

Читать
онлайн
Read
onlineГорский А.И.¹, Туманов К.А.¹, Чекин С.Ю.¹, Иванов В.К.^{1,2}

Вклад атмосферных техногенных выбросов в заболеваемость раком лёгкого в Российской Федерации

¹Медицинский радиологический научный центр имени А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр радиологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации, 249035, Обнинск, Россия;

²АО «Прорыв», 107140, Москва, Россия

Введение. Проведена оценка вклада техногенных выбросов в атмосферу в заболеваемость раком лёгкого в Российской Федерации. Для оценки использованы данные официальной государственной статистики по выбросам в атмосферу и показателям заболеваемости раком лёгкого по регионам Российской Федерации.

Материалы и методы. В качестве статистического метода исследования использован линейный регрессионный анализ. Оптимальность регрессионной модели по числу предикторов определяли с применением информационного критерия Акаике (Akaike).

Результаты. Получены с 90%-ми доверительными пределами статистически значимые вклады комплексного атмосферного техногенного выброса в заболеваемость раком лёгкого – 2,2% (–0,7; 5,2) для мужчин и 3,7% (0,5; 6,7) для женщин. Значения химических онкологических рисков от выбросов соответственно равны $1,5 \cdot 10^{-5}$ и $6,2 \cdot 10^{-6}$ в год и не превышают нормативов (10^{-4}) социально приемлемого химического риска.

Ограничения исследования. Основным ограничением данного исследования являются неучтённые конкурирующие риски от других факторов загрязнения атмосферы, таких как курение, радон.

Заключение. Вследствие ограничений регрессионной модели результаты настоящей работы следует рассматривать как предварительные и определяющие направления основных исследований в рамках рассматриваемой актуальной проблемы.

Ключевые слова: выбросы в атмосферу; рак лёгкого; заболеваемость; линейная регрессия; критерий Акаике (Akaike); экологический риск; социально приемлемый риск; радиационный эквивалент химического риска

Соблюдение этических стандартов. Исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов, так как использует данные открытой официальной государственной статистики.

Для цитирования: Горский А.И., Туманов К.А., Чекин С.Ю., Иванов В.К. Вклад атмосферных техногенных выбросов в заболеваемость раком лёгкого в Российской Федерации. *Гигиена и санитария*. 2023; 102(2): 106–112. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-2-106-112> <https://elibrary.ru/zgftq>

Для корреспонденции: Горский Антон Игоревич, канд. техн. наук, вед. науч. сотр. лаб. математического моделирования в радиационной эпидемиологии и медицинской радиологии МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 249035, Обнинск. E-mail: gorski@nrcr.ru

Участие авторов: Горский А.И. – проведение расчётов и анализ результатов, написание текста; Туманов К.А. – подготовка базы данных и таблиц, необходимых для анализа; Чекин С.Ю. – анализ результатов, написание текста; Иванов В.К. – постановка задачи, общее руководство выполнением исследования. Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Публикация подготовлена в рамках плановых работ МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиала ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России.

Поступила: 12.08.2022 / Принята к печати: 08.12.2022 / Опубликована: 25.03.2023

Anton I. Gorski¹, Konstantin A. Tumanov¹, Sergey Yu. Chekin¹, Viktor K. Ivanov^{1,2}

Contribution of atmospheric technogenic emissions to the incidence of lung cancer in the Russian Federation

¹A. Tsyb Medical Radiological Research Centre – branch of the National Medical Research Radiological Centre, Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, 249035, Russian Federation;

²Joint Stock Company PRORYV, Moscow, 107140, Russian Federation

Introduction. An assessment of the contribution of manmade emissions into the atmosphere to the incidence of lung cancer in the Russian Federation is made. For an assessment data from official state statistics on emissions into the atmosphere of the Russian Federation and indicators of the incidence rate of lung cancer by regions of the Russian Federation were used.

Materials and methods. Linear regression analysis was used as a statistical method of research. The optimality of the regression model by the number of predictors was determined by the Akaike information criterion.

Results. Limits obtained with 90% confidence are the contributions of complex atmospheric technogenic emission to the incidence of lung cancer of 2.2 (–0.7; 5.2)% for men and 3.7 (0.5; 6.7)% for women, that is statistically significant. The values of chemical oncological risks from emissions are respectively equal to $1.5 \cdot 10^{-5}$ and $6.2 \cdot 10^{-6}$ per year and don't exceed the standards of socially acceptable chemical risk 10^{-4} .

Limitations. The main limitation of this study is not to take into account competing risks from other factors of atmospheric pollution, such as smoking, radon.

Conclusion. The results of this study, due to the significant limitations of the regression model, should be considered to be preliminary and determine the directions of the main research within the framework of the actual problem under consideration.

