УДК 504.064
МРНТИ 87.19.15
DOI 10.56525/ZVCC6505

ОЦЕНКА ПЫЛЕВОЙ НАГРУЗКИ КАРЬЕРОВ РАКУШЕЧНИКА И МЕРЫ ЕЁ СНИЖЕНИЯ

Букаев Елдар Захарович
Университет Есенова, Актау, Казахстан
e-mail: yeldar1.bukayev@yu.edu.kz

Аннотация. Цель исследования состояла в оценке пространственно-временных особенностей пылевой нагрузки в населённых пунктах Мангистауской области, находящихся в зоне влияния карьеров по добыче и обработке камня-ракушечника, и в обосновании приоритетных мер её снижения. Информационную основу составили открытые данные мониторинга качества воздуха по взвешенным частицам, материалы о размещении карьеров и сведения о метеорологических условиях региона. Применены сравнительный, пространственный и причинно-следственный анализы. Установлено, что наиболее уязвимым участком является село Шетпе, где сочетание близости многочисленных карьеров, открытого складирования мелкофракционных отходов и ветрового переноса формирует эпизоды повышенной запылённости. Зафиксированные значения следует интерпретировать как совокупный показатель качества воздуха, а не как прямое доказательство вклада одного источника. Для управления риском предложена иерархия мер: предотвращение образования пыли, укрытие источников, локальная аспирация, очистка газов, стабилизация отвалов и непрерывный контроль на границе санитарно-защитной зоны. Практическая значимость работы заключается в формировании технологически ориентированной схемы управления пылевыми выбросами для предприятий по добыче и обработке ракушечника в аридных условиях.

Ключевые слова: камень-ракушечник; карьер; пылевая нагрузка; взвешенные частицы; мониторинг; аспирация; пылеподавление; Мангистауская область.

Введение

Добыча и распиловка камня-ракушечника остаются значимой частью строительного сектора Мангистауской области. При механическом разрушении, транспортировании и складировании породы образуется мелкодисперсный материал, который в условиях засушливого климата и сильных ветров может переноситься за пределы производственных площадок. Поэтому задача заключается не только в описании экологических последствий, но и в выявлении управляемых источников пыли и выборе технологических мер, способных уменьшить выбросы непосредственно в месте их образования.

По региональным сведениям, в области действует 25 карьеров строительного камня, а село Шетпе окружено группой добывающих объектов. Открытые отвалы, неукрытые конвейеры, дробильно-сортировочные операции, движение транспорта по грунтовым дорогам и погрузка продукции формируют совокупную пылевую нагрузку. При этом данные городских станций качества воздуха отражают влияние не только карьеров, но также транспорта, отопления, фоновой минеральной пыли и метеорологических условий; следовательно, причинная связь требует осторожной интерпретации.

Цель исследования – оценить пространственно-временные особенности пылевой нагрузки в населённых пунктах Мангистауской области, выделить технологически управляемые источники и обосновать последовательность мер по снижению выбросов на карьерах камня-ракушечника. Научная новизна заключается в переходе от общего описания последствий к источнико-ориентированной оценке и ранжированию инженерных мероприятий по принципу «предотвращение – локализация – очистка – контроль».

