

УДК 551.578.46:504.4:622.333.012

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ ОТ ВЛИЯНИЯ ТОКСИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ТОМСКОЙ ГРЭС-2

Осипова Нина Александровна¹,
osipova@tpu.ru

Таловская Анна Валерьевна¹,
talovskaj@yandex.ru

Филимоненко Екатерина Анатольевна¹,
filimonenko@tpu.ru

Язиков Егор Григорьевич¹,
yazikoveg@tpu.ru

Новиков Сергей Автономович¹,
nsa@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью устойчивого развития угольной энергетики, и как одной компоненты для достижения этой устойчивости – прогнозных оценок влияния твердых выбросов, образующихся при сгорании угля, при переходе сырья в усвояемые формы, на здоровье населения в условиях увеличения доли угольной генерации в топливном комплексе.

Цель исследования: определение уровня загрязнения воздуха твердыми выбросами от объектов теплоэнергетики (Томской ГРЭС-2); определение величины ингаляционного риска здоровью населения.

Объекты. Для проведения оценки экологических рисков для здоровья на территории г. Томска были выбраны участки, соответствующие территориям с наибольшим притоком техногенных пылевых частиц в зоне воздействия Томской ГРЭС-2, а также участки вне зоны влияния Томской ГРЭС-2, для сопоставления результатов исследования.

Методы: атмогеохимический; методы оценки риска воздействия химических веществ на здоровье человека; метод восстановления концентрации элементов в атмосферном воздухе на основе их содержания в твердой фазе снегового покрова; анализ неопределенности в расчете среднесуточных доз с использованием случайной выборки значений при известных законах распределения учитываемых величин.

Результаты. На территории, подверженной влиянию ГРЭС-2, установлен высокий уровень накопления в твердом осадке снега Zn, Ba, W, Ni, V, Cu, Co относительно фоновой территории, что отражает специфику влияния выбросов рассматриваемой теплоэлектростанции на атмосферный воздух. Наибольший удельный вклад в интегральный уровень неканцерогенных рисков от хронического ингаляционного поступления в организм металлов в окрестностях ГРЭС-2 вносят Cu, Al, Mn, Ba и Zn. Для всех элементов, обладающих канцерогенными свойствами, за исключением Cr (VI), значения индивидуального канцерогенного риска ниже 10^{-6} , что соответствует пренебрежимо малому уровню риска. Индивидуальный канцерогенный риск, вызванный вдыханием Cr (VI), имеет значения в интервале от $7,65 \cdot 10^{-7}$ до $4,6 \cdot 10^{-5}$, и значения, соответствующие верхней границе, расцениваются согласно общепринятой методологии как предельно допустимый риск. Уровни рисков от ингаляционного воздействия химических элементов в зонах воздействия Томской ГРЭС-2, а также значения индивидуального канцерогенного риска являются приемлемыми.

Ключевые слова:

Твердый осадок снега, тяжелые металлы, ингаляционный риск, канцерогенный риск, неканцерогенный риск, теплоэлектростанция.

Введение

Проблемы создания энергоэффективных производств тесно переплетаются с необходимостью снижения негативного воздействия этого вида деятельности на экосистемы и здоровье человека. Действительно, устойчивое развитие угольной энергетики как процесса технологического и экономического развития предполагает не только надежное и бесперебойное энергоснабжение потребителей, не только рациональное использование ресурсов, но и, несомненно, минимизацию воздействия на окружающую среду с целью повышения эффективности функционирования региона [1]. В России доля угольной генерации в структуре электроэнергетики является стабильно высокой. Согласно существующим

прогнозам увеличение доли угольной генерации к 2030 г. составит от 14,6 до 25,6 % [2]. Большой объем добычи, переработки и использования угля вызывает массу экологических проблем, вынуждающих оценивать экологические риски, связанные с освоением угольных ресурсов [3, 4].

Экологические риски от теплоэнергетических объектов определяются составом и объемом сжигаемых углей, высотой труб, через которые отходящие газы поступают в атмосферный воздух, местными климатическими условиями, близостью источников загрязнения к жилью. Эти риски еще выше в Сибири, на территориях с резко-континентальным климатом и низкой способностью атмосферы к самоочищению.

Методологической основой для широко востребованных и развиваемых направлений по оценке экологических рисков [5–17] служат методики: USEPA, Risk Assessment Guidance (1989), Health Effects Assessment Summary Tables (1997), The Risk Assessment Information System. RAIS (2005), WHO, Env Health Criteria (1994). В России основой является Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ (2004) [16, 18]. Наибольшая часть всех рисков здоровью от воздействия факторов окружающей среды связана с загрязненным атмосферным воздухом. По многочисленным литературным данным, среди всех источников загрязнения атмосферного воздуха тепловые электростанции, работающие на угле, являются крупнейшими из них и оказывают ощутимый эффект на здоровье проживающего населения [16, 19, 20].

Традиционно рассматриваются 4 группы загрязняющих веществ, характерных для выбросов объектов ТЭК, в отношении которых и идет развитие методологии анализа риска: газообразные оксиды углерода, азота, серы; твердые частицы (PM_{2,5}, PM₁₀); тяжелые металлы (как правило, в большинстве исследований, Fe, Co, Ni, Cd, Cr, As, Pb, Cu, Zn, Mn) и ртуть; полиароматические углеводороды, для которых особенно важна оценка риска канцерогенных эффектов [8, 21]. Металлы имеют определяющее значение в формировании токсических эффектов и риска здоровью, несмотря на то, что газообразные вещества преобладают в структуре атмосферных выбросов.

Работы по оценке риска воздействия тяжелых металлов, присутствующих в окружающей среде, для здоровья людей, проживающих в населенных пунктах, не входящих в перечень городов с наибольшим уровнем загрязнения атмосферы (по данным Росгидромета, 2015 г.), практически отсутствуют. Проблема длительного воздействия низких концентраций химических веществ в плане возможно скрытых отдаленных во времени изменений в организме становится все актуальнее и чаще привлекает внимание исследователей.

Объекты и методы исследования

Город Томск расположен на юго-востоке Западно-Сибирской равнины, на правом берегу реки Томь. Это административный центр Томской области, население г. Томска составляет 547989 человек.

Территория г. Томска характеризуется пространственной неоднородностью заболеваемости населения, в том числе неоднородностью общей онкологической заболеваемости. Зоны повышенного онкологического риска в целом соответствуют местам расположения промышленных предприятий и территориям, подверженным ветровому переносу их производственных выбросов [22, 23]. На территории города одним из основных источников загрязнения атмосферного воздуха и депонирующих природных сред является государственная район-

ная электростанция (ГРЭС-2), расположенная в зоне жилой застройки города [24–26].

Исходными данными для оценки риска здоровью должны служить данные о выбросах конкретных предприятий и результаты опробования атмосферного воздуха на постах наблюдений, однако их число сильно ограничено. Также ограничен круг рассматриваемых ключевых загрязнителей в системе экологического мониторинга, так, например, на станциях мониторинга атмосферного воздуха в г. Томск наблюдения осуществляются всего за концентрациями восьми металлов: Cr, Pb, Mn, Ni, Zn, Cu, Fe и Cd. В данной работе для оценки экологических рисков здоровью людей от воздействия тяжелых металлов, попадающих в организм ингаляционным путем, используются данные о содержании элементов в снеговом покрове. Выбор такого подхода к оценке рисков здоровью населения в окрестностях Томской ГРЭС-2 обусловлен рядом факторов. Во-первых, снежный покров является универсальным планшетом-накопителем загрязняющих веществ из атмосферного воздуха [27–41], позволяющим получить естественным образом усредненные концентрации загрязняющих веществ за период снегонакопления (5–6 месяцев), что имеет преимущество относительно прямых единичных замеров загрязняющих веществ в атмосферном воздухе для оценки экологических рисков. Во-вторых, так как большинство тяжелых металлов (исключая, например, ртуть) в атмосферном воздухе присутствуют преимущественно в форме различных соединений в составе твердых аэрозольных частиц, для оценки экологических рисков в работе использованы данные о содержании тяжелых металлов в составе твердого (нерастворимого) осадка снега. Кроме этого, известно, что, несмотря на высокую информативность гидрохимического состава снеготалых вод в практике эколого-геохимических исследований [40], по балансовым соотношениям между количествами взвешенной и растворенной форм нахождения металлов в снежном покрове большинство элементов преобладают в составе нерастворимой фракции. Так, в частности, в пробах снежного покрова из окрестностей Томской ГРЭС-2 Zn As Cd Co Ba Tl Mn Ni Cu Pb V Cr Ag Se Sn W Ga Ce Al сконцентрированы преимущественно в составе твердого осадка снега [41]. Геохимический состав твердого осадка снега отражает особенности пылевого загрязнения атмосферного воздуха в местах размещения промышленных предприятий [38]. Произвести оценку содержания химических элементов в атмосферном воздухе по данным о их содержании в твердом осадке снега позволяет комплексное применение концепций и моделей осаждения пылевых частиц из атмосферы на депонирующие поверхности [35–38] с учетом размера этих частиц, их дисперсности, метеорологических параметров среды осаждения [28, 42, 43] и эмпирических корреляций между интенсивностью поступления тяжелых металлов на снежный покров и концентра-

цией их в атмосферном воздухе [17, 27]. Учитывая, что современные методики анализа элементного состава природных сред позволяют определять более 20 различных тяжелых металлов в образцах, при использовании восстановленных концентраций химических элементов в атмосферном воздухе на основе данных элементного состава твердого осадка снега появляется возможность увеличения числа химических соединений для оценки риска здоровью.