Keywords: emissions into the atmosphere; lung cancer; incidence; linear regression; Akaike criterion; environmental risk; socially acceptable risk; radiation equivalent of chemical risk

Compliance with ethical standards. The study does not require the opinion of the Biomedical Ethics Committee or other documents, as it uses data from open official state statistics.

For citation: Gorski A.I., Tumanov K.A., Chekin S.Yu., Ivanov V.K. Contribution of atmospheric technogenic emissions to the incidence of lung cancer in the Russian Federation. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2023; 102(2): 106–112. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-2-106-112> <https://elibrary.ru/zgfltq> (In Russian)

For correspondence: Anton I. Gorski, MD, PhD, Leading Researcher, Laboratory of mathematical modelling in radiation epidemiology and medical radiology, A. Tsyb Medical Radiological Research Centre – branch of the National Medical Research Radiological Centre, Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, 249035, Russian Federation. E-mail: gorski@nrer.ru

Information about the authors:

Gorski A.I., <https://orcid.org/0000-0003-0272-0928> Tumanov K.A., <https://orcid.org/0000-0003-0722-5408>
Chekin S.Yu., <https://orcid.org/0000-0002-6759-868X> Ivanov V.K., <https://orcid.org/0000-0003-1372-0018>

Contribution: Gorski A.I. – calculations and analysis of the results, writing the text; Tumanov K.A. – prepare the database and tables required for analysis; Chekin S.Yu. – analysis of the results, writing the text; Ivanov V.K. – problem statement, general guidance of the task. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement. The study had no sponsorship.

Received: August, 12, 2022 / Accepted: December 8, 2022 / Published: March 25, 2023

Введение

В настоящее время злокачественные новообразования являются одной из основных причин заболеваемости и смертности населения в развитых странах [1]. Предрасположенность к канцерогенезу зависит от многих факторов, в том числе от наследственных генетических повреждений, состояния антиоксидантной системы, иммунного статуса, социальных и географических факторов. Канцерогенные факторы внешней среды, в том числе и техногенные, также могут способствовать возникновению новообразований, что доказано многими эпидемиологическими исследованиями. Образ жизни, согласно современным представлениям, является определяющим фактором промоции неопластического процесса. Однако общеизвестно, что определённые химические вещества, производственные и физические процессы и некоторые экзогенные вирусы выступают в роли этиологических факторов новообразований человека. Наиболее значимыми канцерогенными факторами внешней среды являются химические канцерогены. В настоящее время с профессиональным воздействием канцерогенов в развитых странах связывают не более 5% случаев заболеванием раком. Загрязнение атмосферы, воды, промышленные и бытовые отходы в местах проживания увеличивают риск развития злокачественных новообразований. К основным канцерогенным веществам, загрязняющим атмосферу, относят полициклические ароматические углеводороды, сажу, асбест и некоторые металлы. Радиационно-индуцированные раки также могут быть следствием облучения ионизирующей радиацией как от природных, так и от техногенных источников. Вероятность канцерогенного действия радиации возрастает с увеличением дозы облучения. Радиационный риск максимален для гемобластозов, новообразований кожи, костей, лёгкого, молочной и щитовидной желёз, яичников. Рак лёгкого занимает одно из лидирующих мест в структуре онкологической заболеваемости и смертности среди мужчин и женщин в мире. Согласно данным ВОЗ, рак лёгкого – ведущая причина смертности от рака у мужчин и вторая причина смертности после рака молочной железы у женщин [1].

С развитием рака лёгкого ассоциирован ряд факторов окружающей среды и образа жизни, самым важным из которых является курение сигарет. По некоторым оценкам, около 90% всех злокачественных заболеваний лёгкого связано с курением [2]. Сигаретный дым содержит не менее 73 известных канцерогенов, включая бенз(а)пирен, никотинпроизводный нитрозамин-кетон (NNK), 1,3-бутадиен и радиоактивный изотоп полония ^{210}Po [3].

Известны как минимум две причины, объясняющие тесную связь между курением и развитием рака лёгкого. Во-первых, канцерогенные полициклические ароматические углеводороды, содержащиеся в табачном дыме, индуцируют мутации в гене p53, что имеет решающее значение для дисрегуляции клеточного цикла и канцерогенеза. Во-вторых, N-нитрозосоединения, которые также присутствуют в табачном дыме, являются ещё одной важной группой химических веществ, оказывающих мощное канцерогенное действие [4]. Фактором риска развития рака лёгкого признано и пассивное курение. По данным ВОЗ, вероятность возникновения заболевания у тех, кто живёт рядом с курильщиком, увеличивается на 20–30%, а у тех, кто вынужден работать с курильщиком, – на 16–19% [5].

По данным Американского агентства по охране окружающей среды, радон – вторая по значимости причина развития рака лёгкого после курения сигарет [6]. Этот газ, не имеющий цвета и запаха, образуется в результате распада радиоактивного радия, который в свою очередь является продуктом содержащегося в земной коре урана. Радон ионизирует генетический материал, вызывая мутации, приводящие к развитию злокачественных новообразований.

