

Асбест и антиасбестовая кампания: медицинские и экономические аспекты

Яргин С.В.

Резюме. Оценка связанного с асбестом риска для здоровья основана на опыте прошлого, когда содержание асбестовых волокон в воздухе на рабочих местах было выше. Волокна присутствуют в окружающей среде в результате эрозии поверхностных отложений и деятельности человека, не связанной с асбестовой промышленностью. При целенаправленном поиске асбестовые волокна нередко находят на аутопсии. Результаты многих исследований недостаточно объективны. Например, при обнаружении волокон мезотелиому или рак легкого иногда классифицируют как асбестообусловленные, хотя причинно-следственная связь остается недоказанной. Некоторые исследования полагаются на непроверенные анамнестические данные о профессиональном или бытовом контакте с асбестом. Достоверные данные можно получить в экспериментах с регистрацией средней продолжительности жизни животных. Различные типы асбеста имеют свои технические преимущества и предпочтительные области применения. Дорожное движение безопаснее при использовании асбестосодержащих тормозных накладок. Асбоцементные конструкции прочны и недороги. Огнезащитные свойства асбеста хорошо известны. Можно обоснованно предположить, что отказ от асбестосодержащих тормозных накладок, огнезащитных и изоляционных материалов приведет к увеличению ущерба от дорожно-транспортных происшествий, пожаров и вооруженных конфликтов.

Ключевые слова: асбест; хризотил; амфиболы, мезотелиома; рак легкого.

Введение

Оценка связанного с асбестом риска для здоровья основана на опыте прошлого, когда концентрация волокон в воздухе на рабочих местах была выше, чем сегодня. Для оценки связанных с асбестом рисков использовалась линейная беспороговая гипотеза, известная из области радиационной защиты, хотя ее применимость к малым дозам не доказана и остается спорной как для опухолей плевры, так и для рака легкого (Hodgson and Darnton 2000; Jargin 2017, 2018; Paustenbach et al. 2021). Существует мнение, что вредное воздействие асбеста на рабочих местах и в быту фактически прекратилось в развитых странах около 40 лет назад, а современные промышленные изделия и материалы не выделяют сколько-нибудь опасного количества волокон (Paustenbach et al. 2021). Волокна асбеста присутствуют в природной среде, в т.ч. в населенных пунктах, в результате эрозии поверхностных отложений (Noonan 2017 Реña-Castro et al. 2023). Естественная эмиссия способствует рассеиванию волокон хризотила и амфиболового асбеста, местами превышая антропогенный вклад в атмосферную дисперсию волокон (Ilgren et al. 2015; Noonan 2017). Воздух, почва и вода могут быть загрязнены асбестом и другими потенциально вредными волокнами в результате деятельности человека, не связанной с асбестовой промышленностью: земляные работы, перепрофилирование склонов и проходка тоннелей (Berry et al. 2022; Malinconico et al. 2022). В исследовании, проведенном в Милане, волокна асбеста были обнаружены в 35 из 55 (63,6%) случаев рутинной аутопсии (Casali et al. 2015). На вскрытиях умерших, имевших контакт с асбестом, берут на гистологию больше кусочков ткани легких и плевры, исследование выполняется тщательно, с применением специальных методов. Соответственно, волокна находят чаще, чем при рутинных вскрытиях. Обнаружение волокон само по себе не доказывает ни профессиональный контакт с асбестом, ни роль асбеста в этиологии заболеваний. Ингаляция и выведение волокон из дыхательных путей – нормальные процессы, находящиеся в динамическом равновесии (Bayram and Bakan 2014; Casali et al. 2015).

По аналогии с другими природными факторами, можно предположить наличие безвредной (пороговой) концентрации волокон в атмосферном воздухе. Имеются экспериментальные данные в пользу существования порогов для онкологических и других заболеваний (Goodman et al. 2025). По-видимому, скрининг и диспансеризации способствовали повышению частоты выявления мезотелиомы и рака легких среди лиц, имевших контакт с асбестом. Многие исследования недостаточно объективны. Например, опухоли легких и плевры при обнаружении волокон нередко классифицируют как асбестообусловленные, хотя причинно-следственная связь остается недоказанной. Некоторые исследования полагаются на сомнительные данные анамнеза о профессиональном или бытовом контакте с асбестом и на интервью с родственниками умерших пациентов (Yang et al. 2008).

Злокачественная мезотелиома плевры (ЗМП)

Стабильная заболеваемость ЗМП в некоторых развитых странах, несмотря на запреты асбеста (Kraus et al. 2024; Nash and Creaney 2023; Nel et al. 2024), помимо старения населения частично обусловлена совершенствованием диагностического оборудования, эффектом скрининга, а также гипердиагностикой ввиду нечеткого отграничения ЗМП как нозологической единицы. Помимо асбеста, к этиологическим факторам ЗМП относятся различные минеральные и искусственные волокна, вирус SV40, ионизирующее излучение, хроническое воспаление (эмпиема, туберкулез), генетическая предрасположенность и спонтанные мутации (Carbone et al. 2019; Dipper et al. 2021; Donaldson et al. 2013; Greim et al. 2014; Janosikova et al. 2023; Jasani and Gibbs A. 2012; Nash and Creaney 2023; Panou et al. 2015; Røe and Stella 2015; Røe et al. 2009; Rossini et al. 2018; Tomasetti et al. 2009). Например, эрионит считается более эффективным канцерогеном, чем асбест. Деятельность человека приводит к распространению эрионита и других потенциально канцерогенных волокон на населенных территориях (Berry et al. 2022; Carbone et al. 2019). Некоторые типы углеродных нанотрубок классифицированы как возможные канцерогены (см. Обсуждение).

Имеются доказательства, что вирус SV40 способствовал росту заболеваемости мезотелиомой в последние десятилетия (Carbone et al. 2020). Последовательности ДНК, подобные SV40, регулярно обнаруживаются в ЗМП (Testa et al. 1998). После лазерной микродиссекции SV40 был найден в клетках ЗМП, но не в окружающих клетках (Carbone et al. 2020). После введения SV40 у $\geq 50\%$ у хомяков развивались мезотелиальные опухоли; после инъекций в плевральную полость мезотелиомы возникали у 100% хомяков (Cicala et al. 1993; Carbone et al. 2019). Рост заболеваемости ЗМП в 1960-е годы совпал с воздействием вируса в период 1955-1963 гг. (и позже в некоторых странах), когда вакцины от полиомиелита содержали жизнеспособный SV40 (Carbone et al. 2020). Антитела к SV40 были обнаружены в сыворотке у 34% больных ЗМП по сравнению с 20% у здоровых лиц ($p < 0,05$). Эти данные указывают на роль SV40 в этиологии ЗМП, а также на то, что вирус циркулирует среди населения (Mazzoni et al. 2022). Инвазивные процедуры, в особенности бронхоскопия, сравнительно часто применяемая в группах риска, способствовали распространению SV40 и появлению дополнительных случаев ЗМП. Бронхоскопию с биопсией рекомендовали при связанном с асбестом бронхите, при подозрении на пылевые заболевания и пневмонию (Elovskaja 1997; Kazantsev 2004; Likhacheva et al. 2000; Milishnikova et al. 1990). Несмотря на запреты использования асбеста, ожидается рост показателей заболеваемости и смертности от ЗМП (Lorenzini et al. 2021). Учитывая многообразие канцерогенов и спонтанных мутаций, ожидается, что большинство мезотелиом в будущем не будут обусловлены асбестом (Paustenbach et al. 2021).

Диагностика ЗМП часто затруднительна (Voitsekhovskiy et al 2016). Гистологически ЗМП может проявлять сходство с различными видами рака. Различные опухоли могут

подвергаться анаплазии и приобретать сходство с ЗМП. Дифференциальный диагноз зависит от подтипа ЗМП. Особенно трудна диагностика саркоматоидного варианта ЗМП; при этом польза от иммуногистохимии ограничена (Carbone and Yang 2017; Kerger et al. 2014; Rapou et al. 2015). Дифференциальный диагноз ЗМП - известная проблема; пересмотры гистологических архивов регулярно обнаруживали неправильно диагностированные случаи (Carbone and Yang 2017; Chen et al. 2017). В одном исследовании первоначальный диагноз был подтвержден в 67% случаев, изменен в 13% и оставался неопределенным в остальных случаях (Goldberg et al. 2006). Другая группа экспертов изменила диагноз в 14% из 5258 случаях мезотелиомы (Carbone et al. 2019). Согласно оценке, около 10% ЗМП в США были диагностированы неправильно (Chen et al. 2017). Одна из причин - недостаточный опыт из-за редкости ЗМП (Carbone and Yang 2017; Chen et al. 2017). В отличие от генеральной совокупности, в группах риска поиск ЗМП выполняют специализированные эксперты. В результате обнаруживается больше мезотелиом.