Для проведения оценки экологических рисков для здоровья были выбраны три участка на территории г. Томска (рис. 1).

Два участка соответствуют территориям с наибольшим притоком техногенных пылевых частиц в зоне воздействия Томской ГРЭС-2. Данные участки расположены с подветренной стороны (преобладают юго-западные и южные ветра) относительно высотных источников загрязнения атмосферного воздуха – дымовых труб Томской ГРЭС-2, высота которых составляет 100 м. Площадь участка исследования была подобрана с учетом площадей ранее установленных пылевых и геохимических аномалий в зоне влияния Томской ГРЭС-2. Участок I – «северо-восточный вектор влияния ГРЭС-2», представляет собой территорию площадью 490 тыс. м², вытянутую в северо-восточном направлении относительно Томской ГРЭС-2, на которой отбор проб снега осуществлялся в 2013 и 2015 гг. по векторной сети с интервалом опробования 200–300 м. На территории участка «Участок II» – «площадь в зоне воздействия ГРЭС-2» площадью 11,88 км², отбор проб снега производился по площадной сети. Данный участок был выбран с целью апробации и усовершенствования методики оценки экологических рисков в зоне воздействия ГРЭС-2, использованной авторами в ранее проведенных исследованиях [44]. Третий участок (Участок III) выбран вне зоны влияния Томской ГРЭС-2 («вектор вне зоны влияния ГРЭС-2») и характеризует селитебную зону г. Томска, и может быть определен как «вектор сравнения» величин экологических рисков в отношении участков, подверженных пылевому загрязнению от выбросов Томской ГРЭС-2.

В качестве фоновой территории для сравнения концентраций химических элементов в твердом осадке снега и восстановленных концентраций в атмосферном воздухе использована территория Обсерватории «Фоновая» ИОА СО РАН (70 км от г. Томска в юго-восточном направлении). Общее количество отобранных проб составило 32 образца: в северо-восточном векторе влияния ГРЭС-2 5 образцов в 2013 г., 5 образцов в 2015 г. (Участок I), на площади в зоне влияния ГРЭС-2 (Участок II) – 16, в векторе вне зоны влияния ГРЭС-2 – 4 и на фоновой территории – 2 образца.

Пробы снега отбирали из шурфов на площадках с ненарушенным снеговым покровом на всю его мощность, масса каждой пробы составляла 15–18 кг. При отборе фиксировали площадь шурфа, из которого отбиралась проба, и время от мо-

мента снегостава до отбора пробы снега. Снеговые пробы растапливали при комнатной температуре, талую снеговую воду фильтровали через предварительно взвешенный беззольный фильтр. Осевший на фильтре твердый осадок снега просеивали через сито с размером ячейки 1×1 мм и проводили его аналитическое изучение. Аналитическое определение содержания металлов (Be, Al, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Ba, Ce, W, Tl, Pb) в твердом осадке снега выполняли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в ХАЦ «Плазма» (г. Томск).

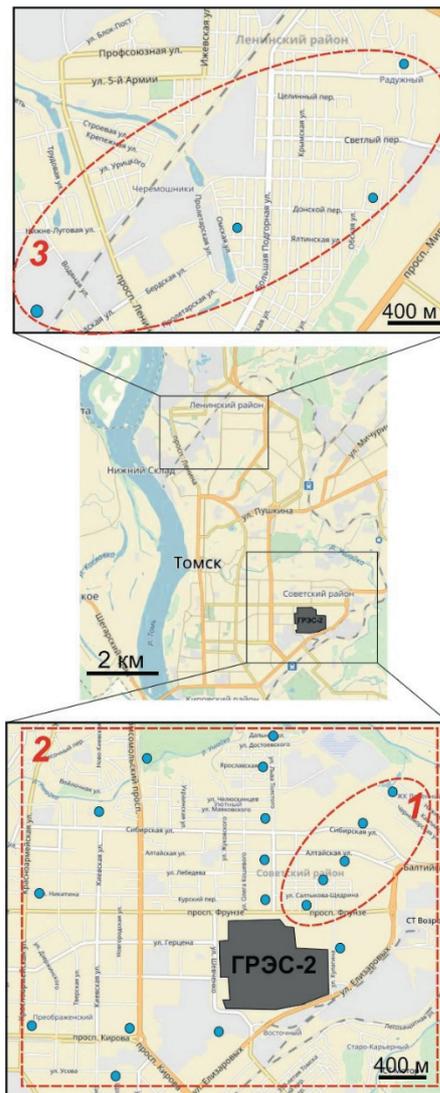


Рис. 1. Карта-схема расположения точек отбора проб снега (1 – «Участок I» (северо-восточный вектор влияния ГРЭС-2), отбор проб в 2013 и 2015 гг.; 2 – «Участок II» (площадь в зоне влияния ГРЭС-2), отбор проб в 2015 г.; 3 – «Участок III» (вектор вне зоны влияния ГРЭС-2), отбор проб в 2015 г.)

Fig. 1. Diagrammatic map of snow sample locations (1 – «Block I» (north-east impact vector of GRES-2), sampling in 2013 and 2015; 2 – «Block II» (area in the GRES-2 effect), sampling in 2015; 3 – «Block III» (vector out of the GRES-2 effect), sampling in 2015)

Также с целью установления пропорций между легкой и тяжелой минеральной фракциями в составе твердого осадка снега проводили изучение проб по запатентованной методике [45] в учебно-научной лаборатории электронно-оптической диагностики Международного инновационного научно-образовательного центра «Урановая геология» при кафедре геоэкологии и геохимии ТПУ.

Токсикологическая и санитарно-гигиеническая информация о веществах, выбранных для оценки риска здоровью людей, принята согласно базам данных US EPA [46–50] и российским нормативам [51]. Безопасные для здоровья людей содержания Al, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd, Sn, Sb, Ba, Ce, W, Tl в атмосферном воздухе при их хроническом воздействии, определенные Environmental Protection Agency (USEPA), в

2–28,6 раз строже Российских аналогов. Однако концентрации Be, Se, Pb, установленные в качестве предельно допустимых среднесуточных величин в воздухе населенных пунктов России, ниже в 1,6–2 раза, чем в нормативных документах US EPA.

Комплексирование исследований в области геохимической оценки территорий, токсичности и химического риска дало возможность получить результирующий продукт в виде алгоритма оценки риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих атмосферный воздух и аккумулированных в снежном покрове (рис. 2). Необходимо определить, что в рамках настоящей работы термин «оценка риска» применяется к реальным приложениям и означает анализ риска для частных ситуаций.

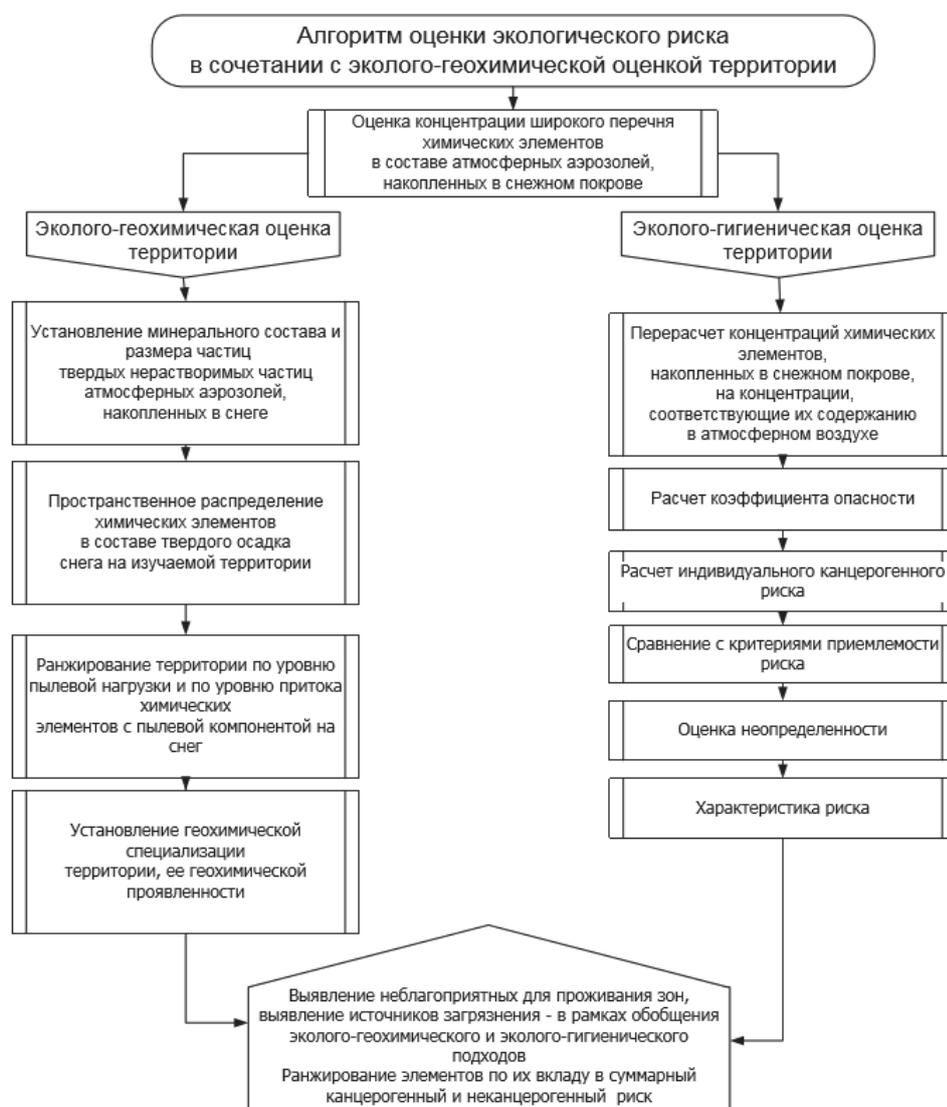


Рис. 2. Алгоритм оценки риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих атмосферный воздух и аккумулированных в снежном покрове