Известен ряд менее значимых факторов риска рака лёгкого, среди которых:

- лучевая терапия, способная повышать вероятность развития рака лёгкого у пациентов, проходивших лечение по поводу других злокачественных заболеваний;
- токсины, содержащиеся в окружающей среде, например, асбест, металлы (мышьяк, хром, никель), ионизирующее излучение, полициклические ароматические углеводороды, загрязнение воздуха;
- лёгочный фиброз. По данным ряда исследований, риск развития рака лёгкого у пациентов с лёгочным фиброзом увеличивается примерно в семь раз независимо от курения [7];
- генетические факторы могут оказывать влияние как на риск рака, так и на его прогноз. С негативной наследственностью связано около 8% случаев рака лёгкого [8]. Риск развития заболевания у родственников больного раком лёгкого увеличивается вдвое;
- воздействие масел для жарки. По данным некоторых исследований, существует связь между развитием рака лёгкого и воздействием масел для жарки пищи, что, по-видимому, обусловлено наличием мутагенных и (или) канцерогенных соединений в прокалённых маслах [9].

В статье исследуется влияние техногенных выбросов вредных веществ в атмосферу на заболеваемость раком лёгкого населения Российской Федерации в целом, а также населения Томской области, входящей в Сибирский федеральный округ (СФО).

Материалы и методы

Исследована заболеваемость раком трахеи, бронхов и лёгкого (далее по тексту, для краткости, – раком лёгкого) от выбросов в атмосферу монооксида углерода (CO), диоксида азота NOx, оксида серы (SO₂), летучих органических соединений (ЛОС), твёрдых частиц (ТЧ).

Оксид углерода способен образовываться при неполном сгорании материалов, содержащих углерод, и является составной частью многих газообразных отходов производства (генераторных, выхлопных, взрывных и пр.). Интоксикация окисью углерода возможна при работе в котельных, литейных цехах, при испытании моторов, в гаражах, автобусах и т. д., в быту при неправильной топке печей или неправильном использовании газовыми плитами.

Оксиды азота – это группа из семи газов и соединений, имеющих в своём составе азот и кислород, иногда совместно известных как газы NOx. Двумя наиболее распространёнными и опасными оксидами азота являются оксид азота и диоксид азота. Оксид азота, также называемый веселящим газом, является парниковым газом, который способствует глобальному потеплению. Оксид азота (NO) выбрасывается в составе выхлопных газов транспортных средств, а также при сжигании угля, нефти, дизельного топлива и природного газа, особенно на электростанциях. Он также выделяется фабриками, газовыми плитами, керосиновыми обогревателями, дровяными котлами, при курении сигарет.

Самым крупным источником SO₂ в атмосфере является сжигание ископаемого топлива на электростанциях и других промышленных объектах. К более мелким источникам выбросов SO₂ относятся природные (например, вулканы), промышленные процессы (добыча металла из руды и др.), а также локомотивы, корабли, другие транспортные средства и тяжёлое оборудование, сжигающие топливо с высоким содержанием серы.

Формальдегид, один из наиболее распространённых ЛОС, представляет собой бесцветный газ с едким (резким и горьким) запахом. Формальдегид выделяется из таких строительных материалов, как фанера, ДСП и клеи. Также формальдегид можно обнаружить в некоторых тканях и в определённых типах пенопласта. Выделение ЛОС происходит при сжигании топлива (газ, древесина, керосин), при использовании табачных изделий. ЛОС могут поступать из товаров личной гигиены, таких как духи и лаки для волос, чистящих средств, жидкостей для химической чистки, красок, лаков, а также при эксплуатации копировальных и печатных машин.

Твёрдые частицы размером менее 2,5 мкм в диаметре считают одним из наиболее опасных для здоровья человека загрязнений воздуха, так как они проникают в лёгкие, влияя на состояние дыхательных путей. Источниками ТЧ являются зола, пыль и дым. Эти частицы могут способствовать развитию астмы, сердечных заболеваний и некоторых видов рака.

В статье использованы данные о выбросах загрязняющих веществ в атмосферный воздух по субъектам Российской Федерации (Государственный доклад Минприроды России «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году») [10], а также данные по онкозаболеваемости населения из ежегодных статистических сборников Московского научно-исследовательского онкологического института им. П.А. Герцена [11].

Для анализа вкладов выбросов в заболеваемость раком лёгких использована процедура многомерной линейной регрессии для каждого наблюдения, реализованная в статистическом пакете «Статистика» [12].

Влияние отдельных факторов в уравнении множественной регрессии оценено с помощью частных коэффициентов эластичности el_i :

$$el_{ix_i} = b_i \frac{\bar{x}_i}{\bar{y}}$$

При проведении регрессионного анализа использованы следующие стандартные статистические характеристики.