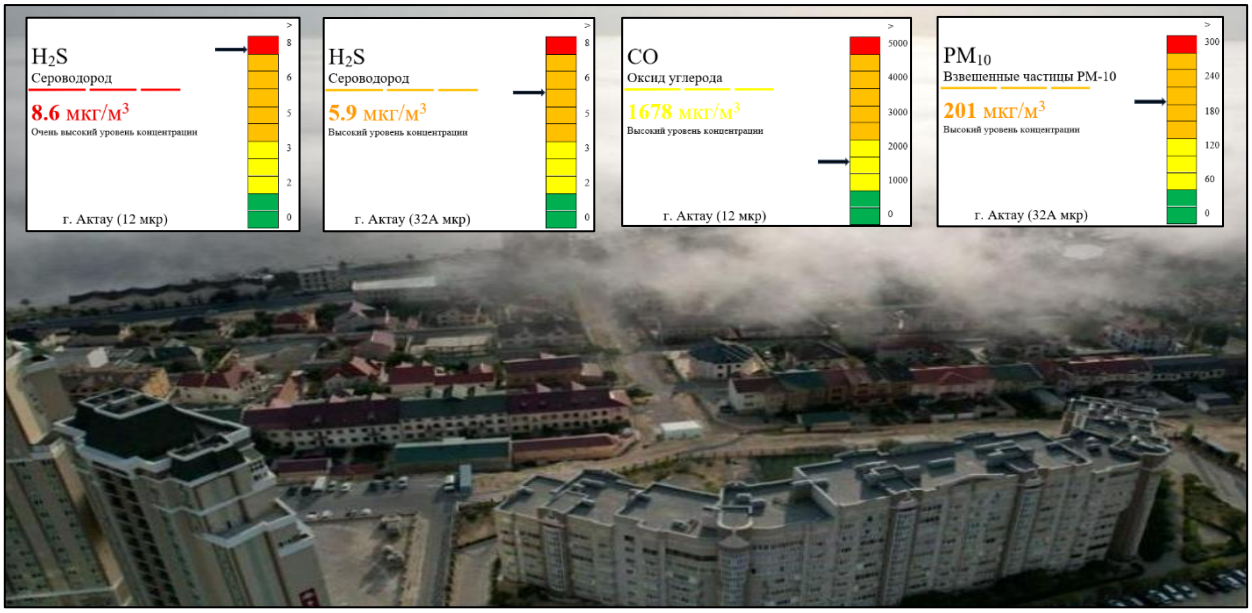


Рисунок 1 – Загрязнение воздуха Мангистауской области (по данным airkaz.org)

Материалы и методы исследования

Исследование выполнено как сравнительная оценка открытых данных о взвешенных частицах в Актау, Жанаозене, Курыке и Шетпе. Использованы опубликованные значения PM2.5 и индекса качества воздуха, сведения о размещении карьерных объектов и сообщения о периодах интенсивной запылённости. Единицей сравнения служила концентрация частиц в микрограммах на кубический метр; значения индекса качества воздуха рассматривались отдельно, поскольку индекс является безразмерной категорией риска и не равен концентрации.

Анализ включал четыре этапа: проверку единиц измерения и дат наблюдений; сопоставление населённых пунктов; выделение сезонных эпизодов; формирование перечня вероятных источников. Для оценки санитарной значимости использована рекомендованная Всемирной организацией здравоохранения суточная концентрация PM2.5 15 мкг/м³ [10]. Превышение рассчитывали как отношение наблюдаемой концентрации к указанному ориентиру.

Пространственная интерпретация проводилась по принципу близости населённых пунктов к карьерным зонам и возможного ветрового переноса. Из-за отсутствия синхронных измерений на наветренной и подветренной границах каждого карьера результаты не использовались для расчёта точного вклада отдельного предприятия. Это ограничение учтено при формулировании выводов.

Технологические меры ранжировались по пяти критериям: воздействие на источник образования пыли, ожидаемая эффективность, применимость в аридном климате, потребность в воде и возможность инструментального контроля. Приоритет получали решения, предотвращающие выброс до его рассеивания: закрытие узлов, аспирация, локальная очистка и стабилизация отходов.

Результаты исследования

Сопоставление доступных наблюдений показало выраженную пространственную неоднородность. За рассматриваемые даты среднесуточные значения PM2.5 составляли 70 мкг/м³ в Актау, 55 мкг/м³ в Шетпе, 54 мкг/м³ в Жанаозене и 404 мкг/м³ в Курыке. Относительно суточного ориентира Всемирной организации здравоохранения 15 мкг/м³ эти уровни соответствуют превышению приблизительно в 4,7; 3,7; 3,6 и 26,9 раза. Сравнение относится к отдельным наблюдениям и не характеризует среднегодовую экспозицию [4, 5, 10].