Отсутствие надежных биомаркеров затрудняет диагностику ЗМП (Carbone et al. 2020). Мезотелин обсуждался как один из наиболее перспективных маркеров (Creaney al. 2015). Однако выраженную экспрессию мезотелина выявляют также в других опухолях, в т.ч. в аденокарциноме легкого (Ho et al. 2007). Чувствительность мезотелина как маркера недостаточна (Bibby et al. 2016; Carbone et al. 2019; Creaney al. 2015; Dipper et al. 2021); его экспрессия часто отсутствует в саркоматоидной и эпителиоидной ЗМП (Carbone and Yang 2017; Grigoriu et al. 2009; Pantazopoulos et al. 2013). Остеопонтин считали многообещающим маркером, однако данные остаются противоречивыми. Подобно мезотелину, применение остеопонтина и фибулина-3 ограничено из-за низкой чувствительности (Harris et al. 2019). Отмечается гетерогенность хромосомных aberrаций в ЗМП (Lindholm et al. 2007; Musti et al. 2006; Røe et al. 2009). Информация об изменениях на молекулярном уровне недостаточна (Lorenzini et al. 2021). Отсутствуют надежные генетические маркеры (Cersosimo et al. 2021; Vandenhoeck et al. 2021). Отмечена тенденция к преувеличению роли иммуногистохимических и молекулярных маркеров (Creaney al. 2015). Хельсинские критерии (Helsinki Criteria), разработанные для оценки причинно-следственной связи мезотелиомы с асбестом, не дают четких рекомендаций по использованию биомаркеров при скрининге на ЗМП (Ferrari et al. 2020; Wolff et al. 2015). Более того, ЗМП может проявлять различные молекулярные характеристики в разных участках ткани, т.е. внутриопухолевую гетерогенность и субклональность (Rossi et al. 2021). Несмотря на обилие маркеров, ни один из них не оказался достаточно специфичным (Ferrari et al. 2020; Schillebeeckx et al. 2021). Опухоль, диагностированная как ЗМП с использованием алгоритмов и панелей, не всегда отличается от других видов рака. Вышеизложенное объясняет повышенную частоту обнаружения ЗМП в группах риска.

Российская наука об асбесте

Заболевания, связанные с асбестом, широко изучались в России. Преобладает мнение, что при соблюдении необходимых мер предосторожности современные технологии производства и переработки асбеста безопасны, а применяемые в некоторых странах запреты чрезмерны (Elovskaja 1997; Izmerov and Kovalevskii 2004; Neiman et al. 2006). Опасность для здоровья от низких концентраций волокон не доказана. Повышенных рисков среди лиц, проживающих вблизи современных предприятий асбестовой индустрии, не выявлено. Результаты эпидемиологических исследований указывают на существование безопасной (пороговой) концентрации волокон в воздухе (Kogan et al. 1993; Shtol et al. 2000). Генетическая адаптация к определенному уровню ингаляции асбестовых волокон считается возможной (Tsurikova et al. 1992). Асбоцементные листы (шифер) широко используются для кровельных работ. Выделение волокон из кровельных материалов при строительстве и эксплуатации зданий незначительно. Концентрации

волокон в воздухе помещений на порядок ниже допустимого уровня (Kashanskii et al. 2004). Асбестоцементные трубы широко используются для распределения питьевой воды и считаются безопасными; риск от перорального поступления волокон асбеста не доказан, тем более, что волокна модифицируются вследствие агрегации с цементом (Krasovskii and Egorova 1985; Krasovskii and Mozhaev 1993). Исследования показали, что асбестоцементные трубы не влияют на качество питьевой воды; их применение было одобрено Минздравом (Repina et al. 2009). Употребление воды, содержащей 7-10 млн. волокон в литре, не ведет к повышению риска рака желудка (Kogan 2002a). Асбестосодержащий щебень - побочный продукт обогащения хризотила - использовался для железнодорожных насыпей, причем повышенная концентрация волокон в воздухе была отмечена как в поездах, так и в близлежащих населенных пунктах (Kartsov et al. 2003). Аналогично асбестоцементу, канцерогенность волокон асбокартона снижена в результате агрегации с целлюлозой (Kashanskii and Kogan 1995). Волокна хризотила, выделенные из хризотил-цемента, обладают меньшим канцерогенным потенциалом, чем товарный хризотил. Хризотил-цементная промышленность считается источником канцерогенной опасности, однако, существенно меньшей, чем асбестовая (Pylev et al. 2011). Токсического действия асбестосодержащих тормозных накладок по сравнению с таковыми без асбеста не выявлено; существенного загрязнения воздуха от автомобильных тормозов не отмечается, тогда как дорожное движение безопаснее с асбестосодержащими накладками (Iatsenko et al. 1994; Kovalevskii 2009). В процессе торможения асбест превращается в практически безвредный форстерит (Iatsenko and Kogan 1990; Iatsenko et al. 1991). Асбестосодержащие материалы (картон, бумага, одежда, прокладки и др.) по-прежнему широко используются. Монтаж и ремонт без обработки асбестосодержащих деталей считается безопасным (Kovalevskii 2009). Не отмечено роста заболеваемости мезотелиомой среди рабочих асбестовых предприятий и жителей районов с развитой асбестовой промышленностью (Izmerov et al. 1998). На основании исследования 3576 случаев мезотелиомы был сделан вывод, что асбест не является ни ведущим, ни облигатным причинным фактором (Kashanskii 2008). Среди 69 пациентов с ЗМП в Казахстане воздействие асбеста не было установлено ни в одном случае, географической связи с добычей асбеста и обрабатывающей промышленностью также не отмечено (Kashanskii et al. 2008). Соблюдение российских ПДК обеспечивает практически всем работающим безопасные условия труда т.е. без повышенного риска асбестоза и онкологических заболеваний. (Kogan 2002a).

Хризотил и амфиболовый асбест

Преобладает мнение, что серпентиновый асбест (хризотил) менее токсичен, чем амфиболовый (актинолит, амозит, антофиллит, крокидолит, тремолит), однако между данными эпидемиологических и экспериментальных исследований имеются противоречия. В России производится почти исключительно хризотил. В литературе часто подчеркивается низкая токсичность хризотила по сравнению с амфиболами. Однако некоторые специалисты считали недостаточно обоснованным представление о том, что ингаляция волокон амфиболов намного опаснее по сравнению с хризотилом (Kogan 1995). Канцеро-, фибро-, мутагенное и цитотоксическое действие хризотила подтверждено в экспериментальных и эпидемиологических исследованиях (Pylev et al. 1988, 2010; Troitskaia 1993). Многочисленные эксперименты по сравнительной оценке фиброгенности позволили установить, что антофиллит уступает хризотилу по фиброгенности (Kogan 2002b). В экспериментах хризотил обладал острой токсичностью, вызывая гранулематозную тканевую реакцию (Kashanskii et al. 1994), причем канцерогенное действие существенно не отличалось от такового амфиболов (Pylev 1987). В этой связи заслуживают комментария некоторые выводы Bernstein (2014), например: «После кратковременного воздействия более длинные волокна хризотила быстро выводятся из легких». Учитывая возможность перемещения хризотиловых волокон из легкого в плевру

(Coin et al. 1994; Kohyama and Suzuki 1991; Nicholson 1991; Sebastien et al. 1980; Stayner et al. 1996; Suzuki and Yuen 2002), биостойкость асбеста невозможно оценить только путем определения содержания волокон в легких. «Протокол исследования Бернштейна является причиной очень короткого периода полураспада волокон, из чего он делает вывод о слабой канцерогенности хризотила. Выводы Бернштейна противоречат результатам, полученным независимыми исследователями. Результаты Бернштейна могут быть объяснены только агрессивной предварительной обработкой волокон» (Pezerat 2009). Со ссылками на названного автора делаются необоснованные заявления: «Показано, что хризотил быстро выводится из легких экспериментальных животных после его вдыхания» ; «хризотил, который быстро разрушается в легких, ведет себя, скорее, как неволоконистая минеральная пыль (Koigeldinova et al. 2015).