Выборочное стандартное отклонение (standard deviation), мера разброса или вариабельности данных:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}},$$

где n – число измерений.

Стандартная ошибка среднего (standard error):

$$SE_{Err} = \frac{s}{\sqrt{n}}.$$

Остатки регрессии (residual):

$$e_i = (y_i - \hat{y}_i),$$

где y_i – наблюдаемое значение; \hat{y}_i – соответствующее предсказанное моделью значение.

Для сравнения эффективности моделей с разным числом предикторов использован критерий Акаике, который определяет относительную потерю информации при использовании данной модели.

Информационный критерий Акаике (AIC):

$$AIC = \ln(\hat{\sigma}^2) + \frac{2 \cdot K}{n},$$

где $(\hat{\sigma}^2) = \frac{e^T \cdot e}{n}$ – дисперсия модели; K – число независимых переменных плюс свободный член. Чем меньше значение критерия, тем качественнее модель. Для $n/K < 40$ к критерию добавляется поправка: $2K \cdot (K + 1) / (n - K - 1)$.

Стандартизованные остатки (standardized residual):

$$r_{i \text{ stand}} = \frac{e_i}{s(e_i)},$$

где $s(e_i) = s\sqrt{1 - h_{ii}}$; s – оценка стандартного отклонения ошибки модели (она же $\hat{\sigma}$); h_{ii} – рычаг (leverage) проекционной матрицы, представляющий собой разницу между значением x_i наблюдения и средним всех x значений.

Результаты

Рак лёгкого среди женщин Российской Федерации. В соответствии с алгоритмом построения регрессионной модели рассмотрим парные корреляции предикторов между собой и зависимой переменной, представленные в табл. 1. Корреляции NOx – CO, ЛОС – CO, ТЧ – NOx, как следует из таблицы, превышают принятое граничное значение 0,7, однако корреляции предикторов с зависимой переменной максимальны для SO₂, ЛОС и ТЧ, поэтому исключаем из анализа переменные CO и NOx. Большие коэффициенты корреляции некоторых предикторов наиболее вероятно обусловлены совместным содержанием компонентов в выбросе.

Рассмотрим наиболее оптимальный набор оставшихся предикторов с использованием информационного критерия Акаике (AIC), который определяет число предикторов в модели с минимальной потерей информации. Для расчёта критерия используем значения остатков моделирования, приведённые в пакете «Статистика» [12] в разделе Summary, Univariate results, SS, Error. Оценки критерия AIC для модели, когда рассматриваются все выбросы в целом, равны 245,0; для модели с тремя факторами – 242,4; для модели, где рассматриваются выбросы только ТЧ, – 240,9. Следовательно, потеря информации для этой модели минимальна. Значения коэффициентов регрессии с предиктором «твёрдые частицы» (ТЧ) с 90%-ми доверительными пределами (ДП) представлены в табл. 2. В первой колонке приведены факторы воздействия на заболеваемость, во второй – коэффициент регрессии, производная зависимости «фактор – эффект», в третьей – стандартная ошибка, по которой рассчитываются ДП (параметр ± 2 стандартные ошибки),

Таблица 1 / Table 1

Парные корреляции переменных
Pairwise correlations of variables

Выброс Emission	CO	NOx	SO ₂	ЛОС VOC	Твёрдые частицы Particulate matter	Заболелаемость на 100 тыс. населения Incidence C33–C34 per 100,000
CO	1.000	0.837	0.164	0.846	0.596	–0.021
NOx	0.837	1.000	0.347	0.699	0.825	0.047
SO ₂	0.164	0.347	1.000	–0.001	0.443	0.154
ЛОС / Volatile organic compounds (VOC)	0.846	0.699	–0.001	1.000	0.293	–0.107
Твёрдые частицы / Particulate matter	0.596	0.825	0.443	0.293	1.000	0.209
Заболелаемость C33–C34 на 100 тыс. населения C33–C34 incidence per 100,000	–0.021	0.047	0.154	–0.107	0.209	1.000

в четвёртой – *t*-критерий значимости предикторов, далее уровень значимости предиктора и его 90%-й ДП. Из таблицы также следует, что фактор «твёрдые частицы» (ТЧ) статистически значим (нижний ДП не содержит нуля). Результаты теста на нормальность распределения остатков приведены на рис. 1, а. Близость наблюдений к теоретической прямой подтверждает гипотезу о нормальности и об отсутствии выбросов (outliers) данных.

Вклад выброса ТЧ в заболеваемость раком лёгкого оценим, применяя коэффициент эластичности. В соответствии с данными, представленными в [10, 11], средний по Российской Федерации выброс ТЧ равен 27,0 тыс. тонн в год, а показатель заболеваемости раком лёгкого среди женщин равен 16,9 случая на 100 000 в год. Тогда вклад ТЧ в заболеваемость раком лёгкого среди женщин в соответствии с коэффициентом эластичности составляет $27 \cdot 0,023 / 16,9 = 0,037$ (3,7%), а с 90%-м ДП – 3,7% (0,5; 6,7). Для Томской области этот вклад равен $30,34 \cdot 0,028 / 20,8 = 0,04$ (4%), а с 90%-м ДП – 4,0% (0,5; 7,5).