На рисунке 2 показано пространственное различие индекса качества воздуха. Наибольшее разовое значение не следует автоматически связывать только с карьерной деятельностью: для атрибуции источника необходимы параллельные измерения направления ветра, фоновой концентрации и химико-минералогического состава частиц.

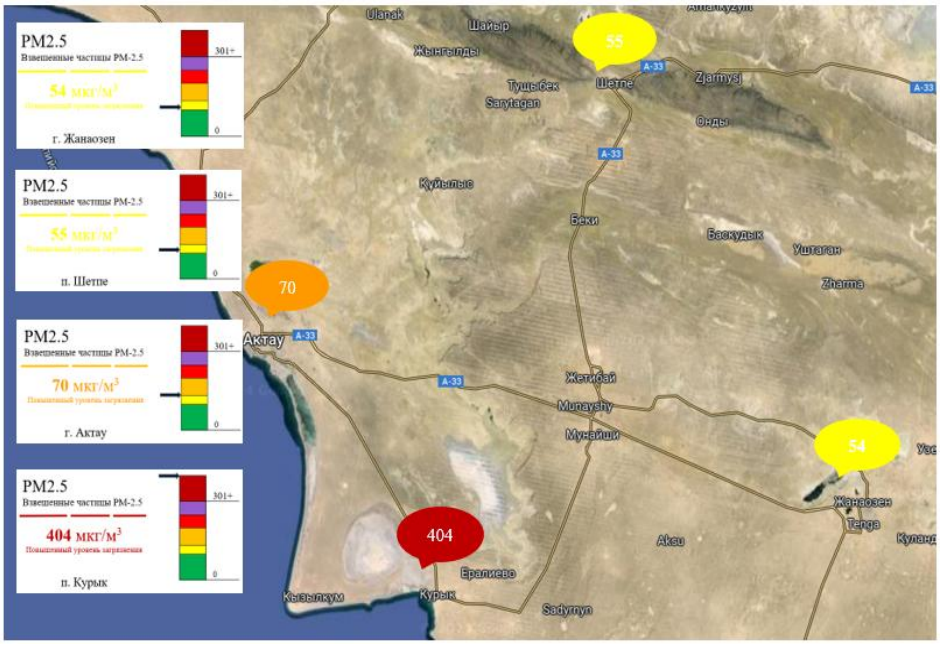


Рисунок 2 – Карта загрязнения воздуха Мангистауской области по шкале индекса качества воздуха США (данные iqair.com и Google maps)

Для Актау открытый сервис качества воздуха указывал уровень PM2.5 выше среднегодового ориентира Всемирной организации здравоохранения на дату обращения [4]. Этот результат подтверждает необходимость региональной сети сопоставимых измерений, но не позволяет перенести городской показатель непосредственно на карьерные площадки.

Для Шетпе фактор карьерной пыли имеет более выраженную технологическую связь: населённый пункт расположен рядом с многочисленными объектами добычи и открытыми отвалами, о запылённости которых сообщали региональные источники [1, 3, 6].

Ключевыми управляемыми источниками определены участки распиловки и дробления, открытые конвейеры, пересыпки, погрузочные операции, неукреплённые технологические дороги и сухие отвалы мелкофракционных отходов. Их объединяет возможность локализации до поступления пыли в общий воздушный бассейн.

Сообщения жителей о видимой пылевой завесе и осаждении частиц на растительности согласуются с механизмом ветрового переноса минерального материала, однако оценка риска для здоровья должна опираться на длительные ряды измерений и данные медицинской статистики с учётом численности и возрастной структуры населения [1, 3].

Приоритетная технологическая схема включает: увлажнение или локальное связывание пыли в точке резания; укрытие дробильно-пересыпочных узлов; аспирацию с рукавным фильтром либо циклоном как предварительной ступенью; очистку колёс транспорта; укрепление дорог и поверхностей отвалов; повторное использование улавливаемой известняковой мелочи. Предлагаемые меры соответствуют принципу предотвращения загрязнения, закреплённому экологическим законодательством Казахстана [9].