Fig. 2. Risk Assessment Algorithm with public health affected by chemical substances polluting air and being accumulated in the snow cover

Эколого-геохимическая оценка рассматриваемых участков на территории г. Томска основывалась на результатах оценки коэффициентов концентраций (КК) химических элементов в твердом осадке снега относительно фоновой территории:

$$КК = C_i / C_{i\text{фон}},$$

где C_i – концентрация i -го металла в твердом осадке снега в пробе; $C_{i\text{фон}}$ – концентрация i -го металла в твердом осадке снега в пробе фоновой территории (Обсерватория «Фоновая» ИОА СО РАН, 70 км от г. Томска).

Оценка риска для здоровья людей от хронического ингаляционного поступления с атмосферной пылью Be, Al, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Ba, Ce, W, Tl, Pb проводилась на основе восстановленных данных о среднесуточных концентрациях этих металлов в пыли атмосферного воздуха ($C_{\text{атм}}$). Расчет проводился на основе данных о содержании этих металлов в депонированной на снеговой покровы пыли ($C_{i\text{пыль}}$):

$$C_{\text{атм}} = Pn \cdot C_{i\text{пыль}} / W,$$

где W – скорость осаднения атмосферной пыли (м/сут); Pn – пылевая нагрузка (мг/м²·сут).

$$W = P_l \cdot W_l + P_h \cdot W_h,$$

где P_l – доля легкой фракции (частицы угля, сажи, шлака, полые алюмосиликатные сферуллы и др.) в составе нерастворимого осадка снега; P_h – доля тяжелой фракции (частицы кварца, глинистых минералов, окислов железа и других тяжелых металлов и др.) в составе нерастворимого осадка снега; W_l – скорость оседания легкой фракции, $W_l = 0,566$ см/с [37]; W_h – скорость оседания тяжелой фракции, $W_h = 0,826$ см/с [37], (W_l, W_h для частиц диаметром 5 мкм [44])

$$Pn = M / [S \cdot t],$$

где M – масса твердого осадка в снеговой пробе (мг); S – площадь шурфа (м²); t – период от начала снегостава до отбора пробы (сутки).

Статистическую обработку и анализ данных проводили посредством программного обеспечения STATISTICA 7.0 и Microsoft Excel. Анализ корреляционных связей между содержаниями микроэлементов в пробах твердого осадка снега проводился с применением ранговых коэффициентов корреляции Спирмена. Оценка различий между величинами пылевой нагрузки и содержания изучаемых элементов в пробах твердого осадка снега, отобранных в 2013 и 2015 гг. на участке 1 (северо-восточный вектор влияния ГРЭС-2), проводилась с помощью непараметрических статистических критериев Колмогорова–Смирнова и Манна–Уитни [52].

Оценка неканцерогенных рисков здоровью, обусловленных хроническим ингаляционным поступлением металлов в организм, производится на основе расчетов коэффициентов опасности (Hazard Quotient HQ):

$$HQ_i = C_{i\text{атм}} / R_i(C_i),$$

где $R_i(C_i)$ – референтная концентрация металла в воздухе, по данным IRIS EPA, HEAST EPA и отечественного руководства по оценке риска [46–50].

Для идентификации приоритетных органов и систем, в наибольшей степени поражаемых при комбинированном воздействии нескольких металлов, для каждого органа или системы был рассчитан суммарный индекс опасности (Total Hazard Index THI):

$$HI = \sum HQ_i.$$

В тех случаях, когда металл оказывает влияние на функционирование нескольких систем или органов, его коэффициент опасности (HQ) учитывался для каждой системы.

Расчет индивидуального канцерогенного риска осуществлялся с использованием данных о величине экспозиции и значениях факторов канцерогенного потенциала. Для канцерогенных химических веществ дополнительная вероятность развития рака у индивидуума на всем протяжении жизни (CR) оценивается с учетом среднесуточной дозы в течение жизни (Lifetime Average Daily Dose LADD):

$$CR_i = LADD \cdot SF_i,$$

где LADD – среднесуточная доза в течение жизни, мг/(кг·день); SF_i – фактор канцерогенного потенциала i -го вещества, (мг/(кг·день))⁻¹.

Среднесуточная доза при ингаляционном воздействии веществ с атмосферным воздухом рассчитывалась

$LADD = ((C \cdot T_{\text{out}} \cdot V_{\text{out}}) + (C \cdot T_{\text{in}} \cdot V_{\text{in}})) \cdot EF \cdot ED / (BW \cdot AT \cdot 365)$,
где LADD – среднесуточная доза, усредненная с учетом ожидаемой средней продолжительности жизни человека 70 лет, мг/(кг·день); C – концентрация вещества в атмосферном воздухе, мг/м³; стандартные факторы экспозиции: T_{out} – время, проводимое вне помещений, 8 ч/день; T_{in} – время, проводимое внутри помещений, 16 час/день; V_{out} – скорость дыхания вне помещений, 1,4 м³/ч; V_{in} – скорость дыхания внутри помещений, 0,6 м³/ч; EF – частота воздействия, 350 дней/год; ED – продолжительность воздействия, 30 лет; BW – масса тела, 70 кг; AT – период осреднения экспозиции, 70 лет.

Для оценки неопределенности при расчете среднесуточных доз канцерогенов применен вероятностный метод. Факторы экспозиции по смыслу являются неопределенными и имеют доверительный интервал значений, в пределах которого эти параметры могут варьироваться. Неопределенности возникают на каждом этапе оценки риска, и они связаны с целым рядом факторов, не только с погрешностью в определении концентраций загрязняющих веществ в окружающей среде. Большая доля неопределенности лежит в плоскости факторов экспозиции, характеризующих контакт поллютанта с человеком. Величины, входящие в формулу для расчета дозы, тоже имеют свой диапазон значений, в пределах которого они могут меняться, и подчиняются законам распределения. Поэтому для анализа неопределенностей при расчетах среднесуточных доз при оценке канцерогенных рисков был использован генератор случайных чисел (использовался метод Монте-Карло, основанный на генерации случайных чисел и реализованный в среде Mathcad), с помощью которого фор-

мировались последовательные сценарии. Перебор вариантов начинался с выбора случайного значения каждого из переменных параметров, учитываемых при расчете дозы, – частоты, продолжительности экспозиции, возраста и веса человека и т. д. (табл. 1). Причем процесс имитации осуществляется таким образом, чтобы случайный выбор значений из определенных вероятностных распределений не нарушал существования известных или предполагаемых отношений корреляции среди переменных. Затем для данного сценария находится значение показателя, которое сохраняется как отдельный результат расчета. Далее случайным образом выбирается другой набор случайных переменных и вычисляется итоговый показатель для второго сценария. Этот процесс повторяется множество раз, иногда несколько тысяч раз. Результаты всех имитационных экспериментов объединяются в выборку и анализируются с помощью статистических методов с целью получения закона распределения вероятностей среднесуточных доз. Таким образом, значение среднесуточных доз выражается не каким-либо единственным значением, а вероятностным распределением всех возможных его значений [15, 53–55].

Результаты и их обсуждение

Величина пылевой нагрузки на участке I – «северо-восточный вектор влияния ГРЭС-2» – изменяется от 14,1 до 152, при средней величине 48,6 мг/м² в сутки, на площадном участке в зоне влияния ГРЭС-2 (участок II) – от 22,9 до 64,1, при средней величине 43,6 мг/м² в сутки, а на рассматриваемой селитебной территории города Томска вне зоны влияния ГРЭС-2 (участок III) – от 22,3 до 98,6, при средней величине 48,0 мг/м² в сутки. Пылевая нагрузка на территории, подверженной влиянию выбросов Томской ГРЭС-2, и на территории вне зоны влияния исследуемой теплоэлектростанции сравнения (участок III) соответствует низкой степени загрязнения согласно нормативной градации (<250 мг/м² в сутки [56]). Указанные средние величины пылевой нагрузки на территории изучаемых участков до 7,8 раз превышают фон (6,3 мг/м² в сутки).

Различия величины пылевой нагрузки на участке, соответствующем северо-восточному вектору воздействия Томской ГРЭС-2, в 2013 и 2015 гг. статистически незначимы, что может быть связано с наличием постоянно действующих организованных и неорганизованных источников выбросов твердых загрязняющих веществ в атмосферный воздух, а также, вероятно, с одинаковой долей использования угля (60 %) и газа (40 %) в качестве энергоресурсов на ГРЭС-2 в зимний период годов наблюдения. Кроме этого, не следует исключать возможность влияния на количество твердых выбросов в атмосферный воздух автотранспорта, так как Томская ГРЭС-2 расположена в центральной части города и в зоне ее влияния находится значительное количество автодорог.