Разложение кислотами не доказывает растворимости в живых тканях. В растворе Гэмбла, имитирующем интерстициальную жидкость легких, испытывали различные типы волокон: хризотил и крокидолит показали очень низкую растворимость (Larsen 1989). Растворимость колебалась от нескольких наногаммов растворенного кремния на квадратный сантиметр поверхности волокна (хризотил и крокидолит) до нескольких тысяч нг/см² (стекловолокно). Арамидные и углеродные волокна оказались почти нерастворимыми (Larsen 1989). Эксперименты с раствором Гэмбла показали также, что из хризотила растворяется сравнительно много магния (Mg). Основу силикатов составляют атомы кремния и кислорода в цепях Si-O-Si. Прочность волокон в основном определяется связями между названными атомами. Между цепями действуют электростатические силы благодаря отрицательно заряженным атомам кислорода, связанным с атомами кремния основной цепи, с одной стороны, и, с другой – с катионами, в т.ч., Mg (Fedoseev et al. 1966; Coin et al. 1994; Currie et al. 2009; Smith and Wright 1996). Вымывание Mg с поверхности волокон может способствовать их продольному расщеплению. В результате общее количество тонких фибрилл увеличивается, возможно, вместе с канцерогенным потенциалом (Asgharian et al. 2018; Coin et al. 1994; Currie et al. 2009; Finkelstein 2013; Kohyama and Suzuki 1991; Ramada Rodilla et al. 2022; Smith and Wright 1996; Suzuki and Yuen 2002; Yu et al. 1991). Предположительно, чем тоньше волокно (в определенных пределах), тем выше канцерогенный потенциал, поскольку оно лучше проникает в ткани (Ramada Rodilla et al. 2022). Данная тема требует дальнейших исследований.

Ускоренное выведение хризотила из легочной ткани отчасти обусловлено расщеплением волокон на тонкие фибриллы, которые труднее обнаружить. Волокна асбеста обнаруживаются в плевре посмертно, причем хризотил является преобладающим волокном в плевральных бляшках (Dodson et al. 1990) и в плевре в целом (Gibbs et al. 1991; Sebastien et al. 1980; Stayner et al. 1996). Представление о миграции волокон в плевру согласуется с тем, что первичный очаг мезотелиомы у лиц, имевших контакт с асбестом, чаще локализуется в париетальной, а не в висцеральной плевре (Sekido 2013). Ряд исследований подтвердили биостойкость хризотила в легких человека (Feder et al. 2017). Вместе с тем нельзя исключить, что растворение хризотила может быть более эффективным в кислой среде лизосом. В экспериментах на крысах хризотил в короткие сроки вызывал воспаление, а позже - злокачественные опухоли, тогда как крокидолит оказывал канцерогенное действие в более поздние сроки (Gualtieri, 2023).

Заболеваемость мезотелиомой увеличивается после воздействия чистого хризотила (Finkelstein and Meisenkothen 2010; Frank 2020). Относительно высокую частоту мезотелиомы среди рабочих, контактировавших с амфиболами, объясняли в среднем более высокими дозами (Stayner et al. 1997). Как упоминалось выше, имеются расхождения между результатами экспериментов на животных и эпидемиологическими данными. Отмечалось, что доказательства различий между хризотилом и амфиболами по раку легкого «в лучшем случае слабы» (Stayner 2008). В некоторых экспериментах на животных канцерогенная активность амфиболов и хризотила была почти одинаковой в

отношении мезотелиомы (Harington 1991; Smith and Wright 1996; Wagner 1975; Wagner et al. 1974) и рака легкого (Berman et al. 1995; Landrigan et al. 1999). В одном исследовании хризотил оказался даже более канцерогенным, чем амфиболы, причем было отмечено: «Не получено доказательств меньшей канцерогенности или менее выраженного асбестоза в группах, подвергшихся воздействию хризотила, по сравнению с группами, подвергшимися воздействию амфиболов» (Wagner et al. 1974). В исследовании на крысах хризотил вызывал больше фиброза и опухолей легких, чем амфиболы, что объяснили высоким содержанием волокон длиннее 20 мкм в использованном препарате хризотила (Davis et al. 1978). Хризотил индуцировал хромосомные аберрации и предопухолевые трансформации клеток *in vitro* (Harington 1991; Hesterberg and Barrett 1984).

У человека разница по степени риска рака легкого между хризотилом и амфиболами (амозит и крокидолит) оценивалась в диапазоне от 1:10 до 1:50. Для мезотелиомы соотношение рисков от воздействия асбеста вышеуказанных типов оценивалось как 1:100:500 соответственно (Hodgson and Darnton 2000), последнее соотношение было процитировано в обзорах (Goldberg et al. 2006; Lenters et al. 2011). В более поздней публикации было предложено другое соотношение 1:5:10 (Hodgson and Darnton 2010). Те же авторы отмечали, что в экспериментах на животных с вышеуказанными типами асбеста образуется примерно одинаковое количество опухолей легких, то есть, имеются противоречия между данными экспериментальных и эпидемиологических исследований. Было предложено объяснение: «У людей волокна хризотила (выводятся за месяцы) могут оказывать меньший эффект, чем волокна амфиболов (выводятся за годы)» (Hodgson and Darnton 2000). Однако нет оснований предполагать существенные межвидовые различия в механизмах выведения волокон. Как упоминалось выше, выведение хризотила из легких может быть частично объяснено продольным расщеплением волокон и их перемещением в плевру. Что касается эпидемиологических исследований, то на некоторые из них повлияли эффект скрининга с гипердиагностикой в группах риска, нечеткая дифференциация ЗМП от других опухолей и сомнительные данные анамнеза.

Токсичность асбеста и других волокон в значительной мере зависит от трех «Д» - Dose, Dimensions, Durability (доза, размеры и биостойкость) (Berman and Crump 2008; Donaldson et al. 2013; IARC 1996; Wang et al. 2017). При равной биостойкости различия по канцерогенности связаны с длиной и толщиной волокон (Mossman et al. 2011). Отмечалось, что длинные волокна хризотила обладают сравнительно высокой токсичностью, поскольку они менее эффективно захватываются и удаляются макрофагами (Gaudino et al. 2020; Hillerdal and Henderson 1997). Согласно другому исследованию, при ЗМП в легких и плевре преобладали короткие и тонкие волокна хризотила (Suzuki et al. 2005). Кроме того, примесь тремолита в хризотиловых продуктах может усиливать канцерогенный эффект (Langer and Nolan 1994). В обзоре был сделан вывод об отсутствии убедительных доказательств в пользу предположения, что повышенная заболеваемость ЗМП среди работающих с хризотилом обусловлена только примесью тремолита (Stayner et al. 1996). В эпидемиологическом исследовании разница в риске ЗМП от чистого хризотила и его смесей с амфиболами оказалась незначительной (Wong et al. 2020).

Токсичность различных типов асбеста сравнивали в метаанализе 19 эпидемиологических исследований, причем оценивалось влияние качества исследований на соотношение доза-эффект при раке легких. Разница между хризотилом и амфиболами была значительно меньше, когда метаанализ ограничивается работами высокого качественного уровня (Järvholm and Burdorf 2024; Lenters et al. 2011). После учета качества, разница между хризотилом и амфиболами оказалась незначительной (Lenters et al. 2011; Marsili et al. 2016), что видно на графиках в статье (Lenters et al. 2011). Согласно систематическому обзору, суммарные оценки риска рака легкого были выше после воздействия амфиболов - 1,74 (95%, доверительный интервал [ДИ] 1,18-2,57), чем хризотила - 0,99 (95% ДИ 0,78-1,25). Как правило, разница была больше в исследованиях среднего, а не высокого

качества (группа низкого качества не выделялась): 1,86 (95%, ДИ 1,27-2,72) против 1,21 (95%, ДИ 0,79-1,87) (Kwak et al. 2022). Значительные различия между результатами исследований высокого и низкого качества указывают на недостаточную объективность последних. Как упоминалось выше, преобладает мнение, что хризотил менее токсичен, чем амфиболы. Эта разница должна быть количественно оценена в независимых исследованиях.

