любая частица PM_{2.5} в 25 раз крупнее любой UFP. Кроме того, PM_{2.5} задают по

аэродинамическому диаметру, тогда как приборы для UFP часто определяют размер по электрической подвижности. Для частиц сложной формы и плотности эти величины могут не совпадать.

2.5. Шкала доказательности

- **A — прямые сильные:** несколько согласующихся исследований нужного размера/исхода или авторитетная итоговая оценка.
- **B — прямые ограниченные:** нужный размер или исход измерен, но корпус узок, локализован или неоднороден.
- **C — косвенные:** вывод поддерживают PM₁/PM_{2.5}, субмикронная фракция, дизельные либо городские UFP.
- **D — механизм/гипотеза:** физически или биологически правдоподобно, но прямой сравнительной проверки недостаточно.
- **U — неизвестно:** воспроизводимого ответа корпус не даёт.

Отдельно оценивались смещение загрязнителей, ошибка экспозиции, обратная причинность, переносимость между технологиями и риск усиления причинного вывода.

3. ФИЗИКО-ХИМИЯ UFP

UFP обычно определяют как частицы с диаметром менее 100 нм. Эта граница удобна, но не превращает UFP в однородное вещество. Частица серной кислоты, сажевый агрегат, металлическая сфера и минеральный фрагмент одинакового диаметра различаются по растворимости, форме, заряду, реакционной поверхности и биологическому поведению.

В свежем аэрозоле выделяют нуклеационную моду, моду Айткена и моду накопления. Границы зависят от дисциплины и метода, поэтому в этом обзоре сохраняются определения авторов. Нуклеационные частицы могут возникать при охлаждении и конденсации газов. Затем они растут за счёт конденсации и коагуляции, покрываются органическими и неорганическими веществами и переходят в более крупный диапазон.

Для идеализированных сфер уменьшение размера при той же массе увеличивает суммарную площадь поверхности. В реальном аэрозоле результат дополнительно зависит от агломерации и пористости. Поэтому масса, число, геометрическая площадь и расчётная площадь поверхности, оседающей в лёгких (LDSA), описывают разные свойства и не сводятся к одному «уровню пыли».

У источника UFP быстро меняются. Разбавление может одновременно снижать концентрацию и создавать условия для нуклеации; полуплетучие вещества испаряются или конденсируются; частицы коагулируют. Значение, полученное в горячем неразбавленном дымовом газе, нельзя напрямую сравнить с придорожным или комнатным измерением без описания отбора.

4. Методы измерения

Конденсационные счётчики частиц (CPC) увеличивают наночастицы конденсацией рабочего вещества и затем считают их оптически. Спектрометры подвижности частиц, включая SMPS, разделяют частицы по электрической подвижности и строят распределение по размерам. ELPI использует зарядку и каскадное инерционное разделение, а DMS — электрическую подвижность. Оптические счётчики хорошо работают для более крупных частиц, но не заменяют CPC и SMPS в нижней нанофракции.

Результат зависит от нижней границы измеряемого диапазона. Счётчик от 2,5 нм регистрирует частицы, которых не увидит система от 10 или 20 нм. Учитывают также диффузионные потери в трубках, эффективность и множественную зарядку частиц, влажность, разбавление и летучесть. Сопоставимость результатов требует калибровки и стандартных процедур.

Для источников горения критична схема разбавления. Слишком раннее, холодное или чрезмерное разбавление меняет нуклеацию и конденсацию. Поэтому коэффициенты выброса по числу частиц можно сопоставлять только при учёте методики отбора, а не по одному названию топлива.

Минимальный паспорт UFP-измерения

Поле	Почему необходимо
Нижняя и верхняя границы размера	Определяют, какие частицы вошли в PNC
Прибор и временное разрешение	Влияют на пики и сопоставимость
Место отбора	До/после очистки, труба, рабочая зона, улица, помещение
Температура и разбавление	Меняют образование летучей моды
Метрика	Масса, число, поверхность и LDSA не взаимозаменяемы
Химический анализ	Нужен для различения источников и потенциальной токсичности



Промышленный объект в дымке. Киселёвск, 2020 год. Фото: Смогмэн.

5. Химический отпечаток угля и источники-аналоги

5.1. Не один маркер, а комбинация

Уголь различается по бассейну, зрелости, минеральным примесям, сере и технологии сжигания. Поэтому универсальной частицы, однозначно обозначающей любой угольный источник, не существует. Надёжная атрибуция строится на совокупности признаков и локальных профилях.

5.2. Элементные маркеры

При высоких температурах часть элементов испаряется, а при охлаждении конденсируется на большом числе мелких частиц. Обзоры и первичные работы показывают обогащение субмикронной золы мышьяком, селеном, сурьмой и кадмием; распределение зависит от железа, кальция, серы, температуры и системы очистки.[13] Ртуть может находиться в газовой форме и быть связанной с частицами; в одной системе с разделением по размерам связанная с частицами ртуть была особенно обогащена во фракции менее 0,02 мкм.[14] Свинец, таллий, цинк и другие элементы также способны переходить в мелкие фракции, но ни один из них сам по себе не служит универсальной меткой угля.

Обогащение элемента в мелкой фракции описывает состав выброса. Чтобы оценить воздействие на жителей, дополнительно нужны концентрации у жилья, длительность воздействия и данные о поступившей в организм дозе.

5.3. Минералогия и морфология

Летучая угольная зола часто содержит алюмосиликатные стекловидные сферы, Fe-содержащие и магнетитовые частицы, а также агрегаты наноминералов.

Морфология помогает отличать высокотемпературные сферулы от механически раздробленной пыли, но сходные формы возникают и в других процессах.

Электронная микроскопия и элементный анализ должны интерпретироваться вместе.

5.4. Сера и вторичное образование

SO₂ и другие газовые предшественники способны образовывать сульфатный аэрозоль после выхода из источника. В отдельных угольных установках после мокрой десульфуризации измерялась наномодалая серной кислоты. Исследования воздействия угольной энергетики нередко описывают вторичный PM_{2.5}, образованный из SO₂, а не первичные UFP. Это разные механизмы, и для каждого нужен свой способ измерения.

5.5. Органические маркеры

Неполное сгорание угля создаёт ПАУ, включая бензо[а]пирен, фенантрен, флуорантен, пирен и другие соединения. Пирен используют как один из молекулярных маркеров угольного дыма.[15] Его значение возрастает, когда он рассматривается вместе с другими веществами и локальной моделью источников. Диагностические соотношения ПАУ меняются при старении и смешении аэрозоля, поэтому одного такого отношения недостаточно для атрибуции источника.

5.6. Источники-аналоги

Источник	Полезные признаки	Ограничение
Мазут / тяжёлое топливо	V, Ni, сульфаты	V и Ni встречаются и в иных источниках
Дизель	элементный углерод, гопаны, стераны, присадки масел	Без локальной модели трудно отделить от транспорта
Природный газ	мало минеральной золы; возможны вторичные частицы из оксидов азота и частицы масел/примесей	Газовое сжигание также может создавать частицы

Источник	Полезные признаки	Ограничение
Биомасса	левоглюкозан, современный углерод	Маркер меняется при старении; возможны смешанные печи

5.7. Радионуклиды

UNSCEAR указывает, что естественные радионуклиды концентрируются в зольных остатках; типичный коэффициент обогащения золы составляет около 10 при диапазоне 3–20, а летучие ^{210}Pb и ^{210}Po могут обогащаться в летучей золе. Для типичного человека возле угольной станции мощностью 1 ГВт, работающей один год, оценка индивидуальной дозы от атмосферных выбросов составляет 0,03–0,4 мкЗв в год.[35] Эта оценка относится к заданному сценарию атмосферных выбросов и не описывает автоматически все станции, золоотвалы и пути воздействия.

6. Идентификация источников

Рецепторное моделирование помогает оценить вклад источников в измеренную смесь. Метод PMF выделяет факторы из самих измеренных данных и их неопределённостей. Метод СМВ, напротив, сопоставляет пробу с заранее заданными профилями источников. Результат зависит от качества исходных данных, числа проб, сходства профилей и экспертной интерпретации.

Радиоуглеродный анализ разделяет ископаемый и современный углерод, но сам по себе не различает уголь, нефть и газ. Изотопный анализ способен уточнить происхождение элементов, если известны локальные эталонные составы. Для UFP отдельная проблема — малая масса пробы: высокое число частиц не гарантирует достаточного количества вещества для многокомпонентного химического анализа.

Убедительная цепочка атрибуции включает несколько независимых элементов: размерный спектр, химию, морфологию, направление ветра и время, технологический режим и статистическую модель. Один элемент, одно соотношение ПАУ или одна лишь близость к предприятию для такого вывода недостаточны.



Уступы угольного разреза; на заднем плане видна жилая застройка. Киселёвск, 2020 год. Фото: Смогмэн.

7. Источники и профили выбросов

7.1. Угледобыча

В подземной угольной шахте NIOSH измерял дизельный аэрозоль в диапазоне 5,6–560 нм.[2] Это прямое измерение наноаэрозоля от техники, работающей при добыче угля. Минеральная и угольная респираторная пыль также важна для профессионального риска, но её массовая концентрация сама по себе не показывает долю частиц менее 100 нм.

В подземном хромовом руднике Финляндии приборы nano-SMPS, ELPI и SP-AMS показали PNC от $1,7 \times 10^3$ до $2,3 \times 10^5$ см⁻³; максимальные средние уровни наблюдались у разгрузки и дробилки. Модель PMF связывала значительную часть PM1 с дизелем, а в отдельных точках — со взрывами.[3] Это исследование другого вида рудника, полезное для понимания процессов, но не для прямой оценки угольной пыли.

В работах по Кузбассу из накопленной в снегу пыли рядом с разрезами и Беловской ГРЭС выделяли PM_{0.1}, исследовали состав проб и их действие на клеточные модели.[4][5] Эти результаты подтверждают присутствие осевшей нанодисперсии в смешанной промышленной зоне. Для оценки воздействия на жителей нужны дополнительные измерения в воздухе: временной ряд PNC, персональная экспозиция и разделение вклада источников.

7.2. Переработка и коксование

Дробление и транспорт создают механическую пыль, а горячие процессы и двигатели — более мелкий аэрозоль. Для дробления и обогащения угля опубликованных сопоставимых коэффициентов выброса именно частиц менее 100 нм пока мало.

Коксование создаёт смесь, богатую ПАУ. В рабочей зоне одной коксовой батареи частицы размером до 1 мкм составляли 96,85% числа и 67,01% площади поверхности. [8] Это измерение PM₁: точную долю UFP авторы отдельно не сообщили. IARC относит коксохимическое производство к канцерогенным профессиональным воздействиям; такая оценка относится ко всей смеси, а не только к размерному классу UFP.[9]

7.3. Сжигание на ТЭС

Лабораторные и натурные измерения показывают мультимодальное распределение: ультратонкая мода формируется испарением и последующей нуклеацией/конденсацией, более крупные частицы — механическим переносом и коалесценцией минеральных включений. В пилотной установке пики различались по топливу: для угля около 40–50 нм, для нефти 70–100 нм, для газа 15–25 нм. Это не универсальные значения: режимы разбавления и установка существенно влияли на спектр.