Рак лёгкого среди мужчин Российской Федерации. Из анализа исключены сильно коррелированные выбросы СО и NOx, как и для женщин. В соответствии с критерием Акаике наиболее оптимальна модель с одним предиктором «твёрдые частицы» (ТЧ). Результаты тестирования остатков на нормальность для этой модели приведены на рис. 1, б. Результаты регрессионного анализа представлены в табл. 2. Формально эффект влияния выброса ТЧ статистически незначим, но нижний ДП близок к нулю.

Оценим вклад ТЧ в заболеваемость раком лёгкого в Российской Федерации и в Томской области. Вклад ТЧ в заболеваемость раком лёгкого среди мужского населения страны в целом равен $27 \cdot 0,063 / 75,83 = 0,022$ (2,2%), а с 90%-м ДП – 2,2% (–0,7; 5,2). Для Томской области этот вклад равен $30,34 \cdot 0,085 / 82,33 = 0,031$ (3,1%), а с 90%-м ДП – 3,1% (–0,7; 5,5). Выбросы ТЧ сильно коррелированы с выбросами NOx и СО (коэффициенты корреляции 0,8–0,9), следовательно, оценки вклада для ТЧ относятся и к этим выбросам, то есть это оценка для комплексного выброса (NOx, СО и ТЧ).

Результаты анализа в Сибирском федеральном округе (Томская область). Цель данного анализа – учесть возможные географические, климатические, этнические, социальные особенности региона и особенности его промышленного развития, которые могут влиять как на выбросы в атмосферу, так и на регистрируемую онкологическую заболеваемость. Анализ имеет существенное ограничение: число субъектов в регионе (СФО) всего 10, поэтому дисперсии оценок могут быть велики, оценки незначимы и критерии нормальности приближены. Тем не менее проведём такие оценки и сравним их с результатами по России в целом.

Для женщин анализ таблицы корреляций предикторов показал сильные корреляции (больше 0,8) ТЧ – СО, NOx – СО, ТЧ – NOx. В модели оставлены NOx, ЛОС и SO₂ с учётом их корреляций с зависимой переменной. Из всех моделей с разным количеством оставленных предикторов оптимальной, согласно критерию Акаике, является

Таблица 2 / Table 2

Параметры регрессионной модели с предиктором «твёрдые частицы» (женщины, мужчины)
Parameters of the regression model with the predictor “particulate matter” (women, men)

Выброс Emission	Параметр Parameter	Стандартная ошибка Standard error	<i>t</i>	<i>p</i>	90%-й ДП 90% CL
<i>Женщины / Women</i>					
Свободный член / Intercept term	16.280	0.588	27.699	0.000	15.302; 17.259
Твёрдые частицы / Particulate matter	0.023	0.012	1.887	0.063	0.003; 0.043
<i>Мужчины / men</i>					
Свободный член / Intercept term	74.141	2.436	30.431	0.000	70.085; 78.197
Твёрдые частицы / Particulate matter	0.063	0.050	1.267	0.209	–0.020; 0.146