Обсуждение

Запреты асбеста были частично основаны на исследованиях, которые находились под влиянием экономических интересов. При определении критериев включения исследований в обзоры и метаанализы следует принимать во внимание их качество и возможные систематические ошибки. Объективная информация может быть получена в экспериментах на животных с определением средней продолжительности жизни. Наряду с грызунами, желательно использовать крупных животных в т.ч. приматов (Gwinn et al. 2011). Эксперименты с ингаляцией волокон в дозах, сравнимых с таковыми в асбестовой промышленности, этически приемлемы, так как могут проводиться без инвазивных процедур. Эксперименты с использованием «концентраций, многократно превышающих таковые на рабочих местах» (Bernstein et al. 2020), имеют ограниченную информативность. Замена асбеста искусственными волокнами не обязательно устранил риски для здоровья (Donaldson et al. 2013; Greim et al. 2014; Toyokuni 2013; Van Berlo et al. 2012). Канцерогенный потенциал заменителей асбеста, таких как углеродные нанотрубки, обнаруживается в настоящее время. Исследования показывают, что асбестовые волокна и углеродные нанотрубки оказывают токсическое воздействие посредством одних и тех же механизмов, в частности, хронической активации макрофагов, ведущей к воспалению (Gupta et al. 2022). Наночастицы могут вызывать структурные изменения в мембранных белках, активировать синтез медиаторов воспаления, нарушая нормальные механизмы клеточного метаболизма (Vereshchagin and Morozova 2022). В эксперименте показан канцерогенный эффект нанотрубок (Janosikova et al. 2023; Nel 2023). Как упоминалось выше, углеродные нанотрубки биостойки, некоторые их разновидности были классифицированы как возможные канцерогены для человека (Kane et al. 2018).

Добыча и использование асбеста в ряде стран запрещены, в то время как другие продолжают его производство и экспорт (Brims 2009). Хризотилловые продукты, обращающиеся в международной торговле, содержат примеси различных количеств амфиболов (Tossavainen et al. 2001). Разные типы асбеста имеют свои технические преимущества и предпочтительные области применения. Амфиболы (крокидолит, антофиллит и др.) кислотостойки, термостабильны и долговечны (Shanin et al. 1983).

Заключение

Асбест - недорогой материал и эффективное армирующее волокно. Асбестоцементные конструкции прочны и недороги. Огнезащитные свойства асбеста хорошо известны. На долговечность тормозных накладок влияет используемый армирующий материал. Дорожное движение безопаснее с асбестосодержащими тормозными накладками. Можно с уверенностью предположить, что отказ от использования асбестосодержащих материалов увеличит ущерб и число жертв дорожно-транспортных происшествий, пожаров и вооруженных конфликтов. Большое значение имеет независимость научных исследований от экономических интересов.

Литература

Asgharian B, Owen TP, Kuempel ED, Jarabek AM (2018) Dosimetry of inhaled elongate mineral particles in the respiratory tract: The impact of shape factor. *Toxicology and Applied Pharmacology* 361: 27-35. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2018.05.001>

- Bayram M, Bakan ND (2014) Environmental exposure to asbestos: from geology to mesothelioma. *Current Opinion in Pulmonary Medicine* 20: 301-307. <https://doi.org/10.1097/MCP.0000000000000053>
- Berman DW, Crump KS, Chatfield EJ, Davis JM, Jones AD (1995) The sizes, shapes, and mineralogy of asbestos structures that induce lung tumors or mesothelioma in AF/HAN rats following inhalation. *Risk Analysis* 15: 181-195. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1995.tb00312.x>
- Berman DW, Crump KS (2008) A meta-analysis of asbestos-related cancer risk that addresses fiber size and mineral type. *Critical Reviews in Toxicology* 38 Suppl. 1:49-73. <https://doi.org/10.1080/10408440802273156>
- Bernstein DM (2014) The health risk of chrysotile asbestos. *Current Opinion in Pulmonary Medicine* 20:366-370. <https://doi.org/10.1097/MCP.0000000000000064>
- Bernstein DM, Toth B, Rogers RA, Kling DE, Kunzendorf P, Phillips JI, Ernst H (2020) Evaluation of the dose-response and fate in the lung and pleura of chrysotile-containing brake dust compared to TiO₂, chrysotile, crocidolite or amosite asbestos in a 90-day quantitative inhalation toxicology study - Interim results Part 2: Histopathological examination, Confocal microscopy and collagen quantification of the lung and pleural cavity. *Toxicology and Applied Pharmacology* 387: 114847. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2019.114847>
- Berry TA, Belluso E, Vigliaturo R, Gieré R, Emmett EA, Testa JR, Steinhorn G, Wallis SL (2022) Asbestos and other hazardous fibrous minerals: potential exposure pathways and associated health risks. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19(7): 4031. <https://doi.org/10.3390/ijerph19074031>
- Bibby AC, Tsim S, Kanellakis N, Ball H, Talbot DC, Blyth KG, Maskell NA, Psallidas I (2016) Malignant pleural mesothelioma: an update on investigation, diagnosis and treatment. *European Respiratory Review* 25:472-86. <https://doi.org/10.1183/16000617.0063-2016>
- Brims FJ (2009) Asbestos - a legacy and a persistent problem. *Journal of the Royal Naval Medical Service* 95(1): 4-11. PMID: 19425525
- Carbone M, Yang H (2017) Mesothelioma: recent highlights. *Annals of Translational Medicine* 5(11): 238. <https://doi.org/10.21037/atm.2017.04.29>
- Carbone M, Adusumilli PS, Alexander HR Jr, Baas P, Bardelli F, Bononi A, Bueno R, Felley-Bosco E, Galateau-Salle F, Jablons D, Mansfield AS, Minaai M, de Perrot M, Pesavento P, Rusch V, Severson DT, Taioli E, Tsao A, Woodard G, Yang H, Zauderer MG, Pass HI (2019) Mesothelioma: Scientific clues for prevention, diagnosis, and therapy. *CA: a Cancer Journal For Clinicians* 69(5):402-429. <https://doi.org/10.3322/caac.21572>
- Carbone M, Gazdar A, Butel JS (2020) SV40 and human mesothelioma. *Translational Lung Cancer Research* 9(Suppl 1): S47-S59. <https://doi.org/10.21037/tlcr.2020.02.03>
- Casali M, Carugno M, Cattaneo A, Consonni D, Mensi C, Cavallo DM, Somigliana A, Pesatori AC (2015) Asbestos lung burden in necroscopic samples from the general population of Milan, Italy. *Annals of Occupational Hygiene* 59: 909-21. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mev028>
- Cersosimo F, Barbarino M, Lonardi S, Vermi W, Giordano A, Bellan C, Giurisato E (2021) Mesothelioma malignancy and the microenvironment: molecular mechanisms. *Cancers (Basel)* 13(22): 5664. <https://doi.org/10.3390/cancers13225664>
- Chen Z, Gaudino G, Pass HI, Carbone M, Yang H (2017) Diagnostic and prognostic biomarkers for malignant mesothelioma: an update. *Translational Lung Cancer Research* 6:259-69. <https://doi.org/10.21037/tlcr.2017.05.06>