В полевых измерениях Mertens и соавторов прибор ELPI+ регистрировал частицы примерно от 6 нм после систем очистки разных промышленных источников. В изученных угольных установках остаточные наночастицы могли доминировать по числу, часто в виде сернокислотного аэрозоля, несмотря на высокую эффективность удаления массы пыли.[10] Исследование описывает первичный выброс в конкретной схеме отбора; вторичное образование частиц в атмосфере требует отдельной оценки.

7.4. Бытовое сжигание

В полевом исследовании сельского дома с угольной печью измеряли частицы размером 10–420 нм. Медианная суммарная концентрация во всём измеренном диапазоне составила 164 300 частиц/см³, а наиболее многочисленной была фракция 31,6–100 нм.[12] Поэтому число 164 300 нельзя относить только к частицам менее 100 нм. Исследование одного дома показывает возможность очень высокой концентрации и её зависимость от режима печи; для переноса результата на другие дома нужны сопоставимые измерения.

7.5. Нефть и газ

Тяжёлое жидкое топливо может давать частицы, обогащённые ванадием и никелем, а также сернокислотную нуклеационную моду. Газовые турбины в некоторых промышленных измерениях имели низкую первичную массу частиц и PNC, но частицы могут образовываться из масел и примесей, а оксиды азота участвуют во вторичном аэрозоле.[10][16] Сравнение угля, нефти и газа должно охватывать не только дымовую трубу, но и добычу, факельное сжигание и атмосферные превращения.

7.6. Сравнительная таблица

Процесс	Прямо измеренный диапазон	Основной вывод	Уровень для UFP угольной цепочки
Угольный котёл / ТЭС	от единиц нм до микронов	Нуклеационная и зольные моды; высокая технологическая вариабельность	A/B
Бытовая угольная печь	10–420 нм и другие диапазоны	Высокие PNC возможны; режим горения критичен	B
Дизель в угольной шахте	5,6–560 нм	Прямой наноаэрозоль от техники	B
Дробление/взрывы	прямые данные в неугольном руднике	Частицы образуются; сопоставимый угольный коэффициент выброса пока не установлен	C
Коксование	преимущественно PM1 и смешанная экспозиция	Мелкая численно доминирующая фракция и ПАУ	C/U для строгих UFP
Горящие отвалы	наночастицы в материале, отдельные лабораторные аэрозоли	Образуются наноминералы и сажа; воздействие на жителей требует полевых измерений	C/U



Дымящийся участок отвала, общий план. Киселёвск, 2020 год. Фото: Смогмэн.

8. Эффективность очистки

Электрофильтры, рукавные фильтры, скрубберы, системы десульфуризации и мокрые электрофильтры способны удалять большую долю массы частиц. В исследовании китайских электростанций общая эффективность электрофильтров составляла 96,38–99,89%, рукавного фильтра — 99,94%.[11] Минимум эффективности по размеру наблюдался в диапазоне 0,1–1 мкм; у рукавного фильтра эффективность и в этом диапазоне составляла 99,54%. Диапазон 0,1–1 мкм преимущественно лежит выше границы UFP. Локальный минимум на кривой поэтому не означает отсутствия эффективного улавливания.

Высокая эффективность по массе может сочетаться с заметной числовой концентрацией остаточных частиц: масса и число отвечают на разные вопросы. Оценка возможного вреда дополнительно требует сведений о составе, размере, длительности воздействия и осаждении частиц в дыхательных путях.

Мокрая десульфуризация снижает SO_2 , но в отдельных режимах связана с сернокислотными ядрами; WESP способен дополнительно удалять мелкий аэрозоль. Нельзя переносить данные одной технологической цепочки на все станции.



Промышленная территория под широким тёмным шлейфом. Киселёвск, 2020 год. Фото: Смогмэн.

9. Атмосферный перенос и экспозиция

UFP обычно имеют более крутые пространственные градиенты, чем PM_{2.5}: концентрация быстро меняется вблизи дороги, трубы, печи или другого источника. По мере переноса частицы коагулируют, растут и меняют состав. Поэтому один городской пост может плохо описывать личную экспозицию.

Для оценки нужны стационарные PNC/PNSD-наблюдения, мобильные маршруты, персональные датчики, метеорология, временная активность источников и модели рассеивания. В помещении экспозиция определяется проникновением извне, фильтрацией здания и внутренними источниками — приготовлением пищи, свечами, курением и отоплением.

Доза в дыхательных путях зависит не только от наружной PNC, но и от времени, вентиляции лёгких, размера и гигроскопичности частиц. Для сравнения исследования должны сохранять не только концентрацию, но и продолжительность, дыхательный режим и модель депозиции.



Зимняя детская площадка. Киселёвск, 2020 год. Фото: Смогмэн.

10. Токсикология и механизмы вреда

Угольный дым и пылегазовые выбросы действуют как смеси. В них могут одновременно присутствовать частицы разных размеров, ПАУ, металлы, сульфаты, кремнезём и газы. Токсичность ряда этих компонентов и тяжёлые последствия некоторых угольных воздействий установлены независимо от того, удалось ли в конкретном исследовании выделить самостоятельную роль UFP.[9][31][32][33][36][37]

10.1. Депозиция — осаждение в дыхательных путях

Депозиция — это осаждение частиц в дыхательных путях. Диффузионное движение позволяет очень малым частицам оседать в носу, бронхах и альвеолах. Доля осевших частиц меняется с размером, способом дыхания, физической нагрузкой, анатомией и состоянием лёгких. В контролируемом исследовании 23-нм углеродных частиц у взрослых с астмой депозиция была выше, особенно при физической нагрузке.[17] Для детей и конкретных угольных смесей величину нужно измерять отдельно.

10.2. Транслокация

Эксперимент с ингалированными золотыми наночастицами у людей и мышей показал, что часть частиц достигает крови; перенос был выше для 5 нм, чем для 30 нм.[18] Этот опыт подтверждает возможность перехода через лёгочный барьер. Реальное количество для атмосферной угольной смеси зависит от состава, растворимости и поверхности частиц.

Обонятельный путь в мозг показан у грызунов с мечеными наночастицами.[24] Его количественное значение для человека ещё изучается. Частицы чёрного углерода и наноагрегаты обнаруживали в человеческих плацентах.[27][28] Эти исследования показывают возможность переноса частиц, но не определяют клинический исход и источник конкретной частицы.

10.3. Окислительный стресс и воспаление

Большая реакционная поверхность, переходные металлы, хиноны и ПАУ способны участвовать в образовании активных форм кислорода. Клеточные и животные модели показывают запуск воспалительных путей, нарушение функции эндотелия, изменения свёртывания крови и повреждение генетического материала. В опытах с разделённой по размерам летучей золой воспалительный потенциал зависел не только от размера, но и от состава, включая биодоступное железо.[4][5]

Эти эксперименты показывают биологически правдоподобные механизмы повреждения. Для перехода от клеточного ответа к количественной оценке риска заболевания у людей дополнительно нужны реальные концентрации и длительность воздействия. Одинаковая масса разных аэрозолей может иметь неодинаковую биологическую активность.

10.4. «Троянский конь» как ограниченная метафора

На поверхности частиц могут переноситься ПАУ, сульфаты и металлы; захват частицы клеткой меняет место и скорость доставки этих компонентов. При этом вещества могут отделяться от поверхности, растворяться и химически превращаться. Метафора «тройского коня» помогает представить смесь, но реальный риск определяют биодоступность и доза.

10.5. Токсичность отдельных компонентов

Опасность угольного аэрозоля определяется не только размером частиц, но и их химическим составом. Бензо[а]пирен и ряд других ПАУ входят в систему канцерогенных оценок IARC.[9] Хроническое воздействие мышьяка связано с

онкологическими и сосудистыми последствиями; в Гуйчжоу тяжёлые отравления были связаны с бытовым использованием угля с высоким содержанием мышьяка.[31] Избыток селена токсичен, хотя селен одновременно является необходимым микроэлементом.[44] Свинец поражает прежде всего нервную систему, особенно у детей, а ртуть способна вредить нервной, пищеварительной и иммунной системам, лёгким и почкам.[45][46]

Канцерогенность или токсичность вещества — установленное свойство соответствующего воздействия, но индивидуальный риск зависит от концентрации, химической формы, пути поступления и длительности контакта. Поэтому химический анализ принципиально важен: одинаковое число частиц разного состава может означать разную токсическую нагрузку.



Зимний каток; на заднем плане — дым от угольной котельной. Киселёвск, 2020 год. Фото: Смогмэн.

11. Клинические и эпидемиологические данные

Клинические и эпидемиологические исследования отвечают на два разных вопроса. Первый — причиняют ли вред загрязнение частицами и конкретные угольные смеси. Для ряда воздействий ответ положительный. Второй — какова самостоятельная доля UFP после учёта остальных компонентов. Именно этот отдельный вклад во многих исходах ещё нельзя надёжно количественно оценить.

11.1. Сердечно-сосудистая система

Систематический обзор 2019 года нашёл наиболее последовательные краткосрочные связи UFP с вариабельностью сердечного ритма, артериальным давлением и маркерами системного воспаления.[19] Контролируемые экспозиции обнаруживали изменения реполяризации, функции эндотелия или активности тромбоцитов.

Для инфаркта, инсульта и долгосрочной сердечно-сосудистой смертности база PM_{2.5} значительно сильнее, чем база UFP. После учёта NO₂, чёрного углерода и PM_{2.5} результаты для PNC различаются между исследованиями.[19] Итоговая оценка: **В** для отдельных краткосрочных маркеров; **С/У** для UFP угольной цепочки и долгосрочных клинических событий.

11.2. Органы дыхания

Общая база по UFP поддерживает краткосрочное раздражение и воспалительные изменения, но результаты исследований функции лёгких различаются. Канадская когорта из 160 641 рождения и американская когорта сообщили связь пренатальной экспозиции UFP с детской астмой.[21][22] В когорте PIAMA связь ослабла после учёта NO₂ и показателя поглощения света PM_{2.5}. [23] Копенгагенское исследование по схеме «случай — контроль во времени» выявило краткосрочную связь UFP с госпитализациями детей по поводу астмы.[20]

Профессиональная угольная и минеральная пыль связана с хроническими заболеваниями лёгких у шахтёров.[33] Для общей РМ также накоплена сильная база по ХОБЛ и хроническому бронхиту. В этих смесях самостоятельный долгосрочный вклад UFP пока не отделён от более крупных частиц, кремнезёма, дизельного аэрозоля и газов.

11.3. Онкология

IARC классифицирует загрязнение наружного воздуха и содержащиеся в нём частицы, дизельный выхлоп, выбросы от бытового сжигания угля и коксохимическое производство как канцерогенные для человека в соответствующих оценках.[9][36] Эта классификация относится к названным смесям и воздействиям. UFP как единый размерный класс отдельной такой классификации не имеют.