Таблица 1. Вариабельность факторов экспозиции, используемых для расчета дозы при оценке канцерогенного риска [54]

Table 1. Variability of exposure factors used in calculating the dose at assessing carcinogenic risk [54]

Фактор экспозиции и его характеристика Exposure factor and its dimension	Тип распределения Distribution	Вариабельность или доверительный интервал значений Variability or confidence interval
T_{out} – время, проводимое вне помещений, ч/день (time spent outdoors, h/day)	Точечное Point	8±2
T_{in} – время, проводимое внутри помещений, ч/день (time spent indoors, h/day)		16±4
V_{out} – скорость дыхания вне помещений, м ³ /ч (breathing rate outdoors, m ³ /h)		1,4±0,2
V_{in} – скорость дыхания внутри помещений, м ³ /ч (breathing rate indoors, m ³ /h)		0,6±0,1
EF – частота воздействия, дней/год (exposure frequency, day/year)	Триангулярное Triangular	350 (180–365)
ED – продолжительность воздействия, лет (exposure time length, year)	Логнормальное Lognormal	30 (19–43)
BW – масса тела, кг (body weight, kg)	Логнормальное Lognormal	70 (55–80)
AT – период осреднения экспозиции, лет (period of exposure average-out, year)	Точечное Point	70
C – концентрация вещества в атмосферном воздухе, мг/м ³ (substance concentration in the air, mg/m ³)	Нормальное Normal	$C \pm SD$

SD – стандартное отклонение/standard deviation.

Для территорий в зоне воздействия теплоэлектростанции не характерны высокие скорости оседания атмосферной пыли на снеговой покров. Это связано с тем, что в вещественном составе твердого осадка снега в окрестностях объектов теплоэнергетики присутствует большое количество частиц с относительно низким удельным весом (уголь, частицы сажи, золы, полые алюмосиликатные микросферуллы) [44, 57].

При оценке экологических рисков пристального внимания требуют низкие концентрации веществ, постоянно присутствующих в природных средах, так как они способны привести к отдаленным во времени негативным последствиям для здоровья. Также для оценки рисков здоровью наряду с токсикологическими характеристиками загрязняющих веществ необходимо учитывать и эколого-геохимические критерии – уровень пылевой нагрузки и коэффициенты концентрации [58]. Концентрации химических элементов в твердом осадке снега на территории рассматриваемых зон воздействия Томской ГРЭС-2, а также вне зоны влияния ее выбросов, и соответствующие им значения коэффициентов концентрации представлены на рис. 3 и в табл. 2.

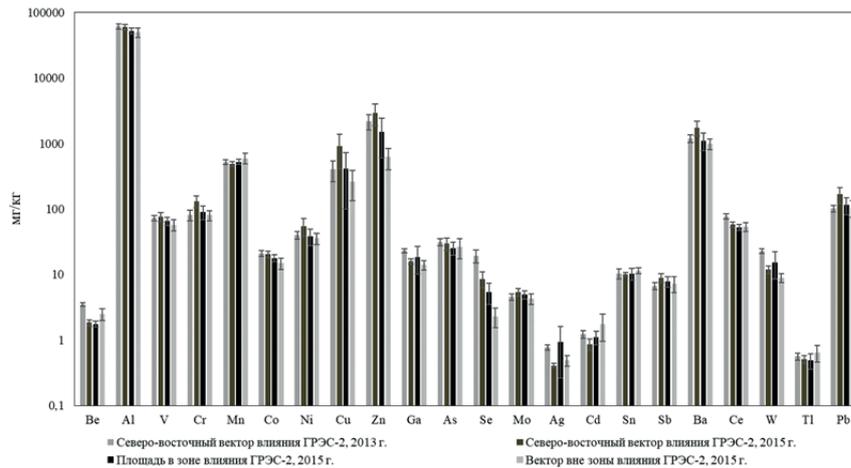


Рис. 3. Концентрации химических элементов в твердом осадке снега в зоне воздействия Томской ГРЭС-2 и вне зоны ее влияния

Fig. 3. Concentrations of chemical elements in snow solid residue in the area affected by the Tomsk GRES-2 and outside its impact area

Таблица 2. Коэффициенты концентрации химических элементов в твердом осадке снега в зоне воздействия Томской ГРЭС-2 и вне зоны ее влияния

Table 2. Coefficients of chemical elements concentration in snow solid sediment in the area affected by the Tomsk GRES-2 and outside its impact area

Элемент/Element	Участок I Северо-восточный вектор влияния ГРЭС-2 Block I North-east vector of GRES-2 impact			Участок II Площадь в зоне влияния ГРЭС-2 Block II Area affected by GRES-2			Участок III Вектор вне зоны влияния ГРЭС-2 Block III Vector outside the area affected by GRES-2					
	2013 г.			2015 г.								
	количество проб/sample number											
	Среднее/Mean	Мин/Min	Макс/Max	Среднее/Mean	Мин/Min	Макс/Max	Среднее/Mean	Мин/Min	Макс/Max	Среднее/Mean	Мин/Min	Макс/Max
Be	2,3	2,0	2,6	1,2	0,9	1,6	1,2	0,6	2,3	1,6	0,9	2,5
Al	2,8	1,8	3,4	2,8	2,2	3,7	2,4	1,6	3,7	2,3	1,3	3,1
V	3,0	2,0	3,8	3,2	2,3	5,0	2,7	1,8	5,0	2,4	1,3	3,5
Cr	1,9	1,2	3,2	3,0	1,8	5,1	2,1	1,1	5,1	1,9	1,2	2,7
Mn	2,3	1,6	2,6	2,1	1,6	2,5	2,3	1,6	3,1	2,6	1,5	3,5
Co	3,3	2,0	4,1	3,2	2,3	4,3	2,8	1,9	4,3	2,3	1,3	3,3
Ni	2,9	1,4	3,8	4,1	1,8	8,2	2,8	1,4	8,2	2,6	1,2	3,7
Cu	3,6	1,6	8,5	8,1	1,4	23,2	3,7	0,7	23,2	2,3	0,8	5,6
Zn	15,4	6,6	28,0	20,8	7,7	39,6	10,6	2,3	39,6	4,4	1,5	7,9
Ga	2,3	1,6	2,8	1,6	1,3	2,0	1,8	0,8	7,9	1,4	0,7	1,8
As	3,0	1,9	4,1	2,8	1,6	4,6	2,4	1,6	5,0	2,5	0,9	4,8
Se	1,6	0,8	2,8	0,7	0,1	1,0	0,4	0,1	1,0	0,2	0,1	0,3
Mo	2,4	1,6	3,1	2,8	1,9	3,8	2,6	1,3	3,8	2,2	1,5	3,2
Ag	1,6	1,1	2,0	0,8	0,6	0,9	1,9	0,4	11,4	1,0	0,6	1,4
Cd	4,1	2,6	5,1	2,9	1,9	4,5	3,7	1,9	7,6	5,8	1,9	13,2
Sn	0,3	0,2	0,5	0,3	0,3	0,4	0,3	0,1	0,7	0,3	0,3	0,4
Sb	1,6	0,9	2,1	2,1	1,4	3,1	1,8	1,0	3,1	1,7	1,2	3,1
Ba	3,9	2,9	5,6	5,7	2,8	9,4	3,6	1,7	9,4	3,3	1,5	4,3
Ce	2,3	1,4	2,6	1,7	1,3	2,0	1,6	1,0	2,0	1,6	1,0	2,1
W	8,8	6,6	10,5	4,6	2,7	5,8	5,9	2,7	24,6	3,4	2,5	4,6
Tl	2,2	1,3	3,0	2,0	1,6	3,0	2,0	0,8	5,1	2,6	1,1	4,5
Pb	1,3	1,0	1,9	2,2	1,2	4,3	1,5	0,5	4,3	1,4	0,8	2,5

Техногенная геохимическая специализация твердого осадка снега на участке I (северо-восточный вектор влияния ГРЭС-2) проявляется в повышенных уровнях накопления Zn (КК=20,8), Cu, Ba, W, Ni, V, Co (КК=3,2...8,1), Cr, Cd, As, Al, Mn, Pb, Mo, Sb, Tl (КК=2,1...3,0) относительно фона, на участке II (площадь в зоне влияния ГРЭС-2), на участке III – Zn, W, Ba, Cu и Cd (КК=3,6...10,6), Al, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, As, Mo и Tl (КК=2,1...2,8). Анализ средних значений коэффициентов концентрации позволяет выделить группу элементов – Zn, Ba, W, Ni, V, Cu, Co, которая характеризуется высоким уровнем накопления в твердом осадке снега на территории, подверженной влиянию ГРЭС-2, относительно проб твердого осадка снега с территории вне зоны влияния рассматриваемой теплоэлектростанции. Выявленные химические элементы можно определить как элементы-индикаторы для территорий, подверженных влиянию выбросов от сжигания топлива. Сравнительный анализ показал статистически незначимые различия содержания Zn, Ba, Ni, V, Cu и Co в пробах твердого осадка снега с северо-восточного вектора влияния ГРЭС-2 за 2013 и 2015 гг., что может свидетельствовать о сохранении источников их поступления. Выявленные элементы-индикаторы с высокой долей вероятности отражают геохимическую специализацию используемого топлива и зольных уносов ГРЭС-2. Угли Кузнецкого бассейна, используемые на ГРЭС-2, обогащены Zn, Ba, V, Ni, Co, Cu и другими микроэлементами [59, 60], которые при высокотемпературном сжигании угля могут поступать в составе ультрамелких твердых частиц в атмосферный воздух [61].