- Cicala C, Pompetti F, Carbone M (1993) SV40 induces mesotheliomas in hamsters. *American Journal of Pathology* 142: 1524-33. PMID: 8388174
- Coin PG, Roggli VL, Brody AR (1994) Persistence of long, thin chrysotile asbestos fibers in the lungs of rats. *Environ Health Perspect* 102:197-9. <https://doi.org/10.1289/ehp.94102s5197>
- Creaney J, Dick IM, Robinson BW (2015) Discovery of new biomarkers for malignant mesothelioma. *Curr Pulmonology Reports* 4: 15-21. <https://doi.org/10.1007/s13665-015-0106-8>
- Currie GP, Watt SJ, Maskell NA (2009) An overview of how asbestos exposure affects the lung. *BMJ* 339: b3209. <https://doi.org/10.1136/bmj.b3209>
- Davis JM, Beckett ST, Bolton RE, Collings P, Middleton AP (1978) Mass and number of fibres in the pathogenesis of asbestos-related lung disease in rats. *British Journal of Cancer* 37:673-88. <https://doi.org/10.1038/bjc.1978.105>
- Dipper A, Maskell N, Bibby A (2021) Ancillary diagnostic investigations in malignant pleural mesothelioma. *Cancers (Basel)* 13(13): 3291. <https://doi.org/10.3390/cancers13133291>
- Dodson RF, Williams MG Jr, Corn CJ, Brollo A, Bianchi C (1990) Asbestos content of lung tissue, lymph nodes, and pleural plaques from former shipyard workers. *American Review of Respiratory Diseases* 142:843-7. <https://doi.org/10.1164/ajrccm/142.4.843>
- Donaldson K, Poland CA, Murphy FA, MacFarlane M, Chernova T, Schinwald A (2013) Pulmonary toxicity of carbon nanotubes and asbestos - similarities and differences. *Advanced Drug Delivery Reviews* 65: 2078-86. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2013.07.014>
- Elovskaja LT (1997) Antiasbestovaja kampanija i konferencija po probleme "Asbest i zdorov'e" [Anti-asbestos campaign and conference on "Asbestos and health issues"]. *Meditsina Truda i Promyshlennaia Ekologija* [Russian journal of occupational health and industrial ecology] (9): 16-21. PMID: 9440939
- Feder IS, Tischoff I, Theile A, Schmitz I, Merget R, Tannapfel A. The asbestos fibre burden in human lungs: new insights into the chrysotile debate. *Eur Respir J*. 2017;49(6):1602534. doi: 10.1183/13993003.02534-2016
- Fedoseev A.D. Федосеев А.Д., Григорьева Л.Ф., Макарова Т.А. Волокнистые силикаты. Природные и синтетические асбесты. Москва: Наука, 1966 - 184 с.
- Ferrari L, Carugno M, Mensi C, Pesatori AC (2020) Circulating epigenetic biomarkers in malignant pleural mesothelioma: state of the art and critical evaluation. *Frontiers of Oncology* 10: 445. <https://doi.org/10.3389/fonc.2020.00445>
- Finkelstein MM. Letter to the Editor re Bernstein et al: Health risk of chrysotile revisited. *Crit Rev Toxicol*, 2013;43(2):154-183. *Crit Rev Toxicol* 2013;43(8):707-708
- Finkelstein MM, Meisenkothen C (2010) Malignant mesothelioma among employees of a Connecticut factory that manufactured friction materials using chrysotile asbestos. *Annals of Occupational Hygiene* 54(6): 692-6. <https://doi.org/10.1093/annhyg/meq046>
- Frank AL (2020) Global use of asbestos - legitimate and illegitimate issues. *J Occupational Medicine and Toxicology* 15:16. <https://doi.org/10.1186/s12995-020-00267-y>
- Gaudino G, Xue J, Yang H (2020) How asbestos and other fibers cause mesothelioma. *Translational Lung Cancer Research* 9(Suppl 1): S39-46. <https://doi.org/10.21037/tlcr.2020.02.01>
- Gibbs AR, Stephens M, Griffiths DM, Blight BJ, Pooley FD (1991) Fibre distribution in the lungs and pleura of subjects with asbestos related diffuse pleural fibrosis. *British Journal of Industrial Medicine* 48: 762-70. <https://doi.org/10.1136/oem.48.11.762>

Goldberg M, Imbernon E, Rolland P, Gilg Soit Ilg A, Savès M, de Quillacq A, Frenay C, Chamming's S, Arveux P, Boutin C, Launoy G, Pairon JC, Astoul P, Galateau-Sallé F, Brochard P (2006) The French national mesothelioma surveillance program. *Occupational and Environmental Medicine* 63: 390-5. <https://doi.org/10.1136/oem.2005.023200>

Goodman JE, Rhomberg LR, Cohen SM, Mundt KA, Case B, Burstyn I, Becich MJ, Gibbs G (2025) Challenges in defining thresholds for health effects: some considerations for asbestos and silica. *Front Epidemiol* 5: 1557023. doi: 10.3389/fepid.2025.1557023

Greim H, Utell MJ, Maxim LD, Niebo R (2014) Perspectives on refractory ceramic fiber (RCF) carcinogenicity: comparisons with other fibers. *Inhalation Toxicology* 26: 789-810. <https://doi.org/10.3109/08958378.2014.953276>

Grigoriu BD, Grigoriu C, Chahine B, Gey T, Scherpereel A (2009) Clinical utility of diagnostic markers for malignant pleural mesothelioma. *Monaldi Archive of Chest Diseases* 71(1): 31-38. <https://doi.org/10.4081/monaldi.2009.374>

Gualtieri AF (2023) Journey to the centre of the lung. The perspective of a mineralogist on the carcinogenic effects of mineral fibres in the lungs. *Journal of Hazardous Materials* 442: 130077. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130077>

Gupta SS, Singh KP, Gupta S, Dusinska M, Rahman Q (2022) Do carbon nanotubes and asbestos fibers exhibit common toxicity mechanisms? *Nanomaterials (Basel)* 12(10): 1708. <https://doi.org/10.3390/nano12101708>

Gwinn MR, DeVoney D, Jarabek AM, Sonawane B, Wheeler J, Weissman DN, Masten S, Thompson C (2011) Meeting report: mode(s) of action of asbestos and related mineral fibers. *Environmental Health Perspectives* 119: 1806-10. <https://doi.org/10.1289/ehp.1003240>

Harington JS (1991) The carcinogenicity of chrysotile asbestos. *Annals of the New York Academy of Sciences* 643:465-72. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1991.tb24496.x>

Harris EJA, Musk A, de Klerk N, Reid A, Franklin P, Brims FJH (2019) Diagnosis of asbestos-related lung diseases. *Expert Rev Respiratory Medicine* 13(3):241-9. <https://doi.org/10.1080/17476348.2019.1568875>

Hesterberg TW, Barrett JC (1984) Dependence of asbestos- and mineral dust-induced transformation of mammalian cells in culture on fiber dimension. *Cancer Research* 44:2170-80. PMID: 6324999

Hillerdal G, Henderson DW (1997) Asbestos, asbestosis, pleural plaques and lung cancer. *Scand Journal of Work and Environmental Health* 23(2): 93-103. <https://doi.org/10.5271/sjweh.186>

Ho M, Bera TK, Willingham MC, Onda M, Hassan R, FitzGerald D, Pastan I (2007) Mesothelin expression in human lung cancer. *Clinical Cancer Research* 13(5):1571-5. <https://doi.org/10.1158/1078-0432.CCR-06-2161>

Hodgson JT, Darnton A (2000) The quantitative risks of mesothelioma and lung cancer in relation to asbestos exposure. *Annals of Occupational Hygiene* 44:565-601. PMID: 11108782

Hodgson JT, Darnton A (2010) Mesothelioma risk from chrysotile. *Occupational and Environmental Medicine* 67: 432. <https://doi.org/10.1136/oem.2009.052860>

IARC (1996) Consensus report. Mechanisms of fibre carcinogenesis. IARC Scientific Publications (140): 1-9. PMID: 9221250

Iatsenko AS, Kogan FM (1990) Professional'naja zaboлеваemost' i smertnost' ot zlokachestvennyh novoobrazovanij sredi lic, imejushhih professional'nyi kontakt s asbestovoi pyl'ju [Occupational morbidity and mortality in malignant neoplasms among persons

professionally exposed to asbestos dust]. *Gigiena Truda i Professional'nye Zabolevaniia* [Work hygiene and professional diseases] (2): 10-2. PMID: 2139623

Iatsenko AS, Kogan FM, El'nichnykh LN, Remizova II (1991) Sravnitel'noe issledovanie fibrinogennoi aktivnosti pyly pri proizvodstve asbestoformovannykh detalei [Comparative evaluation of the dust's fibrinogen activity in asbestos-forming units production]. *Gigiena i Sanitariia* [Hygiene and sanitation] (8):27-9. PMID: 1937092

Iatsenko AS, Kogan FM, Fomina AS, Zykova VA, Nikitina OV, Vanchugova NN, Bogdanov GB, Aliamovskii SI, Pereliaeva LA (1994) O vzaimosvyazi mezhdu biologicheskoy agressivnostiu i nekotorymi fiziko-khimicheskimi svoystvami promyshlennoy pyli, vznikayushchey pri proizvodstve i primenenii friktsionnykh izdelii [Correlation between biologic aggression and some physical and chemical properties of industrial dust caused by use of friction tools]. *Medsina Truda i Promyshlennaia Ekologiya* [Russian journal of occupational health and industrial ecology] (12): 29-33. PMID: 7719655

Ilgren E, Van Orden DR, Lee RJ, Kamiya YM, Hoskins JA (2015) Further studies of Bolivian crocidolite - Part IV: Fibre width, fibre drift and their relation to mesothelioma induction: Preliminary findings. *Epidemiology Biostatistics and Public Health* 12: e11167-1. <https://doi.org/10.2427/11167>

Izmerov NF, Kovalevskii EV (2004) Normativnoe obespechenie kontroliruемого ispol'zovaniya asbestosoderzhashchikh materialov v stroitel'stve [Regulations of controlled use of asbestos-containing materials in construction industry]. *Medsina Truda i Promyshlennaia Ekologiya* [Russian journal of occupational health and industrial ecology] (5): 5-12. PMID: 15216638