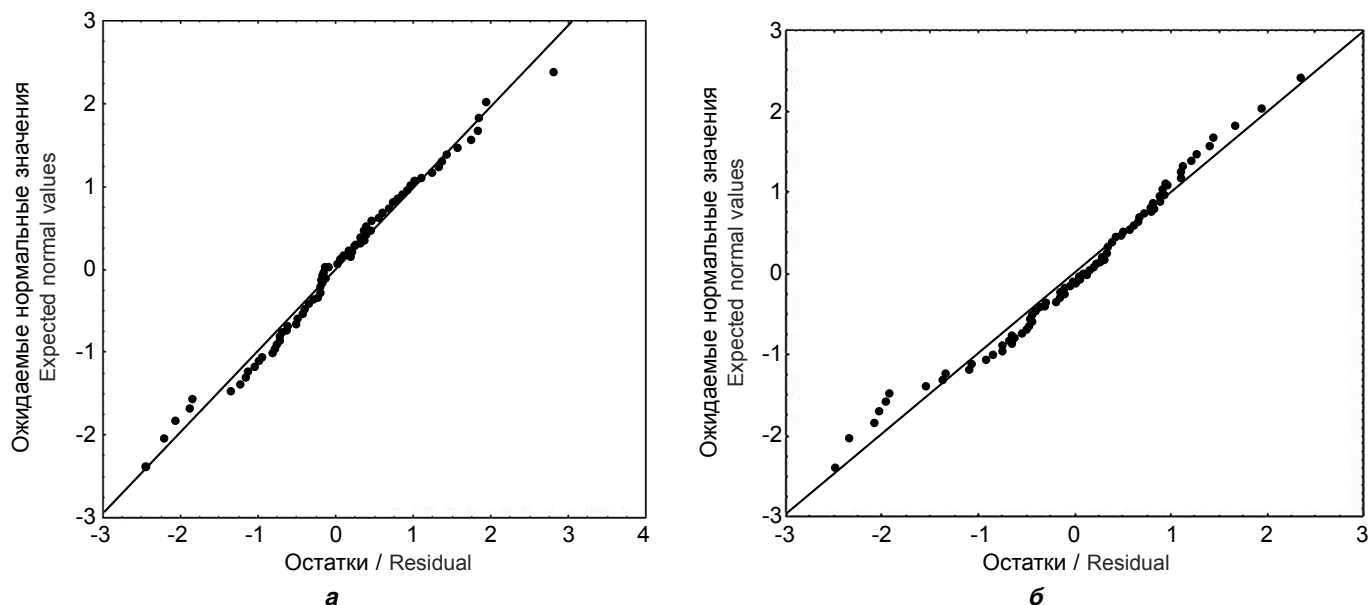


Рис. 1. Результаты теста на нормальное распределение остатков: а – женщины; б – мужчины.

Fig. 1. The results of the test for the normal distribution of residuals: a – women; b – men.

модель с одним предиктором ЛОС. Коэффициент регрессии для этой модели равен 0,054 с 90%-м ДП (–0,0033; 0,112), $p = 0,11$, что близко к порогу значимости 0,1, тогда вклад компонента ЛОС будет равен для округа 0,04 с 90%-м ДП (–0,01; 0,09). Для Томской области оценка равна 0,16 с 90%-м ДП (–0,1; 0,33). Тест на нормальность остатков подтверждает рис. 2.

В Томской области большой вклад ЛОС в заболеваемость обусловлен максимальным для региона выбросом ЛОС. Максимальный вклад в заболеваемость мужчин дают выбросы NOx и ЛОС, которые статистически незначимы. Вклад в заболеваемость NOx с 90%-м ДП: СФО – 0,07 (–0,11; 0,25), Томская область – 0,04 (–0,06; 0,15). Вклад в заболеваемость ЛОС с 90%-м ДП: СФО – 0,04 (–0,10; 0,18), Томская область – 0,15 (–0,31; 0,63).

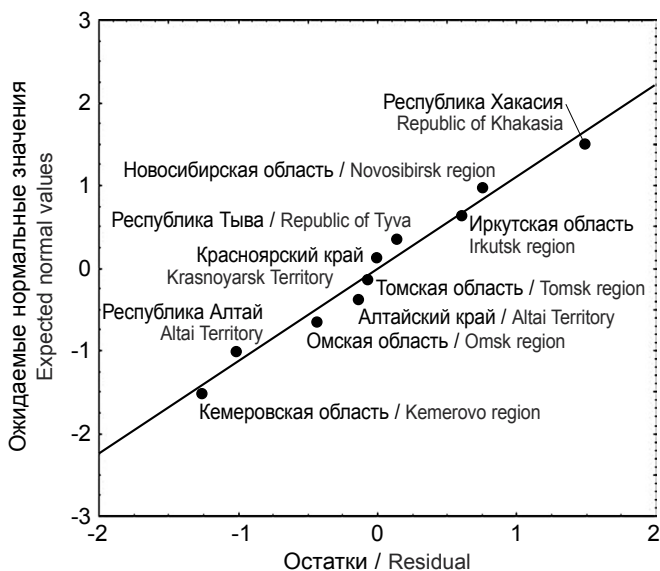


Рис. 2. Результаты теста на нормальность остатков.

Fig. 2. Test results for normality of residuals.

Обсуждение

Современные методы оценки воздействия техногенных выбросов на здоровье человека и биоты основаны на трёх основных подходах. Это использование для веществ с высоким классом опасности *концепции предельно допустимых концентраций* (ПДК), которые получены на основании кривых зависимости эффекта летальных доз (ЛД₅₀, 50%-я выживаемость животных, преимущественно грызунов) от нормированной единицы воздействия фактора внешней среды. Также это разработанные EPA (Environmental Protection Agency, США) [6] *подходы, основанные на коэффициентах риска*, то есть оценки избыточных случаев заболеваний (смертей) от воздействия нормированной единицы фактора воздействия, полученные также в исследованиях на животных. И наконец, это *вероятностные, статистические методы*, оценивающие вероятность возникновения эффекта воздействия на основании регрессионных моделей зависимости «доза – эффект», основанные на данных наблюдений за популяциями или группами.