Восстановленные расчетным способом концентрации металлов в атмосферном воздухе выбранных участков на территории г. Томска представлены в табл. 3. Полученные значения сопоставимы с данными прямых фактических измерений концентраций отдельных металлов в атмосферном воздухе г. Томска [62], что говорит о приемлемости предложенной в работе модели для оценки содер-

Таблица 3. Восстановленные концентрации элементов в атмосферном воздухе в зоне воздействия Томской ГРЭС-2 и вне зоны ее влияния, нг/м³

Table 3. Restored concentrations of elements in atmospheric air in the area of Tomsk GRES-2 impact and beyond the impact area, ng/m³

Элементы Elements	Фон Background	Участок I Северо-восточный вектор влияния ГРЭС-2 Block I North-east impact vector of GRES-2		Участок II Площадь в зоне влияния ГРЭС-2, 2015 г. Block II Area affected by GRES 2, 2015	Участок III Вектор вне зоны влияния ГРЭС-2, 2015 г. Block III Vector beyond the GRES-2 impact area, 2015
		2013 г.	2015 г.		
		Количество проб/Sample number			
	2	5	5	16	4
Be	0,01	0,28±0,03	0,13±0,02	0,15±0,04	0,23±0,08
Al	203	4786±265	4091±522	4330±932	4499±1564
V	0,2	5,7±0,4	5±0,5	5,3±1,1	5,1±1,8
Cr	0,4	6,3±0,9	9±1,7	6,9±1,3	6,9±2,1
Mn	2,2	41±3	35±8	42±9	58±27
Co	0,1	1,6±0,1	1,4±0,2	1,4±0,3	1,5±0,7
Ni	0,1	3,1±0,2	3,6±0,7	3±0,6	3,2±1,2
Cu	1,1	34±13	51±18	25±7	19±8
Zn	1,3	163±36	225±98	156±75	65±35
Ga	0,1	1,8±0,1	1,1±0,2	1,3±0,3	1,3±0,5
As	0,1	2,4±0,2	2±0,4	2±0,4	2,5±1,1
Se	0,11	1,5±0,3	0,6±0,2	0,4±0,1	0,2±0,1
Mo	0,02	0,36±0,03	0,36±0,05	0,39±0,08	0,4±0,17
Ag	0,005	0,06±0,01	0,03±0,01	0,05±0,01	0,04±0,02
Cd	0,003	0,09±0,01	0,06±0,01	0,07±0,01	0,16±0,07
Sn	0,31	0,81±0,1	0,69±0,1	0,73±0,14	0,92±0,22
Sb	0,04	0,51±0,03	0,63±0,13	0,54±0,08	0,6±0,18
Ba	2,87	95±12	142±55	90±22	91±33
Ce	0,3	6±0,3	3,9±0,4	4,2±0,9	5,1±2,1
W	0,02	1,9±0,4	0,9±0,2	1,1±0,2	0,9±0,4
Tl	0,002	0,040±0,004	0,030±0,004	0,04±0,01	0,06±0,02
Pb	0,72	8,9±2,4	14±6,3	8,6±2,2	8,9±3

жания веществ в воздухе на основе их концентраций в твердом осадке снега.

Восстановленные концентрации Cu, Zn, Cr, Ni, Ba, Pb в воздухе в пределах северо-восточного вектора, наиболее чувствительного к выбросам ГРЭС-2, выше по сравнению с другими участками, что также отражает геохимическую специфику выбросов этого предприятия. Повышенные концентрации свинца, по-видимому, связаны с выбросами автотранспорта, влияние которого полностью не удалось исключить, несмотря на большое внимание к этому фактору при выборе мест отбора проб.

Химические элементы-загрязнители присутствуют в окружающей среде не в виде отдельных, изолированных, веществ, а формируют ассоциации, способные оказывать комбинированное воздействие на организм, при котором может наблюдаться как суммирование эффектов, так и их потенцирование.

Результаты расчета коэффициентов опасности для оценки неканцерогенных эффектов воздействия рассматриваемых металлов на организм человека при их хроническом ингаляционном поступлении приведены в табл. 4. Значения коэффициентов опасности для рассматриваемых участков, как в зоне воздействия ГРЭС-2, так и вне зоны ее влияния, для большинства элементов изменяются в широком диапазоне – от 10^{-6} до 10^{-2} , однако есть элементы со зна-

чениями коэффициентов опасности ингаляционного воздействия в диапазоне от 10^{-2} до целых значений: Cu (1,3...2,6), Al (0,82...0,96), Mn (0,71...0,90), Ba (0,19...0,28), Zn (0,18...0,25). Если рассчитанный коэффициент опасности (HQ) не превышает единицу, то вероятность развития у человека вредных эффектов, при ежедневном поступлении вещества в течение жизни, несущественна и такое воздействие характеризуется как допустимое. Если HQ больше единицы, то вероятность развития вредных эффектов существенна и возрастает пропорционально HQ.

Для площадной зоны воздействия ГРЭС-2 (Участок II) установлено, что наибольший удельный вклад в интегральный уровень неканцерогенных рисков от хронического ингаляционного поступления в организм металлов ($HQ > 0,1$) вносят Cu ($1,3 \pm 3,6 \cdot 10^{-1}$), Al ($9,2 \cdot 10^{-1} \pm 1,8 \cdot 10^{-1}$), Mn ($9,0 \cdot 10^{-1} \pm 1,8 \cdot 10^{-1}$), Ba ($1,9 \cdot 10^{-1} \pm 4,3 \cdot 10^{-2}$), Zn ($1,8 \cdot 10^{-1} \pm 8,5 \cdot 10^{-2}$). Аналогичная последовательность металлов, которые обуславливают основной вклад в уровень неканцерогенного риска, характерна и для северо-восточного вектора влияния ГРЭС-2 (табл. 4, рис. 4). Таким образом, ряд по уменьшению коэффициентов опасности ингаляционного риска Cu-Al-Mn-Ba-Zn характеризует территорию окрестностей ГРЭС-2 по эколого-гигиеническому критерию, т. е. является эколого-гигиеническим индикатором зоны воздействия ГРЭС-2.

Таблица 4. Коэффициент опасности хронических неканцерогенных эффектов тяжелых металлов в зоне влияния ГРЭС-2 и вне зоны ее воздействия

Table 4. Hazard factor of chronic non-carcinogenic effects of heavy metals in and outside the GRES-2 impact zone