В монографии IARC 1997 года угольная пыль относилась к группе 3 — «не классифицируется по канцерогенности для человека»; позднее консультативная группа рекомендовала приоритетную переоценку, но сама рекомендация не меняет классификацию.[9] Кристаллический кремнезём и отдельные химические вещества имеют собственные оценки.

11.4. Нервная система и когнитивные функции

В исследовании Medicare использовали моделируемую экспозицию UFP за 2017 год, а новые диагнозы деменции отслеживали в 2018–2020 годах. Авторы сообщили небольшую положительную связь.[25] В проспективной когорте АСТ из 4 283 участников после учёта нескольких загрязнителей повышения риска не обнаружили.[26] Эти результаты расходятся; на вывод влияют модель экспозиции и сопутствующие загрязнители. Отдельных исследований деменции именно для UFP угольной цепочки в корпусе нет.

11.5. Беременность и дети

Для PM_{2.5} существуют многочисленные данные о связи с преждевременными родами и низкой массой тела.[29] Исследований UFP меньше, а модели экспозиции различаются. Обнаружение чёрного углерода на плодовой стороне плаценты подтверждает, что частицы могут достигать этой ткани.[27] Для оценки клинического риска и вклада угля нужны исследования, где одновременно измерены источник, размер частиц и исход беременности.

11.6. Метаболические нарушения

В контролируемом исследовании UFP у людей с диабетом 2 типа наблюдались временная активация тромбоцитов и возможная реакция эндотелия.[30] Исследование проверяло сосудистый ответ у уже заболевших людей, а не возникновение диабета или ожирения. Поэтому метаболические исходы остаются областью продолжающихся исследований.

11.7. Смертность

Загрязнение воздуха частицами связано с преждевременной смертностью в более широкой доказательной базе по PM.[1] Для UFP результаты менее устойчивы: исследования различаются по измеряемому размерному диапазону, модели экспозиции и набору учитываемых загрязнителей.[19] Поэтому имеющийся корпус не позволяет рассчитать отдельную величину риска смертности именно от UFP угольной цепочки.



Дым, выходящий между обломками породы. Киселёвск, 2020 год. Фото: Смогмэн.

12. Специфические угольные кейсы

12.1. Сюаньвэй

В Сюаньвэе высокий риск рака лёгкого у некурящих женщин связан с бытовым сжиганием определённых «дымных» углей. В исследовании «случай — контроль», включавшем 1 015 случаев и 485 женщин контрольной группы, риск был связан с группами ПАУ и NO₂.^[37] Минералогические и размерные работы показывают присутствие наноконпонентов и сильную зависимость выбросов от топлива и устройства печи.

Это сильный пример канцерогенности бытовой угольной смеси и важный материал о химии выбросов. Исследование оценивало смесь, а не отдельную PNC или фракцию менее 100 нм. Поэтому оно подтверждает опасность конкретного угольного дыма, но не даёт отдельного коэффициента риска для UFP.

12.2. Гуйчжоу

Хроническое отравление мышьяком в угольных районах Гуйчжоу включало несколько путей поступления: основная доля в оценке источников приходилась на загрязнённую пищу, меньшая — на воздух, малая — на воду.^[31] Флюороз также был

связан с сушкой и хранением пищи над угольными очагами и минеральными примесями.[32]

Этот случай прямо показывает, что химический состав топлива и бытовая практика способны создавать тяжёлое хроническое воздействие и заболевание.[31][32]

Исследования описывают несколько путей поступления веществ; самостоятельная доля ингаляционных UFP в этом вреде отдельно не рассчитывалась.

12.3. Жители вокруг ТЭС и коксохимии

Систематический обзор исследований населения возле угольных ТЭС описал респираторные, детские, перинатальные и другие исходы.[47] Закрытие отдельных объектов или внедрение очистки в части работ создавало условия естественного эксперимента. Экспозицию чаще задавали близостью, PM_{2.5} или смесью загрязнителей: эти результаты относятся к воздействию угольной энергетики в целом, а самостоятельный вклад UFP в них не рассчитывался.

Когорты работников коксовых батарей и оценки IARC подтверждают канцерогенность сложного профессионального воздействия.[9] В него одновременно входят ПАУ, летучие вещества каменноугольной смолы, частицы и газы; вклад UFP в этих исследованиях отдельно не рассчитан.

12.4. Горящие отвалы и шахтные пожары

Материаловедческие исследования обнаружили углеродные наночастицы и наноминералы в горящих угольных отходах.[6] Лабораторные работы показывают, как с температурой самовозгорания меняется сажа.[7] Для оценки воздействия на жителей нужны длительные измерения PNC и PNSD у жилья, химическая атрибуция источника и персональные измерения. Уже установлено главное: горящий отвал создаёт не только механическую пыль — к ней добавляются газообразные продукты горения и образующийся аэрозоль.

13. Профессиональная медицина

У шахтёров хорошо документированы угольный пневмокониоз, прогрессирующий массивный фиброз, снижение функции лёгких и хроническая обструктивная болезнь лёгких.[33] Эти заболевания прежде всего связаны с респираторной угольной и минеральной пылью, включая кристаллический кремнезём. Профессиональный вред установлен; отдельная доля UFP в нём требует размерно-разрешённых данных.

Дизельная техника добавляет наноаэрозоль, богатый элементарным углеродом. Исследование дизельного выхлопа среди шахтёров проводилось в неугольных шахтах и подтвердило связь профессионального воздействия дизельного выхлопа с раком лёгкого.[34] Для угольных шахт это прямое предупреждение о дизельном компоненте смеси; оно не определяет вклад собственно угольных UFP.

Коксохимические профессиональные воздействия признаны канцерогенными.[9] Работники ТЭС и коксохимии подвергаются смеси пыли, ПАУ, металлов и газов. Чтобы оценить вклад каждого компонента, исследования учитывают стаж, рабочие задачи, средства защиты и «эффект здорового работника» — систематическое отличие работающей группы от населения в целом.



Карьерная техника и жилая застройка в одном поле зрения. Киселёвск, 2020 год. Фото: Смогмэн.

14. Уязвимые группы

Дети имеют развивающиеся лёгкие и более высокую минутную вентиляцию относительно массы тела; пожилые и люди с сердечно-сосудистыми или респираторными заболеваниями могут иметь меньший физиологический резерв. Беременность создаёт особое окно воздействия, а работники способны получать более высокие профессиональные дозы. Для каждой группы нужны измерения, соответствующие её реальным условиям.

Экспозиция — это воздействие загрязнителя на человека во времени. Жители рядом с разрезами, ТЭС, коксохимией и домами с печным отоплением могут одновременно сталкиваться с несколькими источниками. Социальные условия, качество жилья, вентиляция и доступ к медицине способны менять и уровень воздействия, и последствия для здоровья.

15. Отделение эффекта UFP от PM2.5

UFP и PM2.5 могут иметь общие источники, но их концентрации не всегда одинаково меняются в пространстве и времени. Многополлютантная модель проверяет, сохраняется ли связь с UFP после учёта NO₂, PM2.5, чёрного углерода и шума. Если показатели тесно связаны между собой, статистическая неопределённость возрастает.

Наиболее информативные исследования сочетают внутригородскую модель UFP, повторные измерения, данные о перемещениях людей, персональный мониторинг и маркеры конкретных источников. Наблюдения до и после закрытия источника или внедрения очистки особенно полезны, если учтены другие изменения, происходившие в то же время.

Различия между исследованиями астмы, а также между результатами Medicare и АСТ по деменции показывают, зачем нужны модели с несколькими загрязнителями и точное описание экспозиции.



Открытая выемка за частными домами. Киселёвск, 2020 год. Фото: Смогмэн.

16. Нормативная база

16.1. ВОЗ

Рекомендации ВОЗ по качеству воздуха 2021 года не установили числовой норматив UFP: имеющихся данных было недостаточно для надёжной функции «концентрация — ответ». Вместо этого ВОЗ рекомендовала мониторить PNC с нижней границей измерения не выше 10 нм, развивать пространственные сети и сокращать выбросы. [1] Условно низким названо 24-часовое значение менее 1 000 частиц/см³, высоким — более 10 000 частиц/см³; для часового среднего высоким считается уровень более 20 000 частиц/см³. Это ориентиры для описания уровней, а не ПДК и не установленный безопасный порог.

16.2. Европейский союз

Директива ЕС 2024/2881 предусматривает мониторинг UFP на станциях расширенного фоновых наблюдения и в местах ожидаемых высоких концентраций, включая транспортные, промышленные, портовые и аэропортовые зоны.[40] Срок переноса соответствующих положений в национальное законодательство — 11 декабря 2026 года. Это требование директивы, а не утверждение, что сеть уже полностью развёрнута во всех странах. Предельного значения UFP директива не устанавливает.

16.3. США

Стандарты качества воздуха EPA США нормируют PM_{2.5} и PM₁₀ по массе; отдельного стандарта для UFP или PNC нет.[39] UFP рассматриваются в научной базе по загрязнению частицами, но отдельное предельное значение не установлено.

16.4. Россия

СанПиН 1.2.3685-21, глава I, таблица 1.1, в редакции от 24 декабря 2025 года содержит массовые нормативы PM_{2.5}, PM₁₀ и отдельных веществ. В этой таблице отдельного норматива числовой концентрации UFP нет.[38] Проверка выполнена 12 октября 2026 года. Стандарты, описывающие наноаэрозоли рабочей зоны и методы их оценки, не заменяют норматив для атмосферного воздуха населённых мест.

17. Сводная оценка доказательности

Для чтения этого раздела важна одна граница. Опасность ряда угольных смесей уже установлена: бытовой дым отдельных углей связан с раком лёгкого и хроническими отравлениями, коксохимические воздействия признаны канцерогенными, а угольная и минеральная пыль вызывает тяжёлые профессиональные заболевания.[9][31][32][33][36][37] Таблица ниже оценивает более узкий вопрос — насколько уверенно можно выделить самостоятельный вклад UFP внутри этих смесей.