Водное пылеподавление следует применять адресно, поскольку дефицит воды в аридном регионе ограничивает постоянное орошение больших площадей. Для сухих технологических операций предпочтительны закрытые кожухи и аспирация; для дорог и отвалов – периодическое увлажнение, связующие составы и поверхностная стабилизация.

Приведённые в региональных источниках сведения о респираторных заболеваниях указывают на необходимость профилактики, но сами по себе не доказывают причинность карьерной пыли без контрольной группы и нормирования показателей на численность населения. Зарубежные исследования подтверждают профессиональный риск воздействия минеральной и искусственной каменной пыли [2, 7, 8]. Поэтому медицинский блок целесообразно включить в будущую программу мониторинга как отдельное эпидемиологическое исследование.

Результаты позволяют сформировать систему контроля из трёх уровней: производственные измерения на источниках, контроль на границе санитарно-защитной зоны и фоновая станция вне преобладающего направления переноса. Одновременная регистрация PM10, PM2.5, скорости и направления ветра повысит доказательность оценки вклада карьеров.

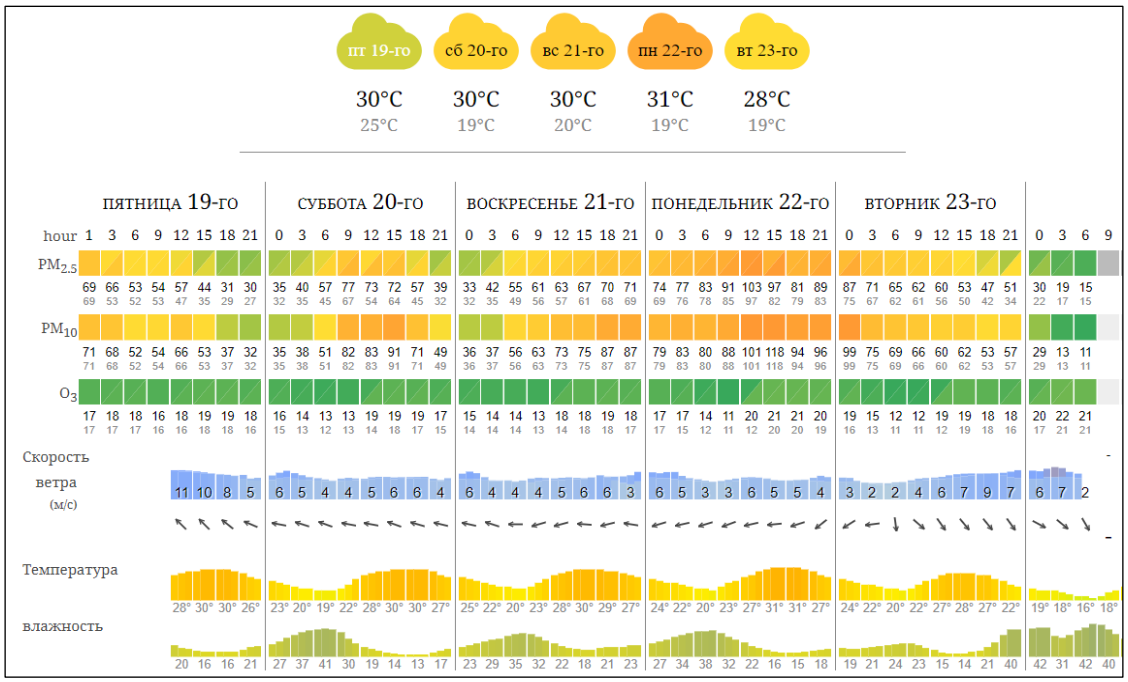


Рисунок 3 – Диаграмма загрязнения воздуха села Шетпе

На рисунке 3 представлены изменения индекса качества воздуха в Шетпе. Эпизодические пики подтверждают необходимость непрерывного мониторинга, однако значения индекса нельзя выражать как кратность превышения концентрации без пересчёта по исходным данным.