Элемент Element	Участок I/Block I		Участок II/Block II	Участок III/Block III
	Северо-восточный вектор влияния ГРЭС-2, 2013 г. North-east impact vector of GRES-2, 2013	Северо-восточный вектор влияния ГРЭС-2, 2015 г. North-east impact vector of GRES-2, 2015	Площадь в зоне влияния ГРЭС-2, 2015 г. GRES-2 impact area, 2015	Вектор вне зоны влияния ГРЭС-2, 2015 г. Vector beyond the GRES-2 impact area, 2015
	Количество проб/Sample number			
	5	5	16	4
Be	$1,4 \cdot 10^{-2} \pm 1,7 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-3} \pm 1,2 \cdot 10^{-3}$	$7,9 \cdot 10^{-3} \pm 1,9 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-2} \pm 4,1 \cdot 10^{-3}$
Al	$9,6 \cdot 10^{-1} \pm 5,3 \cdot 10^{-2}$	$8,2 \cdot 10^{-1} \pm 1,0 \cdot 10^{-1}$	$9,2 \cdot 10^{-1} \pm 1,8 \cdot 10^{-1}$	$9,0 \cdot 10^{-1} \pm 3,1 \cdot 10^{-1}$
V	$8,1 \cdot 10^{-2} \pm 6,2 \cdot 10^{-3}$	$7,2 \cdot 10^{-2} \pm 7,5 \cdot 10^{-3}$	$8,1 \cdot 10^{-2} \pm 1,6 \cdot 10^{-2}$	$7,3 \cdot 10^{-2} \pm 2,5 \cdot 10^{-2}$
Cr	$6,3 \cdot 10^{-2} \pm 8,6 \cdot 10^{-3}$	$9,0 \cdot 10^{-2} \pm 1,7 \cdot 10^{-2}$	$7,3 \cdot 10^{-2} \pm 1,3 \cdot 10^{-2}$	$6,9 \cdot 10^{-2} \pm 2,1 \cdot 10^{-2}$
Mn	$8,2 \cdot 10^{-1} \pm 6,1 \cdot 10^{-2}$	$7,1 \cdot 10^{-1} \pm 1,6 \cdot 10^{-1}$	$9,0 \cdot 10^{-1} \pm 1,8 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \pm 5,3 \cdot 10^{-1}$
Co	$8,1 \cdot 10^{-2} \pm 4,8 \cdot 10^{-3}$	$7,0 \cdot 10^{-2} \pm 1,1 \cdot 10^{-2}$	$7,6 \cdot 10^{-2} \pm 1,5 \cdot 10^{-2}$	$7,3 \cdot 10^{-2} \pm 3,3 \cdot 10^{-2}$
Ni	$6,1 \cdot 10^{-2} \pm 4,6 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{-2} \pm 1,4 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-2} \pm 1,2 \cdot 10^{-2}$	$6,5 \cdot 10^{-2} \pm 2,3 \cdot 10^{-2}$
Cu	$1,7 \pm 6,4 \cdot 10^{-1}$	$2,6 \pm 8,8 \cdot 10^{-1}$	$1,3 \pm 3,6 \cdot 10^{-1}$	$9,5 \cdot 10^{-1} \pm 3,9 \cdot 10^{-1}$
Zn	$1,8 \cdot 10^{-1} \pm 4,0 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-1} \pm 1,1 \cdot 10^{-1}$	$1,8 \cdot 10^{-1} \pm 8,5 \cdot 10^{-2}$	$7,3 \cdot 10^{-2} \pm 3,9 \cdot 10^{-2}$
Ga	$4,5 \cdot 10^{-5} \pm 2,8 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-5} \pm 3,8 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-5} \pm 6,3 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-5} \pm 1,3 \cdot 10^{-5}$
As	$8,2 \cdot 10^{-2} \pm 7,9 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-2} \pm 1,2 \cdot 10^{-2}$	$6,9 \cdot 10^{-2} \pm 1,4 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-2} \pm 3,5 \cdot 10^{-2}$
Se	$1,9 \cdot 10^{-2} \pm 3,6 \cdot 10^{-3}$	$7,9 \cdot 10^{-3} \pm 2,0 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-3} \pm 1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3} \pm 1,5 \cdot 10^{-3}$
Mo	$3,0 \cdot 10^{-5} \pm 2,8 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-5} \pm 4,4 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-5} \pm 6,9 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-5} \pm 1,5 \cdot 10^{-5}$
Ag	$3,1 \cdot 10^{-6} \pm 3,2 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-6} \pm 2,5 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-6} \pm 6,9 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-6} \pm 8,3 \cdot 10^{-7}$
Cd	$4,7 \cdot 10^{-3} \pm 2,8 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-3} \pm 5,9 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-3} \pm 5,6 \cdot 10^{-4}$	$7,9 \cdot 10^{-3} \pm 3,6 \cdot 10^{-3}$
Sn	$4,0 \cdot 10^{-5} \pm 5,0 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-5} \pm 1,1 \cdot 10^{-6}$	$3,9 \cdot 10^{-5} \pm 7,0 \cdot 10^{-6}$	$4,6 \cdot 10^{-5} \pm 1,1 \cdot 10^{-5}$
Sb	$1,3 \cdot 10^{-3} \pm 6,7 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-3} \pm 3,3 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3} \pm 2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3} \pm 4,6 \cdot 10^{-4}$
Ba	$1,9 \cdot 10^{-1} \pm 2,4 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{-1} \pm 1,1 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-1} \pm 4,3 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-1} \pm 6,7 \cdot 10^{-2}$
Ce	$3,0 \cdot 10^{-2} \pm 1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-2} \pm 2,2 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-2} \pm 4,2 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-2} \pm 1,1 \cdot 10^{-2}$
W	$1,9 \cdot 10^{-5} \pm 3,6 \cdot 10^{-6}$	$8,7 \cdot 10^{-6} \pm 1,9 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-5} \pm 2,2 \cdot 10^{-6}$	$8,9 \cdot 10^{-6} \pm 4,4 \cdot 10^{-6}$
Tl	$1,6 \cdot 10^{-4} \pm 1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4} \pm 1,3 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-4} \pm 2,4 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-4} \pm 8,6 \cdot 10^{-5}$
Pb	$1,8 \cdot 10^{-2} \pm 4,8 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-2} \pm 1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2} \pm 4,4 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-2} \pm 6,0 \cdot 10^{-3}$

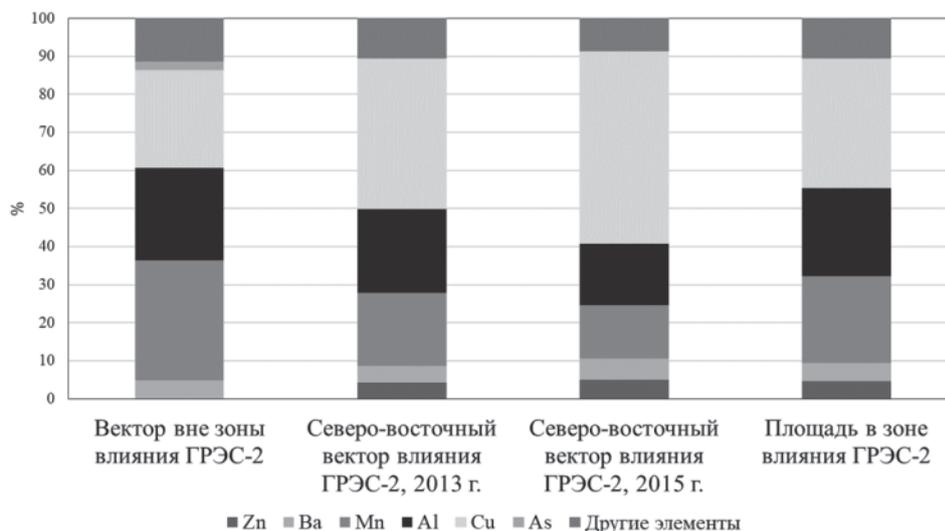


Рис. 4. Вклад элементов в суммарный коэффициент опасности хронических неканцерогенных эффектов в зоне влияния ГРЭС-2 и вне зоны ее влияния, %

Fig. 4. Contribution of elements into the total hazard factor of chronic non-carcinogenic effects in GRES-2 impact area and outside its impact area, %

В отношении вклада алюминия в интегральный уровень неканцерогенных рисков здоровью можно предполагать, что оценки его коэффициента опасности завышены. Это связано с тем, что зна-

чительная доля алюминия в составе взвешенных твердых частиц в атмосферном воздухе находится в виде природных соединений (например, полевых шпатов, глинистых минералов и т. д. [57]). В связи

Таблица 5. Характеристики канцерогенного риска от ингаляционного воздействия тяжелых металлов в зоне воздействия ГРЭС-2 и вне зоны ее влияния

Table 5. Characteristics of carcinogenic risk associated with the heavy metals inhalation exposure in the area affected by GRES-2 and outside this area

Элемент Element	Код CAS Index CAS	SF, мг/(кг·день) ⁻¹ mg/(kg·day) ⁻¹	Участок I/Block I				Участок II/Block II		Участок III/Block III	
			Северо-восточный вектор влияния ГРЭС-2, 2013 г. North-east impact vector of GRES-2, 2013		Северо-восточный вектор влияния ГРЭС-2, 2015 г. North-east impact vector of GRES-2, 2015		Площадь в зоне влияния ГРЭС-2, 2015 г. GRES-2 impact area, 2015		Вектор вне зоны влияния ГРЭС-2, 2015 г. Vector beyond the GRES-2 impact area, 2015	
			LADD, мг/(кг·день)	CR	LADD, мг/(кг·день)	CR	LADD, мг/(кг·день)	CR	LADD, мг/(кг·день)	CR
Be	7440-41-7	8,4	3,45E-08	2,90E-07	1,59E-08	1,34E-07	1,93E-08	1,62E-07	2,76E-08	2,32E-07
Cr (VI)	18540-29-9	42	7,65E-07	3,21E-05	1,09E-06	4,60E-05	8,92E-07	3,74E-05	8,44E-07	3,54E-05
Co	7440-48-4	9,8	1,99E-07	1,95E-06	1,71E-07	1,68E-06	1,85E-07	1,81E-06	1,78E-07	1,74E-06
Ni	7440-02-0	0,84	3,72E-07	3,13E-07	4,45E-07	3,74E-07	3,89E-07	3,27E-07	3,97E-07	3,33E-07
As	7440-38-2	15	2,99E-07	4,49E-06	2,40E-07	3,60E-06	2,54E-07	3,81E-06	3,03E-07	4,54E-06
Cd	7440-43-9	6,3	1,15E-08	7,22E-08	7,33E-09	4,62E-08	9,64E-09	6,07E-08	1,94E-08	1,22E-07
Pb	7439-92-1	0,042	1,08E-06	4,54E-08	1,70E-06	7,16E-08	1,11E-06	4,68E-08	1,09E-06	4,56E-08

с этим не стоит переоценивать значимость вклада этого элемента в формирование уровня неканцерогенных рисков на рассматриваемых участках территории г. Томска. Однако, наравне с указанным фактом необходимо отметить, что территории, подверженные воздействию выбросов от Томской ГРЭС-2, отличаются от других территорий города повышенными содержаниями в пробах твердого осадка снега техногенных микросферул алюмосиликатного состава [25, 44, 57].

Расчет индивидуального канцерогенного риска проводился по содержанию элементов, обладающих канцерогенными свойствами согласно классификации Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ), результаты расчетов представлены в табл. 5. Для всех элементов, за исключением Cr (VI), значения риска ниже 10^{-6} , что соответствует пренебрежимо малому уровню риска. Индивидуальный канцерогенный риск, вызванный вдыханием Cr (VI), имеет значения в интервале от $7,65 \cdot 10^{-7}$ до $4,6 \cdot 10^{-5}$, соответствующие верхней границе, расцениваются согласно общепринятой методологии как предельно допустимый риск. Но и эти значения можно считать завышенным, так как выбранный метод анализа определяет общее содержание элемента, без выделения содержания шестивалентного хрома, который обладает канцерогенностью.