17.1. По исходам здоровья: самостоятельный вклад UFP

Исход	Прямые данные по UFP	Дополнительная база	Итог для UFP угольной цепочки
Лёгочное и системное воспаление	наиболее последовательный краткосрочный сигнал	PM2.5, дизельный аэрозоль, токсикология летучей золы	C
Давление и вариабельность сердечного ритма	повторяющиеся краткосрочные изменения; величина эффекта различается	сильная общая база по PM	C
Инфаркт и инсульт	самостоятельный вклад UFP пока не выделен устойчиво	сильная база по PM2.5	U/C
Астма	несколько положительных исследований; часть связей ослабла после учёта других загрязнителей	PM2.5 и NO ₂	U/C
ХОБЛ	отдельный вклад UFP не рассчитан	установленный вред профессиональной угольной пыли; данные по дизелю	U/C
Рак лёгкого	UFP как размерный класс отдельно не классифицированы	доказана канцерогенность ряда конкретных смесей и агентов	U/C
Деменция	крупные исследования расходятся	PM2.5	U
Беременность/дети	меньше прямых работ	PM2.5 и плацентарная механика	U/C
Диабет и ожирение	механизм и отдельные ассоциации изучаются	растущая база по PM2.5	U/D

17.2. По веществам

Компонент	Что установлено	Что требуется для оценки воздействия на людей
Мышьяк и селен	обогащение мелкой и субмикронной золы в ряде систем	размерно-разрешённые измерения у жилья и персональная доза
Ртуть	обогащение связанной с частицами ртути в отдельной системе	вклад UFP в общую экспозицию ртути
ПАУ	перенос на частицах и сильные данные по угольному дыму	раздельная оценка UFP и остальных компонентов смеси
Кремнезём	сильный профессиональный риск респираторной фракции	распределение по размерам и вклад UFP
Сульфаты	первичное и вторичное образование, наномода в отдельных установках	сочетание химического состава с числовым спектром частиц
Радионуклиды	обогащение зольных остатков	оценка конкретной станции и всех путей воздействия

18. Ограничения и неопределённости

- 1. Размерная несопоставимость.** Многие угольные исследования используют PM₁ или PM_{2.5}. В обзоре они служат дополнительной базой, а не прямой заменой измерений UFP.
- 2. Технологическая неоднородность.** Уголь, котёл, печь, очистка и отбор радикально меняют спектр.
- 3. Малая масса UFP.** Химический анализ требует накопления и может терять временные пики.
- 4. Смешение источников.** Дизель, дороги, отопление и вторичная химия сосуществуют с угольным источником.
- 5. Экспозиционная ошибка.** Центральный монитор не всегда описывает адрес или персональную дозу.
- 6. Сопутствующие загрязнители.** UFP связаны с NO₂, чёрным углеродом и другими показателями; при тесной корреляции статистическое разделение их эффектов затруднено.
- 7. Перенос токсикологии.** Высокие клеточные дозы и специально созданные наночастицы отличаются от атмосферной смеси.
- 8. Профессиональное и бытовое воздействие.** Шахтные концентрации и состав требуют отдельной оценки и не служат прямой оценкой для жителей.
- 9. Российский пробел.** Репрезентативного публичного PNC/PNSD ряда для угольных городов Кузбасса не найдено.

10. Публикационная дата. Новые нормативы и исследования после 12 октября 2026 года в обзор не включены.

19. Выводы и рекомендации

Отсутствие отдельного норматива или коэффициента риска для UFP не позволяет считать угольное загрязнение безопасным. Для ряда конкретных воздействий — бытового дыма от отдельных видов угля, коксохимических смесей, профессиональной угольной и минеральной пыли, а также дизельного выхлопа — серьёзные последствия для здоровья документированы.[9][31][32][33][34][36][37]

Неопределённость относится к более узкому вопросу: какую часть общего риска создают именно частицы менее 100 нм после отделения PM_{2.5}, газов, кремнезёма, ПАУ, металлов и других компонентов. Ответ требует измерения числа и размеров частиц одновременно с химическим анализом и данными о воздействии.

Для регуляторов

- Дополнить массовый PM-мониторинг PNC/PNSD с документированной нижней границей размера.
- Выбирать точки у ожидаемых максимумов и фоновые точки, а не заменять одну другой.
- Публиковать сырые временные ряды, метаданные приборов, QA/QC и сопутствующую метеорологию.
- Разделять первичные и вторичные частицы, профессиональную и жилую экспозицию.

Для промышленности

- Оценивать систему контроля одновременно по массе, числу и размерному спектру.
- Проводить измерения до и после каждого элемента очистки в стабильных и переходных режимах.
- Включать дизельную технику, взрывы, дробление, отвалы и нештатное горение в инвентаризацию.
- Вместе с эффективностью по массе публиковать числовую эффективность и распределение остаточных частиц по размерам.

Для врачей и общественного здоровья

- Учитывать комплексную экспозицию, а не искать «болезнь от одной частицы».
- Не смешивать профессиональные заболевания шахтёров с рисками жителей.
- Сообщать уровень доказательности и возможные сополлютанты.

Для исследователей

- Проводить долгосрочные исследования с локальным и персональным измерением UFP и атрибуцией угольных источников.
- Сочетать PNC/PNSD, химию, PMF/CMB, метеорологию и технологические журналы.
- Публиковать нулевые результаты и анализы чувствительности.
- Создать сопоставимый российский корпус для Кузбасса.

Для жителей

НЕРА-фильтры улавливают частицы не по принципу «сита»: для самых малых частиц важную роль играет диффузия, для более крупных — перехват и инерция.[43] Бытовая фильтрация способна снижать концентрацию частиц в комнате, включая UFP, но не удаляет все газы и не устраняет источник.[41] Очиститель подбирают по производительности для объёма комнаты; устройств, намеренно создающих озон, следует избегать. Если снаружи виден дым, ощущается сильный запах горения или наблюдается явный выброс, разумно сократить пребывание на улице, закрыть окна на время эпизода и по возможности включить фильтрацию. Для такой меры предосторожности не требуется сначала определить лабораторный состав дыма.

Авторский итог

После тех слушаний у меня остался простой вопрос: что на самом деле находится в пыли, которую людям предлагают терпеть? Исследования отвечают на него достаточно ясно, чтобы не считать эту пыль «полезной». Угольная цепочка создаёт не одно вещество, а смесь: механическую пыль, дизельный аэрозоль, продукты взрывов и горения, сажу, ПАУ, металлы и вторичные частицы. Самые маленькие частицы нельзя оценить по одному чёрному налёту или по массе PM_{2.5}. Их нужно считать, измерять по размерам и исследовать химически.

Научная осторожность здесь означает точность, а не бездействие. Там, где данных о конкретном городе не хватает, нужны измерения. Без такого мониторинга часть воздействия остаётся неучтённой в официальной статистике, а жители не получают полной картины загрязнения.

20. Приложения

20.1. Как читать результат измерения

Перед интерпретацией проверить: диапазон размера; метрику; единицы; прибор; место; длительность; разбавление; влажность; химический анализ; контроль фона; сополлютанты.

20.2. Мини-гlossарий

- **UFP** — ультратонкие частицы, обычно менее 100 нм.
- **PNC** — концентрация по числу частиц, обычно частиц/см³.
- **PNSD** — распределение числа частиц по размерам.
- **PM_{0.1}** — массовая фракция с аэродинамическим диаметром до 0,1 мкм; близка к UFP по границе, но задаётся другой метрикой.
- **PM₁ / PM_{2.5} / PM₁₀** — массовые фракции до соответствующего аэродинамического диаметра.
- **LDSA** — оценка площади поверхности, оседающей в лёгких.
- **Нуклеация** — образование новых частиц из газовых молекул.
- **Коагуляция** — слипание частиц, уменьшающее число и увеличивающее размер.
- **PMF / CMB** — рецепторные модели распределения источников.

20.3. Какие измерения ещё нужны для Кузбасса

- Каков среднегодовой PNC/PNSD в жилых районах Кузбасса?
- Какая доля UFP относится к углю, дизелю, отоплению и транспорту?
- Как меняется спектр во время массовых взрывов и самовозгорания?
- Какова индивидуальная накопленная доза жителей и работников?
- Какой клинический риск остаётся после учёта PM_{2.5}, NO₂ и чёрного углерода?

21. Список литературы и реестр источников

1. World Health Organization. 2021. *WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide*. WHO. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>.
2. Bugarski A.D. et al. 2021. *Diesel Aerosols in an Underground Coal Mine*. In: *Proceedings of the 18th North American Mine Ventilation Symposium*. DOI: 10.1201/9781003188476-10; NIOSH Stacks.
3. Saarikoski S. et al. 2019. *Sources and Characteristics of Particulate Matter at Five Locations in an Underground Mine*. *Aerosol and Air Quality Research*, 19, 2613–2624. DOI: 10.4209/aaqr.2019.03.0118.
4. Larionov A. et al. 2022. *Chemical Composition and Toxicity of PM₁₀ and PM_{0.1} Samples near Open-Pit Mines and Coal Power Stations*. *Life*, 12(7), 1047. DOI: 10.3390/life12071047.
5. Leshukov T. et al. 2022. *Fractional Composition and Toxicity Coal-Rock of PM₁₀–PM_{0.1} Dust near an Opencast Coal Mining Area and Coal-Fired Power Station*. *Sustainability*, 14(24), 16594. DOI: 10.3390/su142416594.
6. Ribeiro J. et al. 2010. *Identification of Nanominerals and Nanoparticles in Burning Coal Waste Piles from Portugal*. *Science of the Total Environment*, 408(23), 6032–6041. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.08.046.
7. Tan B. et al. 2026. *Experimental Study on Emission Characteristics of Soot Particles during Spontaneous Combustion of Coal*. *Fuel*, 403, 136139. DOI: 10.1016/j.fuel.2025.136139.
8. Xie Q. et al. 2015. *Size Distribution Characteristics of Particulate Matter in the Top Areas of Coke Oven*. *Chinese Journal of Industrial Hygiene and Occupational Diseases*, 33(3), 161–165. PubMed 25916437.
9. International Agency for Research on Cancer. Без даты. *Agents Classified by the IARC Monographs*. IARC Monographs. Дата доступа: 12 октября 2026 года. <https://monographs.iarc.who.int/agents-classified-by-the-iarc/>.
10. Mertens J. et al. 2020. *Fine and Ultrafine Particle Number and Size Measurements from Industrial Combustion Processes: Primary Emissions Field Data*. *Atmospheric Pollution Research*, 11(4), 803–814. DOI: 10.1016/j.apr.2020.01.008.
11. Yi H. et al. 2006. *Characteristics of Inhalable Particulate Matter Concentration and Size Distribution from Power Plants in China*. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(9), 1243–1251. DOI: 10.1080/10473289.2006.10464590.
12. Luo Z. et al. 2022. *Impacts of Household Coal Combustion on Indoor Ultrafine Particles—A Preliminary Case Study and Implication on Exposure Reduction*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(9), 5161. DOI: 10.3390/ijerph19095161.
13. Senior C., Granite E., Linak W., Seames W. 2020. *Chemistry of Trace Inorganic Elements in Coal Combustion Systems: A Century of Discovery*. *Energy & Fuels*, 34(12), 15141–15168. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.0c02375.
14. Peng Y. et al. 2021. *Mercury Speciation and Size-Specific Distribution in Filterable and Condensable Particulate Matter from Coal Combustion*. *Science of the Total Environment*, 787, 147597. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147597.
15. Oros D.R., Simoneit B.R.T. 2000. *Identification and Emission Rates of Molecular Tracers in Coal Smoke Particulate Matter*. *Fuel*, 79(5), 515–536. DOI: 10.1016/S0016-2361(99)00153-2.
16. Chang M.-C.O. et al. 2004. *Measurement of Ultrafine Particle Size Distributions from Coal-, Oil-, and Gas-Fired Stationary Combustion Sources*. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 54(12), 1494–1505. DOI: 10.1080/10473289.2004.10471010.
17. Chalupa D.C. et al. 2004. *Ultrafine Particle Deposition in Subjects with Asthma*. *Environmental Health Perspectives*, 112(8), 879–882. DOI: 10.1289/ehp.6851.
18. Miller M.R. et al. 2017. *Inhaled Nanoparticles Accumulate at Sites of Vascular Disease*. *ACS Nano*, 11(5), 4542–4552. DOI: 10.1021/acsnano.6b08551.