Таблица 1 – Шкала индекса качества воздуха по стандартам Агентства по охране окружающей среды США

AQI	Уровень загрязнения воздуха	Последствия для здоровья	Предостережение (для PM2,5)
0 - 50	Хороший	Качество воздуха считается удовлетворительным, а загрязнение воздуха представляет небольшой риск или вообще не представляет никакого риска.	Никто
51 - 100	Умеренный	Качество воздуха приемлемое; однако некоторые загрязняющие вещества могут представлять умеренную угрозу для здоровья очень небольшого числа людей,	Активным детям и взрослым, а также людям с респираторными заболеваниями, такими как астма, следует ограничить

		которые необычайно чувствительны к загрязнению воздуха.	длительную физическую нагрузку на открытом воздухе.
101 - 150	Вредно для чувствительных групп	Члены чувствительных групп могут испытывать последствия для здоровья. Широкая общественность вряд ли пострадает.	Активным детям и взрослым, а также людям с респираторными заболеваниями, такими как астма, следует ограничить длительную физическую нагрузку на открытом воздухе.
151 - 200	Нездоровый	Каждый может начать испытывать последствия для здоровья; члены чувствительных групп могут испытывать более серьезные последствия для здоровья	Активным детям и взрослым, а также людям с респираторными заболеваниями, такими как астма, следует избегать длительных нагрузок на открытом воздухе; всем остальным, особенно детям, следует ограничить длительные нагрузки на свежем воздухе
201 - 300	Очень вредно для здоровья	Предупреждения о чрезвычайных ситуациях. Скорее всего, пострадает все население.	Активные дети и взрослые, а также люди с респираторными заболеваниями, такими как астма, должны избегать любых физических нагрузок на открытом воздухе; всем остальным, особенно детям, следует ограничить нагрузки на свежем воздухе.
300+	Опасный	Предупреждение о здоровье: каждый может столкнуться с более серьезными последствиями для здоровья	Каждый должен избегать любых физических нагрузок на свежем воздухе.

Шкала в таблице 1 используется для информирования населения о краткосрочном риске. Для производственного контроля она должна дополняться прямыми измерениями массовой концентрации и параметров выброса конкретных источников.

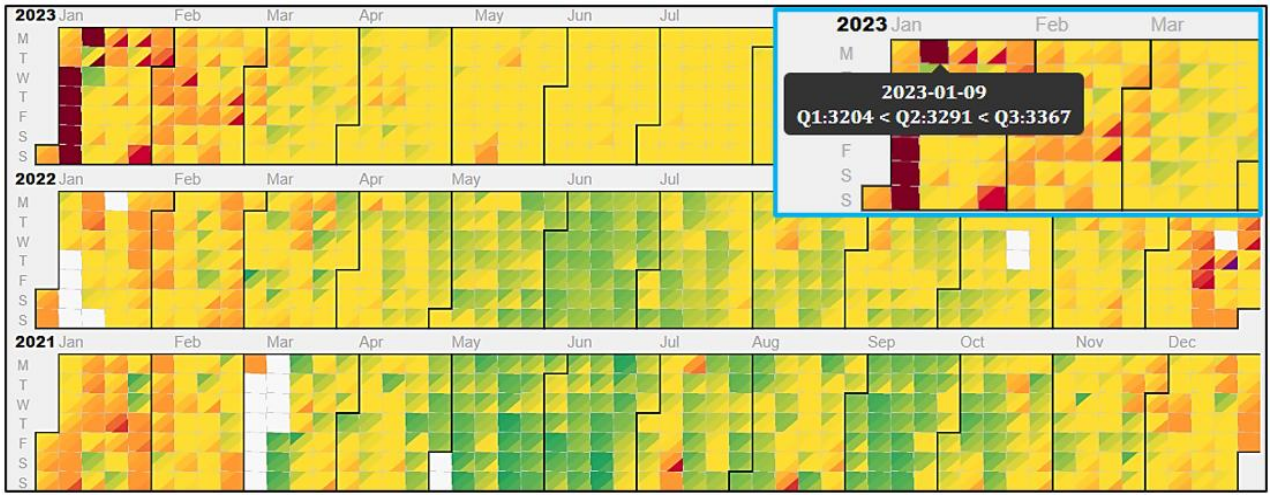


Рисунок 4 – Карта загрязнения воздуха село Шетпе по загрязнителю PM2.5

Исторические данные указывают на зимние эпизоды высокого индекса качества воздуха. Их вероятными причинами являются сочетание неблагоприятных метеорологических

условий, фоновых выбросов и ветрового переноса минеральной пыли. Для разделения вкладов требуется синхронное наблюдение на нескольких постах.