Плотности вероятности среднесуточных доз веществ, обладающих доказанной канцерогенностью по классификации Международного Агентства по изучению рака (МАИР) (Cr (VI), Cd, As, Be, Ni, Co, Pb) при их поступлении в организм человека ингаляционным путем, приведены на рис. 5.

Анализ полученных графиков распределения плотности вероятности величин дозы рассматриваемых химических элементов позволяет сделать вывод, что вероятность реализации дозы, оцененной в рамках детерминистского подхода (табл. 6), лежит в интервале от 10 до 30 %, в зависимости от элемента и его концентрации в атмосферном воздухе.

Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что территория, подверженная влиянию ГРЭС-2, относительно территории вне зоны влияния рассматриваемой теплоэлектростанции характеризуется повышенным уровнем накопления в твердом осадке снега Zn, Ba, W, Ni, V, Cu, Co. Также определено, что уровни экологических рисков от ингаляционного воздействия химических элементов в зонах влияния Томской ГРЭС-2 и вне зоны ее влияния являются приемлемыми. Выявленные уровни неопределенности параметров в оценке канцерогенных рисков позволяют сделать вывод о возможности использования полученных значений рисков как относительных или ориентировочных.

Наиболее точные результаты по оценке рисков здоровью от ингаляционного поступления токсичных веществ могут быть установлены только в результате организации эпидемиологических исследований на рассматриваемых участках территории г. Томска. Однако эпидемиологические исследования позволяют получить информацию о фактическом состоянии здоровья населения, проживающего в зоне воздействия ГРЭС-2, тогда как задачей процедуры оценки рисков является именно прогнозная, т. е. вероятностная, характеристика эколого-геохимической обстановки территории.

Сопоставление результатов оценки рисков здоровью населения на территории двух участков: участка, характеризующего площадь в зоне воздействия ГРЭС-2, и участка северо-восточного вектора воздействия теплоэлектростанции – позволяет сделать вывод о наибольшей представительности результатов оценки экологических рисков, рассчитанных для площадного участка.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (№ 16-45-700184р_а). Исследования выполнены в Национальном исследовательском Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров.

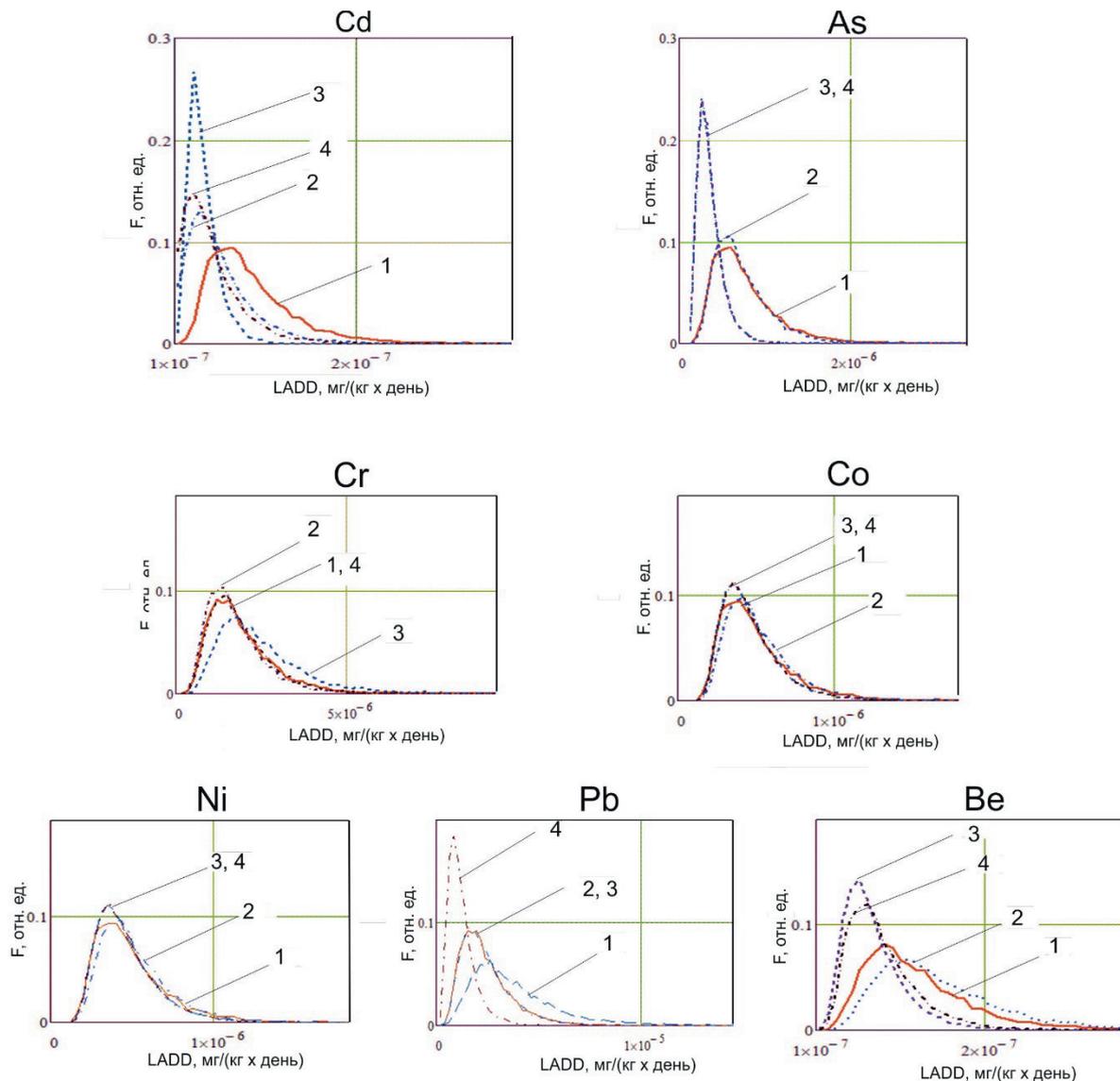


Рис. 5. Плотность вероятности распределения дозы при оценке канцерогенного риска от ингаляционного воздействия металлов в зоне влияния ГРЭС-2 и вне ее зоны влияния (1 – вектор вне зоны влияния ГРЭС-2; 2 – северо-восточный вектор влияния ГРЭС-2, 2013 г.; 3 – северо-восточный вектор влияния ГРЭС-2, 2015 г.; 4 – площадь в зоне влияния ГРЭС-2)

Fig. 5. Density of dose distribution probability when assessing the carcinogenic risk associated with inhalation exposure to metals in and outside the GRES-2 impact area (1 – outside the GRES-2 impact area; 2 – north-east impact vector of GRES-2, 2013; 3 – north-east impact vector of GRES-2, 2015; 4 – GRES-2 impact area)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Зорина Т.Г. Устойчивое развитие энергетики: сущность и методические подходы к оценке // Современные технологии управления. – № 1 (49). – Номер статьи: 4905. URL: <http://sovman.ru/article/4905/> (дата обращения: 15.10.2017).
- Энергетическая стратегия России на период до 2030 года // Министерство энергетики РФ. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения 20.09.2017).
- Якуцени С.П. Распространенность углеводородного сырья, обогащенного тяжелыми элементами-примесями. Оценка экологических рисков. – СПб.: Недра, 2005. – 372 с.
- Full cost accounting for the life cycle of coal / P.R. Epstein, J.J. Buonocore, K. Eckerle, M. Hendryx, B.M. Stout, R. Heineberg, R.W. Clapp, B. May, N.L. Reinhart, M.M. Ahern, S.K. Doshi, L. Glustrom // Annals of the New York Academy of Sciences. – 2011. – V. 1219. – № 1. – P. 73–98.
- Chemical characterization and toxicity assessment of fine particulate matters emitted from the combustion of petrol and diesel fuels / D. Wu., F. Zhang, W. Lou, D. Li, J. Chen // Science of the Total Environment. – 2017. – V. 605–606. – P. 172–179.
- Suburban air quality: Human health hazard assessment of potentially toxic elements in PM10 / L. Megido, B. Suarez-Pena, L. Negral, L. Castrillon, Y. Fernandez-Nava // Chemosphere. – 2017. – V. 177. – P. 284–291.
- Contamination and health risks of heavy metals in street dust from a coal-mining city in eastern China / Z. Tang, M. Chai, J. Cheng, J. Jin, Y. Yang, Z. Nie, Q. Huang, Y. Li // Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2017. – V. 138. – P. 83–91.