В данной работе использован вероятностный регрессионный анализ зависимости «доза – эффект» для онкогенных эффектов воздействия техногенных загрязнителей атмосферы. Влияние агентов внешней среды на здоровье чрезвычайно велико, и в данной работе рассмотрены лишь социально значимые эффекты воздействий техногенных факторов на онкологическую заболеваемость. В качестве исходных использованы региональные данные об интегральных выбросах основных компонентов промышленных и бытовых загрязнений воздуха и региональные данные официальной государственной статистики о годовых показателях онкологических заболеваний.

Территория нашей страны огромна и существенно гетерогенна по географическим, климатическим, этническим, социальным критериям и по уровню промышленного развития регионов, что определяет зависимость рассматриваемого показателя – онкологической заболеваемости – от этих факторов. Следует учесть, что на онкозаболеваемость существенно влияют и такие факторы, как пол, возраст и наследственные генетические повреждения, поэтому рассматриваемая задача чрезвычайно сложна. Тем не менее анализ влияния загрязнения атмосферы на онкозаболева-

емость проведён для России в целом и для Томской области отдельно, чтобы определить статус Томской области в рамках рассматриваемой проблемы экологических рисков в Российской Федерации.

Для уменьшения возможного эффекта гетерогенности данных рассмотрен СФО, в который входит Томская область. Округ включает 10 территориальных единиц в отличие от рассмотренных 80 единиц по России в целом. Уменьшение количества измерений с 80 до 10 приводит к увеличению неопределённости (дисперсии) оценок.

Большинство оценок коэффициентов экологических рисков (коэффициентов регрессии) выполнено для компонентов выбросов NOx и ЛОС, однако с учётом сильных корреляций NOx с выбросом ТЧ и СО можно считать, что оценки для NOx относятся к комплексному выбросу компонентов (ТЧ + NOx + СО).

Оценки коэффициентов регрессии в основном статистически незначимы (при уровне значимости $p = 0,1$), что может быть обусловлено малой величиной эффекта и ограниченным размером выборки данных и не исключает наличия экологической проблемы.

Результаты выполненных исследований могут быть скорректированы на следующих этапах при использовании более сложных моделей: учётом помимо загрязнения воздуха влияния бытовых и промышленных отходов, загрязнения бытовых и сточных вод, почвы. В работе нами использованы показатели интегральных выбросов без учёта плотности распределения населения в регионе и климатических изменений аэродинамических характеристик атмосферы, однако эти показатели могут повлиять на результаты анализа. Не учтено также влияние конкурирующих рисков заболеваемости от таких факторов, как курение и радон.

Приведённые аргументы свидетельствуют о том, что на данной стадии анализ имеет приближенные результаты и определяет только направления будущих актуальных исследований в рамках рассмотренной проблемы. Полученные значения годового химического риска заболевания раком лёгкого от выбросов в атмосферу в Российской Федерации составляют $0,022 \cdot 75,8 \cdot 10^{-5} = 1,7 \cdot 10^{-5}$ (или 1,7 случая в год на 100 000) для мужчин и $0,037 \cdot 16,9 \cdot 10^{-5} = 6,3 \cdot 10^{-6}$ (или 0,6 случая в год на 100 000) для женщин. В соответствии с «Руководством по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду» [13], индивидуальный риск в течение всей жизни более $1 \cdot 10^{-6}$, но менее $1 \cdot 10^{-4}$ является приемлемым. Таким образом, если оценку проводить согласно [13], то для населения Российской Федерации полученные химические риски индукции рака лёгкого от техногенных выбросов в атмосферу следует оценивать как приемлемые. Нормирование

химических рисков, к которым относятся выбросы ТЧ в атмосферу, ограничено сложностью оценки индивидуальной дозы воздействия и, естественно, отсутствием достаточного количества наблюдений за людьми. Химические риски в основном изучаются на животных с дальнейшим переносом оценок коэффициентов риска на людей. Сравним вклад выбросов ТЧ в заболеваемость раком лёгкого среди населения России с соответствующим потенциальным вкладом от техногенной ионизирующей радиации. Радиационный риск хорошо изучен и имеет обоснованные нормативы. Имеются многочисленные эпидемиологические исследования радиационного риска, основанные на данных наблюдений за большими группами или популяциями людей, облучённых в результате трудовой деятельности, ядерных аварий и инцидентов. В частности, оценка коэффициента избыточного относительного риска на единицу дозы (ERR/Гр) для заболеваемости раком лёгкого в когорте российских участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС составила 0,85/Гр [14]. В этом случае радиационному вкладу в рак лёгкого 0,022 (равному полученной оценке вклада от выбросов ТЧ для мужского населения нашей страны) будет соответствовать доза внешнего гамма-облучения мужчин 0,026 Гр: $0,026 \cdot 0,85 / (1 - 0,026 \cdot 0,85) = 0,022$. Здесь следует отметить, что дозы ионизирующей радиации порядка 0,02 Гр в настоящее время являются предельными для персонала атомной отрасли [15].