Таким образом, главным результатом исследования является не установление единственного источника загрязнения, а выделение группы технологически управляемых операций, контроль которых способен снизить локальную пылевую нагрузку.

Обсуждение результатов

Полученные различия между населёнными пунктами подтверждают, что разовые данные открытых платформ нельзя использовать как единственное основание для оценки влияния карьеров. Сильная вариабельность требует единого протокола отбора данных, фиксации метеоусловий и наличия фоновой точки. Вместе с тем близость источников, характер технологических операций и сообщения о видимом пылепереносе позволяют обоснованно отнести карьерную пыль к значимым управляемым факторам для Шетпе.

Предлагаемая иерархия мер согласуется с принципом предотвращения загрязнения: сначала уменьшается образование пыли, затем источник изолируется, остаточный поток очищается и только после этого оценивается рассеивание. Для мелких предприятий практичным решением является сочетание кожухов, локальной аспирации, циклона для снижения нагрузки и рукавного фильтра для тонкой очистки. Открытые отвалы требуют отдельной стабилизации и планирования повторного использования отходов.

Ограничениями работы являются неодинаковые даты наблюдений, отсутствие первичных рядов по каждому карьеру и невозможность отделить минеральную пыль от других компонентов только по показателю PM2.5. Поэтому результаты следует рассматривать как основу для проектирования целевого мониторинга и выбора приоритетных мер, а не как инвентаризацию выбросов конкретных предприятий.

Заключение

Исследование показало, что пылевая нагрузка в районах добычи камня-ракушечника формируется сочетанием производственных, фоновых и метеорологических факторов. Наиболее уязвимым участком является Шетпе, где близость карьерных объектов и открытых отвалов усиливает вероятность ветрового переноса частиц. При этом открытые данные качества воздуха должны интерпретироваться с учётом даты, единиц измерения и невозможности прямого определения вклада отдельного источника. Приоритетными мерами являются предотвращение пылеобразования, укрытие пересыпок и дробильных узлов, локальная аспирация с многоступенчатой очисткой, стабилизация отвалов и возврат известняковой мелочи в производство. Для подтверждения эффективности предложено организовать одновременные измерения PM10 и PM2.5 на источниках, границе санитарно-защитной зоны и фоновой площадке с обязательной регистрацией ветра. Такой подход переводит управление воздействием карьеров от реагирования на последствия к контролю источников и проверяемому снижению выбросов.

ЛИТЕРАТУРЫ

1. EcoCitizens.kz. Пыль над Шетпе [Электронный ресурс]. – 2016. – 17 октября. – URL: https://ecocitizens.kz/pyl-nad-shetpe (дата обращения: 19.04.2024).

2. Gottesfeld P., Tirima S., Anka S. M. et al. Reducing lead and silica dust exposures in small-scale mines in northern Nigeria // Annals of Work Exposures and Health. – 2019. – Vol. 63, № 1. – P. 1–8.

3. inAktau.kz. Жители Шетпе: наши дети болеют из-за близости карьеров по добыче камня [Электронный ресурс]. – 2019. – 19 сентября. – URL: https://www.inaktau.kz/news/2526861/ziteli-setpe-nasi-deti-boleut-iz-za-blizosti-karerov-po-dobyce-kamna (дата обращения: 19.04.2024).

4. IQAir. Индекс качества воздуха: загрязнение атмосферы PM2.5 в Актау [Электронный ресурс]. – URL: https://www.iqair.com/ru/kazakhstan/mangghystau/aktau (дата обращения: 19.04.2024).