Izmerov NF, Elovskaya LT, Milishnikova VV, Burmistrova TB, Kovalevskii EV (1998) Khrizotil-asbest v Rossii: nekotoryye rezul'taty i perspektivnyye napravleniya issledovaniy [Chrysotile asbestos in Russia: certain results and promising research directions]. *Medsina Truda i Promyshlennaia Ekologiya* [Russian journal of occupational health and industrial ecology] (10): 1-7. PMID: 9855738

Janosikova M, Nakladalova M, Stepanek L. Current causes of mesothelioma: how has the asbestos ban changed the perspective? *Biomed Pap Med Fac Univ Palacky Olomouc Czech Repub.* 2023;167(2):99-108. doi: 10.5507/bp.2023.008

Jargin SV (2017) Asbestos, mesothelioma and lung cancer: a comment. *Galore International Journal of Health Sciences and Research*; 2(4):19-29. https://www.gijhsr.com/GIJHSR_Vol.2_Issue.4_Dec2017/4.pdf

Jargin SV (2018) Asbestos and mesothelioma: a comment. *Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine* 22(2):113-4. https://doi.org/10.4103/ijoem.IJOEM_49_18

Järnholm B, Burdorf A. Asbestos and disease - a public health success story? *Scand J Work Environ Health.* 2024;50(2):53-60. doi: 10.5271/sjweh.4146

Jasani B, Gibbs A (2012) Mesothelioma not associated with asbestos exposure. *Archives of Pathology and Laboratory Medicine* 136: 262-7. <https://doi.org/10.5858/arpa.2011-0039-RA>

Kane AB, Hurt RH, Gao H (2018) The asbestos-carbon nanotube analogy: An update. *Toxicology and Applied Pharmacology* 361:68-80. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2018.06.027>

Kaptsov VA, Kashanskii SV, Domnin SG, Tikhova TS, Trofimova EV, Novoselova TA, Bogdanov GB. (2003) Zheleznodorozhnoye ispol'zovaniye asbestosoderzhashchego shchebnya: ekologo-gigiyenicheskiye aspekty [Railway use of asbestos-containing rubble: environmental hygienic aspects]. *Gigiena i Sanitariia* [Hygiene and sanitation] (5):11-5. PMID: 14598741

Kashanskii SV (2008) Mezotelioma v rossii: sistemnyj obzor 3576 opublikovannykh sluchaev s pozicij mediciny truda [Mesothelioma in Russia: systematic review of 3576 published cases

- from occupational medicine viewpoint]. *Medsina Truda i Promyshlennaia Ekologiya* [Russian journal of occupational health and industrial ecology] (3): 15-21. PMID: 18461798
- Kashanskii SV, Kogan FM (1995) Opasnost' razvitiya raka legkikh pri proizvodstve asbestovykh paneley [The danger of developing lung cancer in the manufacture of asbestos panel]. *Medsina Truda i Promyshlennaia Ekologiya* [Russian journal of occupational health and industrial ecology] (5): 19-22. PMID: 7663849
- Kashanskii SV, Kogan FM, Malysheva LG, Zykova VA (1994) Sravnitel'naya otsenka fibrogezeza i toksichnosti asbestosoderzhashchikh teplozashchitnykh materialov [Comparative evaluation of fibrogenesis and toxicity of asbestos-containing heat-proof materials]. *Medsina Truda i Promyshlennaia Ekologiya* [Russian journal of occupational health and industrial ecology] (1): 17-21. PMID: 7804707
- Kashanskii SV, Domnin SG, Plotko EG, Kuz'min SV, Seliankina SV, Likhacheva EI (2004) Sovremennye problemy asbesta i perspektivnye napravleniya issledovaniy [Contemporary problems of asbestos and prospective research directions]. *Medsina Truda i Promyshlennaia Ekologiya* [Russian journal of occupational health and industrial ecology] (9): 16-9. PMID: 15568563
- Kashanskii SV, Zhetpisbaev BA, Il'derbaev OZ, Ermenbai OT (2008) Mezotelioma v Respublike Kazakhstan: obzor [Mesothelioma in the Republic of Kazakhstan: a review]. *Gigiena i Sanitariia* [Hygiene and sanitation] (5):13-7. PMID: 14598741
- Kazantsev V.A. The use of bronchological sanation for treatment of community-acquired pneumonia. Russian Respiratory Society. 14th National Congress of Lung diseases: proc. congr., Moscow, 2004 June 22–26. M., 2004. P. 361. [In Russian].
- Kerger BD, James RC, Galbraith DA (2014) Tumors that mimic asbestos-related mesothelioma: Time to consider a genetics-based tumor registry? *Frontiers in Genetics* 5:151. <https://doi.org/10.3389/fgene.2014.00151>
- Kogan FM (1995) Sovremennye predstavleniya o bezopasnosti asbesta [Modern concept of asbestos safety]. Argo, Ekaterinburg. (in Russian)
- Kogan FM. Основные результаты исследований по проблеме «Асбест-Здоровье». В кн.: Кашанский С.В. и др., ред. Профилактика асбестообусловленных заболеваний: Сб. публ. Асбест: Асбестовая ассоц. 2002a; 7-9.
- Kogan FM. К вопросу о нормировании асбестосодержащих пылей в воздухе рабочих помещений. В кн.: Кашанский С.В. и др., ред. Профилактика асбестообусловленных заболеваний: Сб. публ. Асбест: Асбестовая ассоц. 2002b; 57-63.
- Kogan FM, Kashanskii SV, Plotko EG, Berzin SA, Bogdanov GB (1993) Vliyaniye nizkoy kontsentratsii asbestosoderzhashchey pyli [Effect of low concentration of asbestos-containing dust]. *Medsina Truda i Promyshlennaia Ekologiya* [Russian journal of occupational health and industrial ecology] (5-6): 6-10. PMID: 8069511
- Kohyama N, Suzuki Y (1991) Analysis of asbestos fibers in lung parenchyma, pleural plaques, and mesothelioma tissues of North American insulation workers. *Annals of the New York Academy of Sciences* 643: 27-52. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1991.tb24442.x>
- Koigeldinova Sh.S., Ibraev S.A., Zhuzbaeva G.O., Kasymova A.K. Modern view on the problem occupational lung disease exposure chrysotile asbestos. *Bulletin of the Karaganda University. Series Biology. Medicine. Geography* 2015;79(3):122-131.
- Kovalevskii EV (2009) Gigienicheskaya ocenka ispol'zovaniya asbestsoderzhashhih frikcionnykh izdelii [Hygienic evaluation of asbestos-containing friction goods application]. *Medsina Truda i*