19. Ohlwein S. et al. 2019. *Health Effects of Ultrafine Particles: A Systematic Literature Review Update of Epidemiological Evidence*. *International Journal of Public Health*, 64(4), 547–559. DOI: [10.1007/s00038-019-01202-7](https://doi.org/10.1007/s00038-019-01202-7).
20. Bergmann M. et al. 2025. *Short-Term Exposure to Ultrafine Particles and Asthma Hospital Admissions in Children in Copenhagen, Denmark*. *Thorax*, 80(11), 796–802. DOI: [10.1136/thorax-2024-222465](https://doi.org/10.1136/thorax-2024-222465).
21. Lavigne E. et al. 2019. *Spatiotemporal Variations in Ambient Ultrafine Particles and the Incidence of Childhood Asthma*. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 199(12), 1487–1495. DOI: [10.1164/rccm.201810-1976OC](https://doi.org/10.1164/rccm.201810-1976OC).
22. Wright R.J. et al. 2021. *Prenatal Ambient Ultrafine Particle Exposure and Childhood Asthma in the Northeastern United States*. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 204(7), 788–796. DOI: [10.1164/rccm.202010-3743OC](https://doi.org/10.1164/rccm.202010-3743OC).
23. Yu Z. et al. 2022. *Ambient Ultrafine Particles and Asthma Onset until Age 20: The PIAMA Birth Cohort*. *Environmental Research*, 214(1), 113770. DOI: [10.1016/j.envres.2022.113770](https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113770).
24. Oberdörster G. et al. 2004. *Translocation of Inhaled Ultrafine Particles to the Brain*. *Inhalation Toxicology*, 16(6–7), 437–445. DOI: [10.1080/08958370490439597](https://doi.org/10.1080/08958370490439597).
25. Zhu Q. et al. 2025. *Associations between Ultrafine Particles and Incident Dementia in Older Adults*. *Environmental Science & Technology*, 59(11), 5443–5451. DOI: [10.1021/acs.est.4c10574](https://doi.org/10.1021/acs.est.4c10574).
26. Blanco M.N. et al. 2024. *Traffic-Related Air Pollution and Dementia Incidence in the Adult Changes in Thought Study*. *Environment International*, 183, 108418. DOI: [10.1016/j.envint.2024.108418](https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108418).
27. Bové H. et al. 2019. *Ambient Black Carbon Particles Reach the Fetal Side of Human Placenta*. *Nature Communications*, 10, 3866. DOI: [10.1038/s41467-019-11654-3](https://doi.org/10.1038/s41467-019-11654-3).
28. Bongaerts E. et al. 2020. *Translocation of (Ultra)fine Particles and Nanoparticles across the Placenta: A Systematic Review on the Evidence of In Vitro, Ex Vivo, and In Vivo Studies*. *Particle and Fibre Toxicology*, 17, 56. DOI: [10.1186/s12989-020-00386-8](https://doi.org/10.1186/s12989-020-00386-8).
29. Yuan L. et al. 2019. *Maternal Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) Exposure and Adverse Birth Outcomes: An Updated Systematic Review Based on Cohort Studies*. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(14), 13963–13983. DOI: [10.1007/s11356-019-04644-x](https://doi.org/10.1007/s11356-019-04644-x).
30. Stewart J.C. et al. 2010. *Vascular Effects of Ultrafine Particles in Persons with Type 2 Diabetes*. *Environmental Health Perspectives*, 118(12), 1692–1698. DOI: [10.1289/ehp.1002237](https://doi.org/10.1289/ehp.1002237).
31. Liu J. et al. 2002. *Chronic Arsenic Poisoning from Burning High-Arsenic-Containing Coal in Guizhou, China*. *Environmental Health Perspectives*, 110(2), 119–122. DOI: [10.1289/ehp.02110119](https://doi.org/10.1289/ehp.02110119).
32. Guo J. et al. 2021. *Review on Health Impacts from Domestic Coal Burning: Emphasis on Endemic Fluorosis in Guizhou Province, Southwest China*. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 258, 1–25. DOI: [10.1007/398_2021_71](https://doi.org/10.1007/398_2021_71).
33. Almberg K.S., Cohen R.A. 2023. *Modern Coal Miners Have Higher Death Rates from Lung Diseases Than Their Predecessors*. NIOSH Science Bulletin. <https://www.cdc.gov/niosh/bulletin/2023/mining-lung-disease.html>.
34. Attfield M.D. et al. 2012. *The Diesel Exhaust in Miners Study: A Cohort Mortality Study with Emphasis on Lung Cancer*. *Journal of the National Cancer Institute*, 104(11), 869–883. DOI: [10.1093/jnci/djs035](https://doi.org/10.1093/jnci/djs035).
35. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2025. *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2024 Report, Volume II, Scientific Annex B*. United Nations. https://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/publications/UNSCEAR_2024_Annex-B.pdf.
36. International Agency for Research on Cancer. 2010. *Household Use of Solid Fuels and High-Temperature Frying*. IARC Monographs, Volume 95. <https://publications.iarc.who.int/113>.
37. Vermeulen R. et al. 2019. *Constituents of Household Air Pollution and Risk of Lung Cancer among Never-Smoking Women in Xuanwei and Fuyuan, China*. *Environmental Health Perspectives*, 127(9), 097001. DOI: [10.1289/EHP4913](https://doi.org/10.1289/EHP4913).
38. Главный государственный санитарный врач Российской Федерации. 2021. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания», глава I, таблица 1.1; редакция от 24 декабря 2025 года, изменения действуют с 1 марта 2026 года. Дата доступа: 12 октября 2026 года. https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_375839/fa69e15a74de57cbe09d347462434c11fcfeeca/.

39. U.S. Environmental Protection Agency. Без даты. *NAAQS Table*. Дата доступа: 12 октября 2026 года. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>.
40. European Parliament and Council of the European Union. 2024. *Directive (EU) 2024/2881 of 23 October 2024 on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe (Recast)*. *Official Journal of the European Union*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32024L2881>.
41. U.S. Environmental Protection Agency. 2024. *Guide to Air Cleaners in the Home*. EPA 402-F-24-002. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/guide-air-cleaners-home>.
42. Chyka P.A., Seger D. 1997. *Position Statement: Single-Dose Activated Charcoal*. *Journal of Toxicology: Clinical Toxicology*, 35(7), 721–741. DOI: 10.3109/15563659709162569.
43. Alonso M., Alguacil F.J. 2001. *An Introduction to Aerosol Filtration*. *Revista de Metalurgia*, 37(6), 693–712. DOI: 10.3989/revmetalm.2001.v37.i6.536.
44. National Institutes of Health, Office of Dietary Supplements. Без даты. *Selenium: Fact Sheet for Health Professionals*. Дата доступа: 12 октября 2026 года. <https://ods.od.nih.gov/factsheets/Selenium-HealthProfessional/>.
45. World Health Organization. Без даты. *Lead Poisoning and Health*. Дата доступа: 12 октября 2026 года. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>.
46. World Health Organization. Без даты. *Mercury and Health*. Дата доступа: 12 октября 2026 года. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>.
47. Amster E. 2021. *Public health impact of coal-fired power plants: a critical systematic review of the epidemiological literature*. *International Journal of Environmental Health Research*, 31(5), 558–580. DOI: 10.1080/09603123.2019.1674256.

Авторы и участие ИИ

- **Наталья Зубкова** — автор.
- **Сергей Николаевич Северин** — соавтор и редактор.
- **Виктор Андреевич Светлов** — соавтор и исследователь.

При подготовке материала использовались модели OpenAI: ChatGPT — в редакционной и аналитической работе Сергея Николаевича Северина; Codex — в исследовательской и технической работе Виктора Андреевича Светлова. Авторский рассказ, окончательные формулировки и решение о публикации принадлежат Наталье Зубковой.

Приложение А. Полный аннотированный реестр источников

Для каждого источника сохранены фактическая размерная фракция, роль в исследовании и граница допустимого вывода.

1. Определения, измерения и атмосферное поведение

М01 · WHO. *Global Air Quality Guidelines* (2021). <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

Размер / метрика	PNC; нижняя граница ≤10 нм, верхняя не ограничена в good practice statement	Тип	официальный
Роль в исследовании	Определение практики мониторинга UFP; отсутствие численного AQG; различие низких и высоких PNC	Не позволяет	Называть рекомендованные уровни санитарными ПДК

М02 · WHO. Краткое изложение рекомендаций. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345334/9789240034433-eng.pdf>

Размер / метрика	PNC	Тип	официальный
Роль в исследовании	Краткая формулировка good practice statements	Не позволяет	Выводить индивидуальный медицинский риск из одной PNC

М03 · EU Directive 2024/2881. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32024L2881>

Размер / метрика	UFP/PNC	Тип	нормативный акт
Роль в исследовании	Обязательства ЕС по мониторингу UFP на supersites и у источников высоких концентраций	Не позволяет	Утверждать, что ЕС установил предельную концентрацию UFP

М04 · ГОСТ Р 54597-2011 / ISO/TR 27628:2007. https://meganorm.ru/mega_doc/norm/gost-r_gosudarstvennyj-standart/18/gost_r_54597-2011_ISO_TR_27628_2007_natsionalnyy_standart.html

Размер / метрика	наноаэрозоли рабочей зоны	Тип	стандарт
Роль в исследовании	Российская терминология и методы измерения аэрозолей нанодиапазона	Не позволяет	Утверждать наличие российского норматива качества атмосферного воздуха по числу UFP

М05 · СанПиН 1.2.3685-21, ред. от 24.12.2025, с изменениями, действующими в 2026 году. https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_375839/fa69e15a74de57cbe09d347462434c11fcfeeaca/

Размер / метрика	массовые ПДК, включая PM2.5/PM10	Тип	нормативный акт
Роль в исследовании	Действующая на дату среза редакция нормирует массовые концентрации PM2.5/PM10 и вещества; отдельная PNC/UFP-ПДК в разделе атмосферного воздуха не обнаружена	Не позволяет	Подменять отсутствие отдельной UFP-ПДК отсутствием риска; утверждать, что UFP вообще не охватываются более широкими массовыми/вещественными показателями