5. IQAir. Индекс качества воздуха: загрязнение атмосферы PM2.5 в Шетпе [Электронный ресурс]. – URL: https://www.iqair.com/ru/kazakhstan/mangghystau/shetpe (дата обращения: 19.04.2024).

6. Lada.kz. Жители посёлка Шетпе в Мангистау страдают от пыльных бурь с каменных карьеров [Электронный ресурс]. – 2024. – 7 марта. – URL: https://www.lada.kz/aktau_news/ecology/120279-zhiteli-poselka-shetpe-v-mangistau-stradayut-ot-peschanyh-bur-s-kamennyh-karerov.html (дата обращения: 19.04.2024).

7. Mandrioli D., Schlünssen V., Adam B. et al. WHO/ILO work-related burden of disease and injury: protocol for systematic reviews of occupational exposure to dusts and/or fibres and of the effect of occupational exposure to dusts and/or fibres on pneumoconiosis // Environment International. – 2018. – Vol. 119. – P. 174–185.

8. Ofir N., Shay A. B., Korenstein R., Kramer M. R., Fireman E. Functional, inflammatory and interstitial impairments following artificial stone dust exposure // Occupational and Environmental Medicine. – 2019. – Vol. 76, № 12. – P. 875–879. – DOI: 10.1136/oemed-2019-105711.

9. Republic of Kazakhstan. Экологический кодекс Республики Казахстан: Кодекс Республики Казахстан от 2 января 2021 года № 400-VI ЗРК [Электронный ресурс]. – URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/K2100000400 (дата обращения: 05.10.2026).

10. World Health Organization. Глобальные рекомендации ВОЗ по качеству воздуха: твердые частицы, озон, диоксид азота, диоксид серы и оксид углерода. – Женева: Всемирная организация здравоохранения, 2021. – 273 с.

REFERENCES

1. EcoCitizens.kz. (2016, October 17). Pyl nad Shetpe [Dust over Shetpe]. https://ecocitizens.kz/pyl-nad-shetpe (In Russian).

2. Gottesfeld, P., Tirima, S., Anka, S. M., et al. (2019). Reducing lead and silica dust exposures in small-scale mines in northern Nigeria. Annals of Work Exposures and Health, 63(1), 1–8.

3. inAktau.kz. (2019, September 19). Zhiteli Shetpe: nashi deti boleiut iz-za blizosti karerov po dobyche kamnia [Residents of Shetpe: Our children are ill because of nearby stone quarries]. https://www.inaktau.kz/news/2526861/ziteli-setpe-nasi-deti-boleut-iz-za-blizosti-karerov-po-dobyce-kamna (In Russian).

4. IQAir. (2024). Air quality index: PM2.5 air pollution in Aktau, Kazakhstan. https://www.iqair.com/ru/kazakhstan/mangghystau/aktau

5. IQAir. (2024). Air quality index: PM2.5 air pollution in Shetpe, Kazakhstan. https://www.iqair.com/ru/kazakhstan/mangghystau/shetpe

6. Lada.kz. (2024, March 7). Zhiteli poselka Shetpe v Mangistau stradaiut ot pylnykh bur s kamennykh karerov [Residents of Shetpe in Mangystau suffer from dust storms from stone quarries]. https://www.lada.kz/aktau_news/ecology/120279-zhiteli-poselka-shetpe-v-mangistau-stradayut-ot-peschanyh-bur-s-kamennyh-karerov.html (In Russian).

7. Mandrioli, D., Schlünssen, V., Adam, B., et al. (2018). WHO/ILO work-related burden of disease and injury: Protocol for systematic reviews of occupational exposure to dusts and/or fibres and of the effect of occupational exposure to dusts and/or fibres on pneumoconiosis. Environment International, 119, 174–185.