Заключение

Значения химических рисков индукции рака лёгкого от техногенных выбросов твёрдых частиц в атмосферу в Российской Федерации составляют менее 10^{-4} в год, что в соответствии с «Руководством по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду» [13] является приемлемым для населения. Определённую озабоченность вызывает существенный, но статистически незначимый вклад в заболеваемость раком лёгкого летучих органических соединений: 15–16% в Томской области, где эти выбросы максимальны для Сибирского федерального округа.

Полученные авторами результаты оценки вклада атмосферных выбросов твёрдых частиц в заболеваемость раком лёгкого населения нашей страны следует рассматривать как консервативные и предварительные вследствие ограниченной использованной регрессионной модели. Тем не менее в данном исследовании демонстрируется актуальность оценки канцерогенных рисков от атмосферных выбросов вредных веществ в сравнении с соответствующими рисками воздействия ионизирующей радиации.

Литература

(п.п. 1–9 см. References)

10. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году». М.; 2020.
11. Каприн А.Д., Старинский В.В., Петрова Г.В. *Злокачественные новообразования в России в 2010–2019 гг. (заболеваемость и смертность)*. М.; 2010–2019.
12. Пакет статистических программ «Статистика 10»; 2021. Доступно: <https://www.statsoft.ru>
13. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М.; 2004.
14. Кашеев В.В., Чекин С.Ю., Карпенко С.В., Максютов М.А., Туманов К.А., Кочергина Е.В. и др. Оценка радиационных рисков злокачественных новообразований среди российских участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. *Радиация и риск*. 2021; (1): 58–77.
15. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарные правила и нормативы. СанПиН 2.6.1.2523–09. М.; 2009.

References

1. Stewart B.W., Wild C.P. *World Cancer Report – 2014*. Lyon: IARC, WHO; 2014.
2. Alberg A.J., Brock M.V., Samet J.M. Epidemiology of lung cancer: looking to the future. *J. Clin. Oncol.* 2005; 23(14): 3175–85. <https://doi.org/10.1200/JCO.2005.10.462>
3. Hecht S.S. Lung carcinogenesis by tobacco smoke. *Int. J. Cancer.* 2012; 131(12): 2724–32. <https://doi.org/10.1002/ijc.27816>
4. Ridge C.A., McElean A.M., Ginsberg M.S. Epidemiology of lung cancer. *Semin. Intervent. Radiol.* 2013; 30(2): 93–8. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1342949>
5. Devesa S.S., Shaw G.L., Blot W.J. Changing patterns of lung cancer incidence by histological type. *Cancer Epidemiol. Biomarkers. Prev.* 1991; 1(1): 29–34.
6. Pawel D.J., Puskin J.S. The U.S. Environmental Protection Agency's assessment of risks from indoor radon. *Health Phys.* 2004; 87(1): 68–74. <https://doi.org/10.1097/00004032-200407000-00008>

7. Hubbard R., Venn A., Lewis S., Britton J. Lung cancer and cryptogenic fibrosing alveolitis. A population-based cohort study. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2000; 161(1): 5–8. <https://doi.org/10.1164/ajrccm.161.1.9906062>
8. Yang I.A., Holloway J.W., Fong K.M. Genetic susceptibility to lung cancer and co-morbidities. *J. Thorac. Dis.* 2013; 5(S5): S454–62. <https://doi.org/10.3978/j.issn.2072-1439.2013.08.06>
9. Lee T., Gany F. Cooking oil fumes and lung cancer: a review of the literature in the context of the U.S. population. *J. Immigr. Minor. Health.* 2013; 15(3): 646–52. <https://doi.org/10.1007/s10903-012-9651-1>
10. State report «On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2019». Moscow; 2020. (in Russian)
11. Kaprin A.D., Starinskiy V.V., Petrova G.V. *Malignant Tumors in Russia in 2010–2019 (Morbidity and Mortality) [Zlokachestvennye novoobrazovaniya v Rossii v 2010–2019 gg. (zabolevaemost' i smertnost')]*. Moscow; 2010–2019. (in Russian)
12. Package of statistical programs «Statistica»; 2021. Available at: <https://www.statsoft.ru> (in Russian)
13. Human Health Risk Assessment from Environmental Chemicals. Moscow: Federal Center of Statesanepidnadzor of Ministry of Health of Russia, 2004. (in Russian)
14. Kashcheev V.V., Chekin S.Yu., Karpenko S.V., Maksyutov M.A., Tumanov K.A., Kochergina E.V., et al. Assessment of radiation risks of malignant neoplasms among Russian participants in the liquidation of the consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Radiatsiya i risk.* 2021; (1): 58–77. (in Russian)
15. Radiation Safety Standards (RSS-99/2009). Sanitary-epidemiological rules and standards SanPiN 2.6.1.2523–09. Moscow; 2009. (in Russian)