- Promyshlennaia Ekologiya [Russian journal of occupational health and industrial ecology] (7): 1-6. PMID: 19718834
- Krasovskii GN, Egorova NA (1985) Asbest i kachestvo pit'yevoy vody [Asbestos and the quality of drinking water]. *Gigiena i Sanitariia* [Hygiene and sanitation] (3):64-7. PMID: 3891523
- Krasovskii GN, Mozhaev EA (1993) Asbest v pit'yevoy vode (obzor) [Asbestos in drinking water (review)]. *Gigiena i Sanitariia* [Hygiene and sanitation] (6):20-22. PMID: 8406075
- Kraus T, Jonigk D. Mesotheliome – 30 Jahre nach dem Asbestverbot in Deutschland. *Pathologie (Heidelb)*. 2024;45(5):305-308. doi: 10.1007/s00292-024-01350-5.
- Kwak K, Kang D, Paek D (2022) Environmental exposure to asbestos and the risk of lung cancer: a systematic review and meta-analysis. *Occupational and Environmental Medicine* 79(3):207-14. <https://doi.org/10.1136/oemed-2020-107222>
- Landrigan PJ, Nicholson WJ, Suzuki Y, Ladou J (1999) The hazards of chrysotile asbestos: a critical review. *Industrial Health* 37:271-80. <https://doi.org/10.2486/indhealth.37.271>
- Langer AM, Nolan RP (1994) Chrysotile: its occurrence and properties as variables controlling biological effects. *Annals of Occupational Hygiene* 38(4): 427-51. <https://doi.org/10.1093/annhyg/38.4.427>
- Larsen G (1989) Experimental data on in vitro fibre solubility. IARC Scientific Publications (90): 134-9. PMID: 2545602
- Lenters V, Vermeulen R, Dogger S, Stayner L, Portengen L, Burdorf A, Heederik D (2011) A meta-analysis of asbestos and lung cancer: is better quality exposure assessment associated with steeper slopes of the exposure-response relationships? *Environmental Health Perspectives* 119(11): 1547-55. <https://doi.org/10.1289/ehp.1002879>
- Likhacheva EI, Iarina AL, Vagina ER, Klimina MS, Obukhova TIu, Dovgoliuk TA, Kashanski SV (2000) Klinicheskie osobennosti zabolevaniy legkih ot vozdejstviya pyli hrizotil-asbesta [Clinical features of pulmonary diseases caused by chrysotile asbestos dust]. *Medsina Truda i Promyshlennaia Ekologiya* [Russian journal of occupational health and industrial ecology] (11): 30-3. PMID: 11280281
- Lindholm PM, Salmenkivi K, Vauhkonen H, Nicholson AG, Anttila S, Kinnula VL, Knuutila S (2007) Gene copy number analysis in malignant pleural mesothelioma using oligonucleotide array CGH. *Cytogenetic and Genome Research* 119: 46-52. <https://doi.org/10.1159/000109618>
- Lorenzini E, Ciarrocchi A, Torricelli F (2021) Molecular fingerprints of malignant pleural mesothelioma: not just a matter of genetic alterations. *Journal of Clinical Medicine* 10(11): 2470. <https://doi.org/10.3390/jcm10112470>
- Malinconico S, Paglietti F, Serranti S, Bonifazi G, Lonigro I (2022) Asbestos in soil and water: A review of analytical techniques and methods. *Journal of Hazardous Materials* 436: 129083. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129083>
- Marsili D, Terracini B, Santana VS, Ramos-Bonilla JP, Pasetto R, Mazzeo A, Loomis D, Comba P, Algranti E (2016) Prevention of asbestos-related disease in countries currently using asbestos. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 13(5): 494. <https://doi.org/10.3390/ijerph13050494>
- Mazzoni E., Bononi I., Rotondo J.C., Mazziotta C., Libener R., Guaschino R., Gafà R., Lanza G., Martini F., Tognon M. Sera from patients with malignant pleural mesothelioma tested positive for IgG antibodies against SV40 large t antigen: the viral oncoprotein. *J. Oncol.* 2022;2022:7249912. doi: 10.1155/2022/7249912

- Milishnikova VV, Loshchilov IU, Gladkova EV, Aksenova AO, Turkina LA (1990) Endoskopicheskaya i morfologicheskaya kharakteristika bronkhov i legkikh pri asbestoze i pylevom bronkhite u rabotnikov asbotekstil'noy promyshlennosti [Endoscopic and morphological characteristics of the bronchi and lungs in asbestosis and dust-induced bronchitis in asbestos-textile industry workers]. *Gigiena Truda i Professional'nye Zabolevaniia* [Work hygiene and professional diseases] (7): 19-22. PMID: 2210423
- Mossman BT, Lippmann M, Hesterberg TW, Kelsey KT, Barchowsky A, Bonner JC (2011) Pulmonary endpoints (lung carcinomas and asbestosis) following inhalation exposure to asbestos. *Journal of Toxicology and Environmental Health. Part B, Critical Reviews* 14(1-4): 76-121. <https://doi.org/10.1080/10937404.2011.556047>
- Musti M, Kettunen E, Dragonieri S, Lindholm P, Cavone D, Serio G, Knuutila S (2006) Cytogenetic and molecular genetic changes in malignant mesothelioma. *Cancer Genetics and Cytogenetics* 170: 9-15. <https://doi.org/10.1016/j.cancergencyto.2006.04.011>
- Nash A, Creaney J. Genomic Landscape of Pleural Mesothelioma and Therapeutic Aftermaths. *Curr Oncol Rep.* 2023;25(12):1515-1522. doi: 10.1007/s11912-023-01479-1.
- Neiman SM, Vezentsev AI, Kashanskii SV (2006) O bezopasnosti asbestocementnykh materialov i izdelii [About safety of asbestos-cement materials and products]. *Stroimaterialy*, Moscow. (in Russian)
- Nel A. Carbon nanotube pathogenicity conforms to a unified theory for mesothelioma causation by elongate materials and fibers. *Environ Res.* 2023;230:114580. doi: 10.1016/j.envres.2022.114580
- Nel AE, Pavlisko EN, Roggli VL. The Interplay Between the Immune System, Tumor Suppressor Genes, and Immune Senescence in Mesothelioma Development and Response to Immunotherapy. *J Thorac Oncol.* 2024 Apr;19(4):551-564. doi: 10.1016/j.jtho.2023.11.017.
- Nicholson WJ (1991) Comparative dose-response relationships of asbestos fiber types: magnitudes and uncertainties. *Annals of the New York Academy of Sciences* 643: 74-84. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1991.tb24446.x>
- Noonan CW (2017) Environmental asbestos exposure and risk of mesothelioma. *Annals of Translational Medicine* 5(11): 234. <https://doi.org/10.21037/atm.2017.03.74>
- Panou V, Vyberg M, Weinreich UM, Meristoudis C, Falkmer UG, Røe OD (2015) The established and future biomarkers of malignant pleural mesothelioma. *Cancer Treatment Reviews* 41: 486-95. <https://doi.org/10.1016/j.ctrv.2015.05.001>
- Pantazopoulos I, Boura P, Xanthos T, Syrigos K (2013) Effectiveness of mesothelin family proteins and osteopontin for malignant mesothelioma. *European Respiratory Journal* 41(3): 706-15. <https://doi.org/10.1183/09031936.00226111>
- Paustenbach D, Brew D, Ligas S, Heywood J (2021) A critical review of the 2020 EPA risk assessment for chrysotile and its many shortcomings. *Critical Reviews in Toxicology* 51(6): 509-539. <https://doi.org/10.1080/10408444.2021.1968337>
- Peña-Castro M, Montero-Acosta M, Saba M. A critical review of asbestos concentrations in water and air, according to exposure sources. *Heliyon.* 2023;9(5):e15730. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e15730
- Pezerat H (2009) Chrysotile biopersistence: the misuse of biased studies. *International Journal of Occupational and Environmental Health* 15:102-106. <https://doi.org/10.1179/107735209799449770>
- Pylev LN (1987) Rol' modifitsiruyushchikh faktorov v kantserogennom deystvii asbesta i asbestosoderzhashchikh pyley [The role of modifying factors in the carcinogenic effect of

asbestos and asbestos-containing dusts]. *Ekspimentalnaia Onkologiya* [Experimental oncology] 9(5): 14-7. PMID: 3319515

Pylev LN, Kogan FM, Kulagina TF (1988) Kantserogennaya aktivnost' asbestotsementnoy pyli [Carcinogenic activity of asbestos cement dust]. *Gigiena Truda i Professional'nye Zabolevaniia* [Work hygiene and professional diseases] (7): 55-7. PMID: 3181789

Pylev LN, Smirnova OV, Vasil'eva LA, Khrustalev SA, Vezentsev AI, Gudkova EA, Naumova LN (2010) Eksperimental'noe obosnovanie kancerogennoj opasnosti asbestocementnoi promyshlennosti i ee produktsii [Experimental rationale for carcinogenic risk of asbestos cement industry and its products]. *Gigiena i Sanitariia* [Hygiene and sanitation] (6): 61-5. PMID: 21381365

Pylev L.N., Smirnova O.V., Vezentsev A.I. Chrysotile-cement industry - is it a source of carcinogenic hazard to humans? *Toksikologicheskiiy vestnik = Toxicological Review* 2011;94):46-50.