8. Ofir, N., Shay, A. B., Korenstein, R., Kramer, M. R., & Fireman, E. (2019). Functional, inflammatory and interstitial impairments following artificial stone dust exposure. Occupational and Environmental Medicine, 76(12), 875–879. https://doi.org/10.1136/oemed-2019-105711

9. Republic of Kazakhstan. (2021). Ekologicheskii kodeks Respubliki Kazakhstan [Environmental Code of the Republic of Kazakhstan] (No. 400-VI). https://adilet.zan.kz/rus/docs/K2100000400 (In Russian).

10. World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization.

ҰЛУТАС КАРЬЕРЛЕРІНІҢ ШАҢ ЖҮКТЕМЕСІН БАҒАЛАУ ЖӘНЕ ОНЫ АЗАЙТУ ШАРАЛАРЫ

Букаев Елдар Захарович
Есенов Университеті, Ақтау, Қазақстан
e-mail: yeldar1.bukayev@yu.edu.kz

Аңдатпа. Зерттеудің мақсаты Маңғыстау облысындағы ұлутас өндіретін карьерлердің ықпал ету аймағында орналасқан елді мекендердегі шаң жүктемесінің кеңістіктік және уақыттық ерекшеліктерін бағалау және оны азайтудың басым шараларын негіздеу болды. Ақпараттық негіз ретінде ауадағы қалқыма бөлшектер жөніндегі ашық мониторинг деректері, карьерлердің орналасуы және өңірдің метеорологиялық жағдайлары туралы мәліметтер пайдаланылды. Салыстырмалы, кеңістіктік және себеп-салдарлық талдау әдістері қолданылды. Шетпе ауылы ең осал аумақ ретінде анықталды: көптеген карьерлердің жақындығы, ұсақ фракциялы қалдықтардың ашық сақталуы және желмен тасымалдануы жоғары шаңдану эпизодтарын қалыптастырады. Тіркелген көрсеткіштер бір ғана көздің үлесін тікелей дәлелдемей, ауа сапасының жиынтық жағдайын сипаттайтыны ескерілді. Тәуекелді басқару үшін шаңның түзілуін болдырмау, көздерді жабу, жергілікті аспирация, газдарды тазарту, үйінділерді тұрақтандыру және санитариялық-қорғау аймағының шекарасында үздіксіз бақылау жүргізу шаралары ұсынылды. Жұмыстың практикалық маңызы аридті жағдайда ұлутас өндіретін және өңдейтін кәсіпорындар үшін шаң шығарындыларын басқарудың технологиялық бағдарланған сызбасын қалыптастырудан тұрады.

Түйін сөздер: ұлутас; карьер; шаң жүктемесі; қалқыма бөлшектер; мониторинг; аспирация; шаңды басу; Маңғыстау облысы.

ASSESSMENT OF DUST LOAD FROM SHELL LIMESTONE QUARRIES AND MITIGATION MEASURES

Bukayev Yeldar Zakharovich
Yessenov University, Aktau, Kazakhstan
e-mail: yeldar1.bukayev@yu.edu.kz

Abstract. The study aimed to assess the spatial and temporal characteristics of dust load in settlements located within the influence zone of shell limestone quarries in the Mangystau Region and to substantiate priority mitigation measures. The evidence base included open monitoring data on airborne particulate matter, information on quarry locations, and regional meteorological conditions. Comparative, spatial, and cause-and-effect analyses were applied. Shetpe was identified as the most vulnerable location, where the proximity of numerous quarries, open storage of fine waste, and wind transport combine to produce episodes of elevated dust levels. The recorded values are interpreted as aggregate indicators of air quality rather than direct evidence of the contribution of a single source. A risk-management hierarchy is proposed: prevention of dust generation, enclosure of emission points, local exhaust ventilation, gas cleaning, stabilization of waste dumps, and continuous monitoring at the boundary of the sanitary protection zone. The practical value of the study lies in a technology-oriented dust emission management scheme for shell limestone extraction and processing enterprises operating under arid conditions. The proposed approach shifts environmental management from reacting to consequences toward controlling identifiable sources and verifying emission reductions.

Keywords: shell limestone; quarry; dust load; particulate matter; monitoring; local exhaust ventilation; dust suppression; Mangystau Region.