M06 · HEI Review Panel. <i>Understanding the Health Effects of Ambient Ultrafine Particles</i> (2013). https://www.healtheffects.org/system/files/Perspectives3.pdf			
Размер / метрика	UFP/PNC	Тип	экспертный обзор
Роль в исследовании	Базовая рамка источников, экспозиции, токсикологии и эпидемиологии	Не позволяет	Представлять обзор 2013 года как актуальный итог без новых работ
M07 · Schraufnagel et al. <i>Ultrafine particles: unique physicochemical properties relevant to health and disease</i> (2020). https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7156720/			
Размер / метрика	UFP	Тип	обзор
Роль в исследовании	Число против массы, поверхность, динамика, коагуляция, градиенты у источника	Не позволяет	Давать единое универсальное время жизни UFP для любых условий
M08 · JRC. <i>Overview of ultrafine particles...</i> https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC128188/JRC128188_01.pdf			
Размер / метрика	UFP/PNC	Тип	официальный научный обзор
Роль в исследовании	Определения, приборы, химический состав, нормативные пробелы	Не позволяет	Сводить все частицы 50–100 нм к одному составу
M09 · Wiedensohler et al. Гармонизация mobility particle size spectrometers. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC70396			
Размер / метрика	примерно 20–200 нм	Тип	межлабораторное исследование
Роль в исследовании	Сопоставимость SMPS/MPSS после калибровки и поправок на потери	Не позволяет	Считать данные разных приборов автоматически сопоставимыми
M10 · ACTRIS. <i>Standard procedures for aerosol in-situ measurements</i> . https://www.actris-ecac.eu/files/ACTRIS_standard_procedures_for_aerosol_in-situ_measurements.pdf			
Размер / метрика	PNSD	Тип	техническое руководство
Роль в исследовании	Контроль качества размерных измерений	Не позволяет	Заменять описанием процедуры сведения о реальной экспозиции
M11 · Rissler et al. <i>A work group report on ultrafine particles</i> (2016). https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4976002/			
Размер / метрика	UFP, число/объём/поверхность	Тип	экспертный обзор
Роль в исследовании	Различие метрик и биологическая правдоподобность	Не позволяет	Объявлять одну метрику доказанно лучшей для всех эффектов

M12 · Kreyling et al. / Critical review of lung deposition measurements. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24151837/>

Размер / метрика	размерная депозиция	Тип	критический обзор
Роль в исследовании	Зависимость депозиции от размера, режима дыхания и метода	Не позволяет	Давать одно число депозиции для всего диапазона UFP

M13 · HEI workshop on metrics. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27801854/>

Размер / метрика	масса/число/поверхность	Тип	экспертная работа
Роль в исследовании	Метрики описывают разные свойства аэрозоля	Не позволяет	Смешивать PNC, массу и площадь поверхности

M14 · Mobile-source ultrafine particles: definitions... <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35530659/>

Размер / метрика	UFP; разные нижние отсеки	Тип	обзор/методология
Роль в исследовании	Показывает зависимость PNC от диапазона прибора	Не позволяет	Сравнивать значения без нижней границы измерения

M15 · US EPA. NAAQS Table. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>

Размер / метрика	PM2.5/PM10 mass	Тип	официальный
Роль в исследовании	Действующие стандарты США перечисляют массовые PM2.5/PM10, без отдельного UFP/PNC NAAQS	Не позволяет	Делать вывод, что UFP безопасны или не исследуются

M16 · US EPA. PM ISA 2019 + 2022 supplement. <https://www.epa.gov/naaqs/particulate-matter-pm-standards-integrated-science-assessments-current-review>

Размер / метрика	PM, включая UFP literature	Тип	официальная научная оценка
Роль в исследовании	Научная база EPA по компонентам/источникам PM и UFP	Не позволяет	Подменять ISA нормативом UFP

2. Угольное сжигание, зола и очистка

C01 · *Measurement of ultrafine particle size distributions from coal-, oil-, and gas-fired stationary combustion sources.* <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15648387/>

Размер / объект	UFP, стационарное сжигание	Тип	первичное
Роль в исследовании	Сравнение трёх видов топлива; влияние разбавления и старения проб	Не позволяет	Универсальный ранжированный итог для всех технологий

C02 · Yi et al. *Full-scale lignite power plant after ESP (2008).* <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ef700527y>

Размер / объект	0,03–10 мкм	Тип	первичное, одна ТЭС
Роль в исследовании	Два численных пика после ESP; UFP могут быть почти незаметны по массе	Не позволяет	Обобщать профиль на все угли и ТЭС

C03 · Ninomiya et al. / **пять китайских ТЭС.** <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17004679/>

Размер / объект	0,03–10 мкм	Тип	первичное, несколько установок
Роль в исследовании	Бимодальное распределение; эффективность ESP/рукавного фильтра; минимум эффективности 0,1–1 мкм	Не позволяет	Переносить проценты на любую систему очистки

C04 · Sun et al. (2014). <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25826918/>

Размер / объект	5,6–560 нм	Тип	лабораторное
Роль в исследовании	Нуклеационные моды при сжигании пылевидного угля	Не позволяет	Называть лабораторный фактор выброса фактором реальной ТЭС

C05 · *Ultrafine ash aerosols from coal combustion: characterization and health effects.* <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S154074890600349X>

Размер / объект	ультратонкая зола	Тип	первичное/обзор механизма
Роль в исследовании	Испарение, нуклеация, конденсация; отличающийся состав ультратонкой моды	Не позволяет	Приписывать всем частицам одинаковый состав и токсичность

C06 · <i>Chemistry of Trace Inorganic Elements in Coal Combustion Systems</i> . https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8048144/			
Размер / объект	субмикронная; в отдельных работах <0,2 мкм	Тип	обзор
Роль в исследовании	As/Se/Sb/Cd и др. в мелких фракциях; роль Fe, Ca, S и типа угля	Не позволяет	Называть все приведённые результаты строго UFP <100 нм
C07 · Wang et al. As/Se in PM1 (2022). https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969722008154			
Размер / объект	PM1	Тип	первичное
Роль в исследовании	Обогащение As/Se и биодоступность в мелкой фракции; различия котлов	Не позволяет	Переносить прямо на UFP или дозу населения
C08 · As/Se speciation in coal fly ash (2021). https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236121001046			
Размер / объект	мелкая зола	Тип	первичное
Роль в исследовании	Химические формы As и Se	Не позволяет	Устанавливать источник городского аэрозоля без receptor analysis
C09 · <i>Formation and control of primary PM from coal combustion</i> . https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10962247.2014.951744			
Размер / объект	три моды	Тип	обзор
Роль в исследовании	Механизмы ультратонкой, промежуточной и крупной моды; очистка	Не позволяет	Представлять модальные границы как одинаковые у всех установок
C10 · ULE plant with ESP+FGD+WESP. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001623611630789X			
Размер / объект	fine PM	Тип	первичное, одна конфигурация
Роль в исследовании	Высокая совокупная очистка и состав остаточных выбросов	Не позволяет	Делать вывод, что UFP полностью устранены
C11 · <i>Fine and ultrafine particle number... industrial combustion processes</i> (2020). https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1309104220300180			
Размер / объект	число частиц после очистки	Тип	полевое, разные установки
Роль в исследовании	Массовое соответствие нормативам не исключает большого числа наночастиц	Не позволяет	Сравнивать установки без учёта метода разбавления и приборов

C12 · Differential pulmonary inflammation of size-fractionated fly ash. https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/10473289.2004.10470906			
Размер / объект	<0,1 / мелкие / крупные	Тип	токсикологическое
Роль в исследовании	Размер и состав меняют воспалительный потенциал	Не позволяет	Объявлять эффект клинически доказанным у людей
C13 · Gasparotto et al. (2013). https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23856402/			
Размер / объект	зола с ультратонкими/наночастицами	Тип	клеточное
Роль в исследовании	Окислительный стресс и воспалительные ответы в макрофагах	Не позволяет	Приписывать эффект только углю: топливо включало 2–3% шин
C14 · Smith et al. IL-8 and iron in fly ash. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10688536/			
Размер / объект	<1 мкм, <2,5 мкм, крупнее	Тип	клеточное
Роль в исследовании	Влияние размера, угля и биодоступного Fe на IL-8	Не позволяет	Называть фракцию <1 мкм UFP
C15 · Nano-mineralogy of coal fly ash. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30711584/			
Размер / объект	5–500 нм	Тип	первичное, материалы
Роль в исследовании	Формы, минералы и потенциально опасные элементы в наночастицах золы	Не позволяет	Доказывать их атмосферную концентрацию или дозу человека
C16 · Impacts of Household Coal Combustion on Indoor Ultrafine Particles (2022). https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9101610/			
Размер / объект	10–420 нм; отдельный анализ 20–100 нм	Тип	полевой case study
Роль в исследовании	Прямое одновременное измерение indoor/outdoor PNC; очень высокий пик при горении угля	Не позволяет	Универсальный профиль любого дома, угля и печи
C17 · Qin et al. Hourly Emission of Submicron PM From Residential Coal Combustion (2026). https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2026JD046630			
Размер / объект	PNC/поверхность, submicron	Тип	первичное + inventory
Роль в исследовании	Различия flaming/smoldering; PNC и lung-deposited surface area	Не позволяет	Превращать модель риска в наблюдаемые болезни

C18 · Bond et al. *Primary particle emissions from residential coal burning* (2002). <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2001JD000571>

Размер / объект	размерные распределения	Тип	первичное
Роль в исследовании	Разные угли дают разные моды/оптические свойства	Не позволяет	Единый профиль бытового угля

C19 · *Significant UFP emissions from residential solid fuel combustion* (2020). <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32023515/>

Размер / объект	UFP	Тип	лаборатория + real-world
Роль в исследовании	Прямые emission factors по числу для угля и биомассы	Не позволяет	Сравнивать числа без одинаковых условий горения

C20 · Xuanwei household coal pollution and fuel efficiency (2021). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749121015311>

Размер / объект	size distribution, PM0.1	Тип	первичное
Роль в исследовании	Угольный источник/печь меняют размерный профиль; improved stoves снижают выбросы	Не позволяет	Приписывать медицинский исход одной размерной фракции

C21 · Xuanwei C1 coal nano-mineralogy. <https://hero.epa.gov/reference/3363746/>

Размер / объект	20–200 нм; PM1	Тип	первичное
Роль в исследовании	Минеральный состав fine/ultrafine emissions конкретного угля	Не позволяет	Общая сигнатура Xuanwei или всех углей

3. Добыча, дизель, переработка, коксование и пожары

D01 · NIOSH. *Diesel aerosols in an underground coal mine*. https://stacks.cdc.gov/view/cdc/215443/cdc_215443_DS1.pdf

Размер / объект	5,6–560 нм (FMPS)	Тип	полевое
Роль в исследовании	Прямые размерные измерения дизельного аэрозоля в угольной шахте	Не позволяет	Приписывать весь аэрозоль угольной пыли

D02 · MSHA. <i>Estimation of Diesel Particulate Concentrations in Underground Mines</i>. https://arlweb.msha.gov/S%26HINFO/TECHRPT/DIESEL/DIESEL3.pdf			
Размер / объект	дизельный РМ	Тип	официальный полевой отчёт
Роль в исследовании	Масштаб профессиональной дизельной экспозиции в шахтах	Не позволяет	Отделять UFP без размерного прибора
D03 · NIOSH workshop on diesel equipment in underground coal mines. https://www.cdc.gov/niosh/docs/82-122/pdfs/82-122.pdf			
Размер / объект	дизель/минеральная пыль	Тип	официальный исторический
Роль в исследовании	Контекст смешанной экспозиции	Не позволяет	Современные уровни или причинность отдельных компонентов
D04 · Coke-oven emissions, NTP Report on Carcinogens. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK590934/			
Размер / объект	смесь пыли, газов, PAH	Тип	официальный обзор
Роль в исследовании	Состав выбросов коксования и канцерогенная опасность экспозиции	Не позволяет	Называть весь эффект следствием UFP
D05 · IARC / NTP on coke production and coal tar exposures			
Размер / объект	смесь	Тип	официальная оценка
Роль в исследовании	Канцерогенность конкретных профессиональных экспозиций	Не позволяет	Переносить классификацию на любую частицу с PAH
D06 · PAHs near modern coke battery. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236114012782			
Размер / объект	TSP/PAH	Тип	полевое
Роль в исследовании	Профили PAH около коксования	Не позволяет	Называть TSP исследованием UFP
D07 · Nanomineralogy... coal fire. https://hero.epa.gov/reference/3356411/			
Размер / объект	nano/UFP в горелых отходах	Тип	материаловедение
Роль в исследовании	Наноминералы и элементы в отходах самовозгорания	Не позволяет	Устанавливать вдыхавшуюся населением дозу