Ramada Rodilla JM, Calvo Cerrada B, Serra Pujadas C, Delclos GL, Benavides FG (2022) Fiber burden and asbestos-related diseases: an umbrella review. *Gaceta Sanitaria* 36(2):173-83. <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2021.04.001>

Repina ZhV, Chemyakina NA, Tarskaya-Lapteva EG (2009) Khrizotiltsementnyye stroitel'nyye materialy. Oblasti ispol'zovaniya [Chrysotile cement building materials. Areas of use]. Yekaterinburg, AMB. (in Russian)

Røe OD, Stella GM (2015) Malignant pleural mesothelioma: history, controversy and future of a manmade epidemic. *European Respiratory Review* 24: 115-31. <https://doi.org/10.1183/09059180.00007014>

Røe OD, Anderssen E, Helge E, Pettersen CH, Olsen KS, Sandeck H, Haaverstad R, Lundgren S, Larsson E (2009) Genome-wide profile of pleural mesothelioma versus parietal and visceral pleura: the emerging gene portrait of the mesothelioma phenotype. *PLoS One*;4: e6554. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0006554>

Rossi G, Davoli F, Poletti V, Cavazza A, Lococo F (2021) When the diagnosis of mesothelioma challenges textbooks and guidelines. *Journal of Clinical Medicine* 10(11): 2434. <https://doi.org/10.3390/jcm10112434>

Rossini M, Rizzo P, Bononi I, Clementz A, Ferrari R, Martini F, Tognon MG (2018) New perspectives on diagnosis and therapy of malignant pleural mesothelioma. *Frontiers of Oncology* 8: 91. <https://doi.org/10.3389/fonc.2018.00091>

Schillebeeckx E, van Meerbeeck JP, Lamote K (2021) Clinical utility of diagnostic biomarkers in malignant pleural mesothelioma: a systematic review and meta-analysis. *European Respiratory Review* 30(162): 210057. <https://doi.org/10.1183/16000617.0057-2021>

Sebastien P, Janson X, Gaudichet A, Hirsch A, Bignon J (1980) Asbestos retention in human respiratory tissues: comparative measurements in lung parenchyma and in parietal pleura. *IARC Scientific Publications* (30): 237-46. PMID: 7239642

Sekido Y (2013) Molecular pathogenesis of malignant mesothelioma. *Carcinogenesis* 34: 1413-19. <https://doi.org/10.1093/carcin/bgt166>

Shanin NP, Borodulin MM, Kolbovsky YuYa, Krasovsky VN (1983) Proizvodstvo asbestovykh tekhnicheskikh izdelii [Production of asbestos technical products]. Leningrad, Khimia. (in Russian)

Shtol AV, Plotko EG, Seliankina KP (2000) Zagryaznenie atmosfernogo vozduha asbestosoderzhashhej pyl'ju i zdorov'e detskogo naseleniya [Children's health and environmental air pollution with dust containing asbestos]. *Medsitsina Truda i Promyshlennaia Ekologiya* [Russian journal of occupational health and industrial ecology] (11): 10-3. PMID: 11280276

- Smith AH, Wright CC (1996) Chrysotile asbestos is the main cause of pleural mesothelioma. *American Journal of Industrial Medicine* 30: 252-66. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0274\(199609\)30:3<252::AID-AJIM2>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0274(199609)30:3<252::AID-AJIM2>3.0.CO;2-0)
- Stayner LT (2008) Canada, chrysotile and cancer: Health Canada's Asbestos International Expert Panel report. *Journal of Occupational and Environmental Medicine* 50(12): 1327-8. <https://doi.org/10.1097/JOM.0b013e318190eff3>
- Stayner LT, Dankovic DA, Lemen RA (1996) Occupational exposure to chrysotile asbestos and cancer risk: a review of the amphibole hypothesis. *American Journal of Public Health* 86: 179-86. <https://doi.org/10.2105/ajph.86.2.179>
- Stayner LT, Dankovic DA, Lemen RA (1997) Asbestos-related cancer and the amphibole hypothesis: 2. Stayner and colleagues respond. *American Journal of Public Health* 87: 688.
- Suzuki Y, Yuen SR (2002) Asbestos fibers contributing to the induction of human malignant mesothelioma. *Annals of the New York Academy of Sciences* 982: 160-76. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2002.tb04931.x.24>
- Suzuki Y, Yuen SR, Ashley R (2005) Short, thin asbestos fibers contribute to the development of human malignant mesothelioma: pathological evidence. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 208(3): 201-10. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2005.01.015>
- Testa JR, Carbone M, Hirvonen A, Khalili K, Krynska B, Linnainmaa K, Pooley FD, Rizzo P, Rusch V, Xiao GH (1998) A multi-institutional study confirms the presence and expression of simian virus 40 in human malignant mesotheliomas. *Cancer Research* 58(20): 4505-9. PMID: 9788590
- Tomasetti M, Amati M, Santarelli L, Alleva R, Neuzil J (2009) Malignant mesothelioma: biology, diagnosis and therapeutic approaches. *Current Molecular Pharmacology* 2: 190-206. <https://doi.org/10.2174/1874467210902020190>
- Tossavainen A, Kotilainen M, Takahashi K, Pan G, Vanhala E (2001) Amphibole fibres in Chinese chrysotile asbestos. *Annals of Occupational Hygiene* 45: 145-52. PMID: 11182428
- Toyokuni S (2013) Genotoxicity and carcinogenicity risk of carbon nanotubes. *Advanced Drug Delivery Reviews* 65: 2098-110. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2013.05.011>
- Troitskaia NA (1993) Sravnitel'noye issledovaniye tsitotoksichnosti pyli uglerodnykh volokon i drugikh voloknistykh materialov [A comparative study of cytotoxicity of dust of carbon fibers and other fibrous materials]. *Gigiena i Sanitariia [Hygiene and sanitation]* (3): 28-30. PMID: 8063120
- Tsurikova GV, Spitsyn VA, Gladkova EV, Minaeva OP (1992) Biodemograficheskiye parametry kak indikatory geneticheskoy adaptatsii k vrednym professional'nym faktoram na primere asbesta [Biodemographic parameters as indicators of genetic adaptation to harmful occupational factors (e.g. asbestos)]. *Gigiena Truda i Professional'nye Zabolevaniia [Work hygiene and professional diseases]* (6): 28-30. PMID: 1478521
- Van Berlo D, Clift MJ, Albrecht C, Schins RP (2012) Carbon nanotubes: an insight into the mechanisms of their potential genotoxicity. *Swiss Medical Weekly* 142: w13698. <https://doi.org/10.4414/sm.w.2012.13698>
- Vandenhoeck J, van Meerbeeck JP, Fransen E, Raskin J, Van Camp G, Op de Beeck K, Lamote K (2021) DNA methylation as a diagnostic biomarker for malignant mesothelioma: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Thoracic Oncology* 16(9): 1461-78. <https://doi.org/10.1016/j.jtho.2021.05.015>
- Vereshchagin A.L., Morozova E.A. Specific toxicity of nanoparticles (review). *South-Siberian Scientific Bulletin* 2022;1(41):76-88.

- Voytsekhovskiy VV, Goborov ND, Landyshev YuS, Grigorenko AA, Lazutkina EL (2016) Features of diagnosis of malignant pleural mesothelioma. *Byulleten' fiziologii i patologii dykhaniya* [Bulletin physiology and pathology of respiration] (60): 85-93. <https://doi.org/10.12737/20127>
- Wagner JC (1975) Proceedings: Asbestos carcinogenesis. *British Journal of Cancer* 32: 258-9. <https://doi.org/10.1038/bjc.1975.206>
- Wagner JC, Berry G, Skidmore JW, Timbrell V (1974) The effects of the inhalation of asbestos in rats. *British Journal of Cancer* 29: 252-69. <https://doi.org/10.1038/bjc.1974.65>
- Wang J, Schlagenhauf L, Setyan A (2017) Transformation of the released asbestos, carbon fibers and carbon nanotubes from composite materials and the changes of their potential health impacts. *Journal of Nanobiotechnology* 15(1): 15. <https://doi.org/10.1186/s12951-017-0248-7>
- Wolff H, Vehmas T, Oksa P, Rantanen J, Vainio H (2015) Asbestos, asbestosis, and cancer, the Helsinki criteria for diagnosis and attribution 2014: recommendations. *Scandinavian Journal of Work and Environmental Health* 41(1): 5-15. <https://doi.org/10.5271/sjweh.3462>
- Wong JYY, Rice C, Blair A, Silverman DT (2020) Mesothelioma risk among those exposed to chrysotile asbestos only and mixtures that include amphibole: a case-control study in the USA, 1975-1980. *Occupational and Environmental Medicine* <https://doi.org/10.1136/oemed-2020-106665>
- Yang H, Testa JR, Carbone M (2008) Mesothelioma epidemiology, carcinogenesis, and pathogenesis. *Current Treatment Options in Oncology* 9: 147-57. <https://doi.org/10.1007/s11864-008-0067-z>
- Yu CP, Asgharian B, Pinkerton KE (1991) Intrapulmonary deposition and retention modeling of chrysotile asbestos fibers in rats. *Journal of Aerosol Science* 22: 757-63. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(91\)90068-S](https://doi.org/10.1016/0021-8502(91)90068-S)