D08 · **Ordos coal mine/waste dump monitoring.** <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2021/ra/d0ra10586d>

Размер / объект	атмосферные загрязнители	Тип	полевое
Роль в исследовании	Контекст шахтных пожаров и отвалов	Не позволяет	Автоматически считать измеренный РМ строгими UFP

D09 · **Saarikoski et al. *Sources and Characteristics of Particulate Matter at Five Locations in an Underground Mine* (2019).** <https://aaqr.org/articles/aaqr-19-03-0a-0118>

Размер / объект	nano-SMPS, ELPI+, OPC; PM1/PM10	Тип	полевое, подземный хромовый рудник
Роль в исследовании	Прямые измерения у дробилки, разгрузки, конвейера и зоны взрывов; PNC $1,7 \times 10^3$ – $2,3 \times 10^5$ см ⁻³ ; PMF связал 35–84% PM1 с дизелем и 7–60% со взрывами	Не позволяет	Называть эти значения угольной шахтой или универсальным фактором выброса; переносить состав PM1 на всё число наночастиц

D10 · **Larionov et al. *Chemical Composition and Toxicity of PM10 and PM0.1 Samples near Open-Pit Mines and Coal Power Stations* (2022).** <https://doi.org/10.3390/life12071047>

Размер / объект	отделённые из снега PM10 и PM0.1	Тип	полевое накопление + in vitro, Кузбасс
Роль в исследовании	Подтверждает наличие отделяемой нанофракции в накопленной пыли у трёх разрезов и Беловской ГРЭС; сравнивает состав и клеточные ответы	Не позволяет	Называть результат мгновенной атмосферной PNC, личной дозой, доказанной долей конкретного предприятия или заболеванием жителей

D11 · **Leshukov et al. *Fractional Composition and Toxicity Coal–Rock of PM10–PM0.1 Dust near an Opencast Coal Mining Area and Coal-Fired Power Station* (2022).** <https://doi.org/10.3390/su142416594>

Размер / объект	осевшая за зиму пыль; 10–0,1 мкм и <0,1 мкм	Тип	полевое накопление + in vitro, Кузбасс
Роль в исследовании	Размерное разделение coal–rock dust возле разрезов и ГРЭС; подчёркивает смешанный вклад добычи, перевозки, отвалов, техники и станции	Не позволяет	Устанавливать источник каждой частицы, концентрацию в воздухе или причинность болезней

D12 · **Xie et al. *Size distribution characteristics of particulate matter in the top areas of coke oven* (2015).** PMID 25916437. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25916437/>

Размер / объект	аэродинамические фракции, преимущественно PM1, не строгий UFP	Тип	полевое, рабочая зона коксовой батареи
Роль в исследовании	96,85% числа и 67,01% площади поверхности приходились на частицы ≤ 1 мкм в обследованной зоне	Не позволяет	Называть PM1 ультратонкими частицами или переносить одну батарею на всю коксохимию

D13 · Ribeiro et al. *Identification of nanominerals and nanoparticles in burning coal waste piles from Portugal* (2010). <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20855106/>

Размер / объект	наноминералы/наночастицы в материале горящего отвала	Тип	материаловедение
Роль в исследовании	Прямо показывает углеродные наночастицы, агломераты и минеральные фазы в горящих угольных отходах	Не позволяет	Устанавливать воздушную PNC, дальность переноса или дозу жителей

D14 · Tan et al. *Experimental study on emission characteristics of soot particles during spontaneous combustion of coal* (2026). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.136139>

Размер / объект	лабораторные частицы самонагревания/горения	Тип	лабораторное
Роль в исследовании	Температурная зависимость выделения и состава сажевых частиц при самовозгорании	Не позволяет	Приравнивать лабораторный реактор к открытому террикону и рассчитывать риск населения

4. Нефть, газ и транспорт как сравнение

001 · González & Rodríguez. *Refinery, ships, traffic*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169809512002633>

Размер / объект	>2,5 нм; PNC	Тип	полевое
Роль в исследовании	Эпизоды UFP от НПЗ и судов, отличие от PM2.5	Не позволяет	Универсальные концентрации для всех НПЗ

002 · *Climate-relevant properties... oil and natural gas combustion*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231006000410>

Размер / объект	размерный спектр	Тип	первичное, один котёл
Роль в исследовании	Масса газа ниже обнаружения не означает нулевое число; масло даёт UFP-пик	Не позволяет	Общий вывод о любой газовой установке

003 · *Natural-gas turbine PM2.5/UFP*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231015305550>

Размер / объект	UFP/PM2.5	Тип	первичное, 100 МВт
Роль в исследовании	Высокое число наночастиц в выхлопе современной турбины	Не позволяет	Сравнивать с углём без одинаковой методики

004 · Natural gas/biogas/biomethane UFP. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.8b04170			
Размер / объект	UFP	Тип	первичное
Роль в исследовании	Полулетучая и нелетучая доли, вторичный аэрозоль, роль S/силоксанов	Не позволяет	Говорить, что газ «не создаёт частиц»
005 · Singapore petroleum-industry sulfur and UFP. https://aaqr.org/articles/aaqr-22-07-0a-0265			
Размер / объект	10–190 нм	Тип	полевое
Роль в исследовании	Связь промышленной серы с PNC и новым образованием частиц	Не позволяет	Приписывать все UFP нефтехимии
006 · Heavy residual oil markers / source apportionment review. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7456793/			
Размер / объект	обычно PM2.5/PM1	Тип	обзор
Роль в исследовании	V и Ni как маркеры мазута в контексте профиля источника	Не позволяет	Называть V или Ni уникальным доказательством
007 · Kleeman et al. fuel and lube oil. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18350902/			
Размер / объект	размерно-разрешённый PM	Тип	первичное
Роль в исследовании	Вклад топлива и смазочного масла; hopanes/steranes	Не позволяет	Считать hopanes/steranes уникальными для дизеля
008 · Riddle et al. roadside source apportionment. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18800533/			
Размер / объект	PM0.1 и др.	Тип	первичное
Роль в исследовании	Прямое распределение источников в PM0.1 у дороги	Не позволяет	Переносить доли на шахту или другой автопарк
009 · IARC Monograph 105: Diesel and gasoline engine exhausts. https://publications.iarc.who.int/129			
Размер / объект	комплексная экспозиция	Тип	официальная оценка
Роль в исследовании	Дизельный выхлоп канцерогенен для человека	Не позволяет	Называть канцерогенным любой отдельный UFP-компонент по этой оценке

5. Идентификация источников и химический отпечаток

S01 · Hopke et al. *Global review of recent source apportionments*. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7456793/>

Фракция	главным образом PM2.5	Тип	обзор
Роль в исследовании	PMF/CMB, локальная специфичность профилей, комбинации маркеров	Не позволяет	Переносить профиль PM2.5 прямо на UFP

S02 · *Source Apportionment: Findings from the U.S. Supersites Program*. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.3155/1047-3289.58.2.265>

Фракция	PM2.5	Тип	обзор
Роль в исследовании	Органические маркеры, CMB/PMF и неопределённости	Не позволяет	Называть пики абсолютно специфичным маркером

S03 · Szidat et al. *review of radiocarbon apportionment*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24136253/>

Фракция	углеродистый PM	Тип	обзор
Роль в исследовании	Разделение fossil/non-fossil carbon посредством 14C	Не позволяет	Разделять уголь, нефть и газ одним радиоуглеродом

S04 · 2026 PM1 marker+PMF study. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/42323424/>

Фракция	PM1	Тип	первичное
Роль в исследовании	Пики как часть локально откалиброванной диагностической системы	Не позволяет	Универсальный порог для других регионов и UFP

S05 · Beijing 14C + organic markers. <https://boris-portal.unibe.ch/bitstreams/399da76c-a62a-4935-b44c-ab0002fdc208/download>

Фракция	углеродистый PM	Тип	первичное
Роль в исследовании	Комбинация 14C, пики и hopanes для разделения источников	Не позволяет	Делать вывод по одному пику

S06 · PAH diagnostic ratios / coke profile study. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236114012782>

Фракция	TSP	Тип	первичное
Роль в исследовании	Возможность и ограничения профильного сравнения PAH	Не позволяет	Строгую уникальную идентификацию без альтернативных источников

6. Общая эпидемиология UFP и медицинские механизмы

Н01 · Ohlwein et al. (2019). <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30790006/>

Дизайн / фракция	85 исследований UFP	Тип	систематический обзор
Роль в исследовании	Наиболее последовательны краткосрочные воспалительные и сердечно-сосудистые изменения; иные исходы неубедительны/недостаточны	Не позволяет	Объявлять все перечисленные болезни доказанными именно для UFP

Н02 · Long-term UFP systematic review/meta-analysis (2026). <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/41605538/>

Дизайн / фракция	85 исследований до 12/2024	Тип	систематический обзор/метаанализ
Роль в исследовании	Современная оценка долгосрочной базы; общий уровень независимых доказательств низкий/неадекватный	Не позволяет	Вырывать одно pooled HR без оговорок о сополлютантах

Н03 · Short-term UFP mortality review (2025/26). <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40939674/>

Дизайн / фракция	21 исследование	Тип	систематический обзор
Роль в исследовании	Не выявляет ясной связи краткосрочной PNC с общей/CV/resp смертностью	Не позволяет	Заявлять доказанное влияние UFP на смертность

Н04 · Frampton et al. controlled carbon UFP. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15768531/>

Дизайн / фракция	люди, 10–25 мкг/м³ UFP	Тип	контролируемое
Роль в исследовании	Тонкие изменения HRV/реполяризации; отсутствие ряда ожидаемых воспалительных эффектов	Не позволяет	Экстраполировать на хроническую угольную экспозицию

Н05 · UFP in type 2 diabetes. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20822968/>

Дизайн / фракция	люди, 32 нм EC UFP	Тип	рандомизированное crossover
Роль в исследовании	Транзиторная активация тромбоцитов/возможная эндотелиальная активация	Не позволяет	Доказывать, что UFP вызывают диабет 2 типа

H06 · Miller et al. inhaled gold nanoparticles. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28443337/			
Дизайн / фракция	люди + мыши, 5/30 нм Au	Тип	tracer experiment
Роль в исследовании	Прямое доказательство попадания некоторых ингалированных наночастиц в кровь; размерная зависимость	Не позволяет	Считать долю переноса одинаковой для окружающих угольных UFP
H07 · Oberdörster et al. olfactory route. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15204759/			
Дизайн / фракция	крысы, 36 нм 13C	Тип	животная модель
Роль в исследовании	Возможный обонятельный путь в мозг	Не позволяет	Заявлять установленный количественный путь у человека
H08 · Placental translocation systematic review. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33138843/			
Дизайн / фракция	73 исследования, мало human	Тип	систематический обзор
Роль в исследовании	Биологическая возможность и сильные ограничения human evidence	Не позволяет	Заявлять доказанный перенос любых UFP к плоду
H09 · Black carbon on fetal side of placenta. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31530803/			
Дизайн / фракция	человеческая плацента, BC	Тип	наблюдательное/аналитическое
Роль в исследовании	Частицы BC обнаружены на фетальной стороне; связь с материнской экспозицией	Не позволяет	Доказывать происхождение от угля или клинический исход
H10 · Air-pollution nanoparticles in placental cells. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33181987/			
Дизайн / фракция	15 плацент	Тип	аналитическое
Роль в исследовании	Наноагрегаты и металлические компоненты в плацентарных макрофагах	Не позволяет	Утверждать прямое проникновение в плод
H11 · Airport UFP controlled exposure. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32402984/			
Дизайн / фракция	21 человек, 5 ч	Тип	контролируемое полевое
Роль в исследовании	Краткосрочные изменения функции лёгких/QTc в конкретной экспозиции	Не позволяет	Переносить эффект на угольные UFP

H12 · UFP and endothelial NO. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23751346/			
Дизайн / фракция	клетки; UFP <200 нм	Тип	механистическое
Роль в исследовании	Окислительный стресс/эндотелиальная дисфункция как механизм	Не позволяет	Называть клиническим доказательством инфаркта
H13 · UFP dementia, ACT cohort. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38185046/			
Дизайн / фракция	4 283 человека	Тип	проспективная когорта
Роль в исследовании	Нулевой результат после многополлютантной коррекции — важная граница	Не позволяет	Заявлять однозначную связь UFP с деменцией
H14 · U.S. Medicare UFP dementia study. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40079183/			
Дизайн / фракция	≈20–21 млн, модель UFP	Тип	большая когорта
Роль в исследовании	Положительная ассоциация; контраст к H13	Не позволяет	Доказывать причинность или угольный источник
H15 · PM2.5/dementia Burden of Proof. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40119171/			
Дизайн / фракция	PM2.5	Тип	систематический обзор
Роль в исследовании	Косвенная база для общего PM2.5; явно маркировать аналогией	Не позволяет	Приписывать результат UFP
H16 · PM2.5 pregnancy/child outcomes — использовать только как косвенную базу			
Дизайн / фракция	PM2.5	Тип	обзоры/когорты
Роль в исследовании	Описать известное для массовой фракции	Не позволяет	Называть доказательством coal-UFP
H17 · Lavigne et al. <i>Spatiotemporal Variations in Ambient Ultrafine Particles and the Incidence of Childhood Asthma</i> (2019). https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30785782/			
Дизайн / фракция	модель UFP; 160 641 рождение	Тип	когорта
Роль в исследовании	Положительная связь экспозиции во втором триместре с детской астмой после учёта PM2.5 и NO2	Не позволяет	Переносить на угольный источник или считать все окна беременности одинаковыми

H18 · Wright et al. <i>Prenatal Ambient Ultrafine Particle Exposure and Childhood Asthma</i> (2021). https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34018915/			
Дизайн / фракция	модель UFP; 376 пар мать–ребёнок	Тип	небольшая когорта
Роль в исследовании	Положительная ассоциация и возможные окна чувствительности	Не позволяет	Игнорировать малую выборку, широкие ДИ и моделируемую экспозицию
H19 · Yu et al. <i>Ambient ultrafine particles and asthma onset until age 20: PIAMA</i> (2022). https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35777436/			
Дизайн / фракция	модель UFP; 3 687 участников	Тип	birth cohort
Роль в исследовании	Однополлютантная связь ослабла после учёта NO ₂ и PM _{2.5} absorbance; важный отрицательный предел независимого эффекта	Не позволяет	Утверждать, что UFP независимо вызывают астму
H20 · Copenhagen child asthma admissions (2025). https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40274412/			
Дизайн / фракция	мониторинговая UFP; 15 903 госпитализации	Тип	case-crossover
Роль в исследовании	Краткосрочная положительная ассоциация с госпитализациями по астме	Не позволяет	Устанавливать долгосрочную причинность или угольный источник
H21 · <i>Ultrafine particle deposition in subjects with asthma</i> (2004). https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15175176/			
Дизайн / фракция	23 нм углерод; 16 взрослых	Тип	контролируемая дозиметрия
Роль в исследовании	У больных астмой измеренная доля депозиции была выше, особенно при нагрузке и для самых малых частиц	Не позволяет	Переносить точные доли на детей, другие составы и обычную окружающую экспозицию
7. Специфические угольные медицинские кейсы			
K01 · Xuanwei indoor smoky coal constituents and lung cancer. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6792381/			
Экспозиция	бытовой дым, химические компоненты	Тип	case-control
Роль в исследовании	Связь риска рака лёгкого с РАН-кластером/NO ₂ у некурящих женщин	Не позволяет	Утверждать, что эффект вызван именно UFP

К02 · IARC Monographs: household coal combustion. <https://publications.iarc.who.int/101>

Экспозиция	бытовое сжигание угля	Тип	официальная оценка
Роль в исследовании	Канцерогенность конкретной экспозиции	Не позволяет	Переносить на любой способ сжигания и отдельные UFP

К03 · Guizhou endemic arsenicosis. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1240722/>

Экспозиция	уголь + загрязнённая пища/воздух	Тип	полевое
Роль в исследовании	Показывает множественные пути экспозиции; пища доминировала	Не позволяет	Представлять как чисто ингаляционный UFP-кейс

К04 · Guizhou fluorosis review. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34625836/>

Экспозиция	бытовой уголь/глина, загрязнение пищи	Тип	обзор
Роль в исследовании	Эндемический флюороз и путь через сушку пищи	Не позволяет	Представлять как UFP-эпидемиологию

К05 · Child skeletal fluorosis. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2778178/>

Экспозиция	бытовой уголь, пища	Тип	поперечное
Роль в исследовании	Клинический кейс хронической смешанной экспозиции	Не позволяет	Причинность именно вдыхания частиц

К06 · IARC coal dust Vol. 68. <https://publications.iarc.fr/86>

Экспозиция	профессиональная угольная пыль	Тип	официальная оценка 1997
Роль в исследовании	Coal dust Group 3 на момент оценки; отдельно silica Group 1	Не позволяет	Называть угольную пыль IARC Group 1 без новой монографии

К07 · IARC priorities 2025–2029. https://monographs.iarc.who.int/wp-content/uploads/2024/11/AGP_Report_2025-2029.pdf

Экспозиция	угольная пыль	Тип	advisory report
Роль в исследовании	Новая база обосновывает приоритет переоценки	Не позволяет	Представлять рекомендацию как уже состоявшуюся классификацию

К08 · NIOSH coal-miner lung disease bulletin. https://www.cdc.gov/niosh/bulletin/2023/mining-lung-disease.html			
Экспозиция	смешанная профессиональная пыль	Тип	официальный
Роль в исследовании	Пневмококиоз, PMF, COPD, потеря функции лёгких	Не позволяет	Приписывать эффекты UFP или одному компоненту
К09 · DEMS cohort. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22393207/			
Экспозиция	дизель в неугольных шахтах	Тип	когорта
Роль в исследовании	Профессиональный дизельный выхлоп и рак лёгкого	Не позволяет	Называть угольной когортой или UFP-специфичным исследованием
К10 · DEMS II COPD. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38422874/			
Экспозиция	дизель + респираторная пыль	Тип	когорта
Роль в исследовании	COPD mortality с раздельной оценкой экспозиций	Не позволяет	Прямой вывод о жителях шахтёрских городов
К11 · Coke-oven workers meta-analysis (2026). https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/42050638/			
Экспозиция	COE/PAH/PM2.5/CTPV	Тип	систематический обзор
Роль в исследовании	Профессиональные респираторные болезни/рак	Не позволяет	UFP-специфичный эффект
К12 · Amster. <i>Public health impact of coal-fired power plants: a critical systematic review</i> (2019). https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31617747/			
Экспозиция	смеси загрязнителей/PM, не UFP	Тип	систематический обзор 40 работ
Роль в исследовании	Поддерживает неблагоприятные популяционные последствия выбросов ТЭС, но отмечает неоднородность экспозиции и confounding	Не позволяет	Приписывать эффект UFP или одной ТЭС без source-specific exposure assessment
К13 · <i>Exposure to air pollution from coal-fired power plants and impacts on human health: a scoping review</i> (2025). https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40042098/			
Экспозиция	близость/смеси загрязнителей	Тип	scoping review 56 работ
Роль в исследовании	Систематизирует респираторные, перинатальные и детские исходы возле ТЭС и эффекты закрытий/очистки	Не позволяет	Считать близость точной дозой и выделять UFP

К14 · Henneman et al. *Mortality risk from United States coal electricity generation* (2023). <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37995235/>

Экспозиция	coal-PM2.5 по SO2-модели	Тип	когорта Medicare, 650 млн человеко-лет
Роль в исследовании	Прямая source-specific база по вторичному coal-PM2.5 и смертности	Не позволяет	Называть результат UFP, первичной золой или индивидуальным риском без модели

К15 · Costantino et al. *Occupationally related cancer risk among coke oven workers: 30 years of follow-up* (1995). <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7640988/>

Экспозиция	комплексные выбросы коксовых печей	Тип	когорта 15 818 работников
Роль в исследовании	Длительное наблюдение профессиональной экспозиции и респираторного рака	Не позволяет	Выделять UFP как причинный агент

8. Защита и фильтрация дома

Р01 · EPA Guide to Air Cleaners. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/guide-air-cleaners-home>

Объект	бытовые фильтры	Тип	официальное руководство
Роль	Выбор CADR/HEPA, ограничения, озоногенерирующие устройства	Не позволяет	Обещать устранение всех загрязнителей или газов одним HEPA

Р02 · Lowther et al. HEPA and UFP. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32739515/>

Объект	18–514 нм	Тип	камерное
Роль	Размерная эффективность; минимум около 200–250 нм	Не позволяет	Переносить лабораторную эффективность на любую квартиру

Р03 · Systematic review of real-world filtration. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34374125/>

Объект	преимущественно PM2.5	Тип	систематический обзор
Роль	Фильтрация снижает комнатный PM, но уверенность низкая/неоднородная	Не позволяет	Гарантировать клиническую пользу или UFP-эффект

Р04 · Sultan et al. portable cleaners. <https://hero.epa.gov/reference/1729721/>

Объект	UFP	Тип	камерное
Роль	HEPA/ESP/electret снижают UFP; технологии различаются	Не позволяет	Советовать ионизаторы/озонаторы как безопасную замену