8. Bari M.A., Kindzierski W.B. Concentrations, sources and human health risk of inhalation exposure to air toxics in Edmonton, Canada // *Chemosphere*. – 2017. – V. 173. – P. 160–171.
9. Characteristics, Sources and Health Risk Assessment of Trace Metals in PM10 in Panzhihua, China / X. Cheng, Y. Huang, Z. Long, S. Ni, Z. Shi, C. Zhang // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2017. – V. 98. – № 1. – P. 76–83.
10. Assessment of pollution levels and human health risk of heavy metals in dust deposited on Yerevan's tree leaves (Armenia) / N. Maghakyan, G. Tepanosyan, O. Belyaeva, L. Sahakyan, A. Saghatelyan // *Acta Geochimica*. – 2017. – V. 36. – № 1. – P. 16–26.
11. Study on particulate matter air pollution, source origin, and human health risk based of PM10 metal content in Volos City, Greece / C. Emmanouil, E. Drositi, V. Vasilatou, E. Diapouli, K. Krikonis, K. Eleftheriadis, A. Kungolos // *Toxicological and Environmental Chemistry*. – 2017. – V. 99. – № 4. – P. 691–709.
12. Assessment of heavy metals pollution and its health risk of atmospheric dust fall from east part of Junggar Basin in Xinjiang / C. Yang, T. Tiyip, Y.-J. Hou, Y.-X. Gao, F. Liu, N. Xia // *Huanjing Kexue (Environmental Science)*. – 2016. – V. 37. – № 7. – P. 2453–2461.
13. Li K., Liang T., Wang L. Risk assessment of atmospheric heavy metals exposure in Baotou, a typical industrial city in northern China // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2016. – V. 38. – № 3. – P. 843–853.
14. Human Exposure Risks for Metals in Soil Near a Coal-Fired Power-Generating Plant / J. George, R.E. Masto, L.C. Ram, T.B. Das, T.K. Rout, M. Mohan // *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2015. – V. 68. – № 3. – P. 451–461.
15. Nadal M., Schuhmacher M., Domingo J.L. Probabilistic human health risk of PCDD/F exposure: a socioeconomic assessment // *Journal of Environmental Monitoring*. – 2004. – № 6. – P. 926–931.
16. Основы оценки риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду / Г.Г. Онищенко, С.М. Новиков, Ю.А. Рахманин, С.Л. Авалиани, К.А. Буштуева. – М.: НИИ ЭЧ и ГОС, 2002. – 408 с.
17. Майорова О.А. Геохимический подход к оценке экологического риска: дис... канд. геол.-минерал. наук. – М., 2002. – 110 с.
18. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду / Ю.А. Рахманин, С.М. Новиков, Т.А. Шашина, С. Иванов. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. – 143 с.
19. Te Winkel H. Environmental and health aspects of ashes produced at co-combustion of biomass // *WOCA Conference 3rd World of Coal Ash*. – Lexington, 2009. – Cod 79062.
20. Ревич Б.А. К оценке влияния деятельности ТЭК на качество окружающей среды и здоровье населения // *Проблемы прогнозирования*. – 2010. – № 4. – С. 87–99.
21. Захаренков В.В., Кислицына В.В. Определение приоритетности природоохранных мероприятий на основе оценки риска для здоровья населения промышленного города // *Успехи современного естествознания*. – 2014. – № 2. – С. 12–15.
22. Волкотруб Л.П., Чемерис Т.В. Эпидемиология злокачественных новообразований в г. Томске // *Сибирский медицинский журнал*. – 2002. – № 1–2. – С. 65–68.
23. Атмосферные загрязнения Томска и их влияние на здоровье населения / А.И. Воробьева, М.А. Медведев, Л.П. Волкотруб, М.В. Васильева. – Томск: Изд-во Томского. ун-та, 1992. – 192 с.
24. Экспериментальные и численные исследования длительного загрязнения снегового покрова ураном и торием в окрестностях теплоэлектростанции (на примере томской ГРЭС-2) / А.В. Таловская, В.Ф. Рапута, Е.А. Филимоненко, Е.Г. Язиков // *Оптика атмосферы и океана*. – 2013. – Т. 26. – № 8. – С. 642–646.
25. Филимоненко Е.А., Таловская А.В., Язиков Е.Г. Особенности вещественного состава пылевых атмосферных выпадений в зоне воздействия предприятия топливно-энергетического комплекса (на примере Томской ГРЭС-2) // *Оптика атмосферы и океана*. – 2012. – Т. 25. – № 10. – С. 896–901.
26. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Томской области в 2015 году» / глав. ред. С.Я. Трапезников, редкол.: Ю.В. Лунева, Н.А. Чатурова. – Томск: Дельта-план, 2016. – 156 с.
27. Ардаков Г.Н. Использование снежного покрова в городах для оценки их влияния на окружающую природную среду: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Самара, 2004. – 21 с.
28. Davidson C.I., Elias R.W. Dry Deposition and Resuspension of Trace-Elements in the Remote High Sierra // *Geophysical Research Letters*. – 1982. – V. 9. – P. 91–93.
29. Боев В.М., Верещагин Н.Н., Дунаев В.Н. Определение атмосферных загрязнений по результатам исследований снегового покрова // *Гигиена и санитария*. – 2003. – № 5. – С. 69–71.
30. Артамонова С.Ю. Химический и фазовый состав техногенных аэрозолей в районе Сибирского химического комбината (Томская обл.) // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2014. – Т. 22. – № 3. – С. 229–240.
31. Экспериментальные и численные исследования загрязнения снежного покрова г. Новосибирска в окрестностях тепловых электростанций / В.Ф. Рапута, А.А. Леженин, Т.В. Ярославцева, А.Ю. Девятова // *Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле*. – 2015. – Т. 12. – С. 77–93.
32. Пространственное распределение химических элементов атмосферных выбросов угольной ТЭЦ / Н.К. Рыжакова, В.Ф. Рапута, Н.С. Рогова, А.Л. Борисенко, Е.А. Покровская // *Экология и промышленность России*. – 2013. – № 1. – С. 52–55.
33. Методы анализа данных загрязнения снегового покрова в зонах влияния промышленных предприятий (на примере г. Новосибирск) / С.Б. Бортникова, В.Ф. Рапута, А.Ю. Девятова, Ф.Н. Юдахин // *Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геоэкология*. – 2009. – № 6. – С. 515–525.
34. Таловская А.В., Филимоненко Е.А., Язиков Е.Г. Динамика элементного состава снегового покрова на территории северо-восточной зоны влияния Томск-Северской промышленной агломерации // *Оптика атмосферы и океана*. – 2014. – Т. 27. – № 6. – С. 491–495.
35. Jacob D.J. Introduction to atmospheric chemistry. – Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1999. – 280 p.
36. Azimi S., Ludwig A., Thévenot D.R. Trace metal determination in total atmospheric deposition in rural and urban areas // *Science of The Total Environment*. – 1999. – V. 308 – P. 247–256.
37. Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. – Л.: ЛГУ, 1982. – 365 с.
38. In-stack emissions of heavy metals estimated by moss biomonitoring method and snow-pack analysis / D. Ceburnis, J. Sakalys, K. Armolaitis, D. Valiulis, K. Kvietkus // *Atmospheric Environment*. – 2002. – V. 36. – № 9. – P. 1465–1474.
39. Шагилов А.Ю. Вещественный состав и геохимическая характеристика атмосферных выпадений на территории Обского бассейна: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2001. – 24 с.
40. Савичев О.Г., Иванов А.О. Атмосферные выпадения в бассейне средней Оби и их влияние на гидрохимический сток рек // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. – 2010. – № 1. – С. 63–70.
41. Филимоненко Е.А. Эколого-геохимическая обстановка в районах расположения объектов теплоэнергетики по данным изучения нерастворимой и растворимой фаз снега (на примере Томской области): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2015. – 21 с.

42. Разработка и апробация локальной модели выпадения загрязняющих веществ промышленного происхождения из атмосферы на подстилающую поверхность / А.А. Быков, Е.Л. Счастливцев, С.Г. Пушкин, М.Ю. Климович // Химия в интересах устойчивого развития. – 2002. – Т. 10. – № 5. – С. 563–574.
43. Методика расчета осредненных за длительный период концентраций выбрасываемых в атмосферу вредных веществ (дополнение к ОНД-86). – СПб.: ГТО им. А.И. Воейкова, 2005. – 17 с.
44. Geochemical approach to human health risk assessment of inhaled trace elements in the vicinity of industrial enterprises in Tomsk, Russia / N.A. Osipova, K.A. Filimonenko, A.V. Talovskaya, E.G. Yazikov // Human and Ecological Risk Assessment. – 2015. – V. 21. – № 6. – P. 1664–1685.
45. Способ определения загрязнённости снегового покрова техногенными компонентами: пат. № 2229737 Российская Федерация, № 2002127851; заявл. 17.10.2002; опубл. 27.05.2004.
46. Risk assessment guidance for Superfund: V. 1 – Human Health Evaluation Manual. P. A. Interim Final. – Washington, DC, USA: USEPA, 1989. – 192 p.
47. Health Effects Assessment Summary Tables (HEAST). – Washington, DC, USA: USEPA, 1997. – 241 p.
48. Guidelines for ecological assessment. EPA/630/R-95/002F. – Washington, DC, USA: USEPA. Office of Health and Environmental Assessment, 1998. – 162 p.
49. The Risk Assessment Information System. 2005. URL: <http://rais.ornl.gov/> (дата обращения 20.09.2017).
50. USEPA. 2007. Sources of chronic dose-response information. Table 1. Prioritized chronic dose-response values for screening risk assessments. URL: www.epa.gov/ttn/atw/toxsource/chronicsources.html (дата обращения 15.09.2017).
51. О введении в действие ГН 2.1.6.1338–03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест: Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 30.05.2003 N 114 (ред. от 30.08.2016) // Консультант Плюс – справочно-правовая система. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_42954/ (дата обращения 15.09.2017).
52. Михальчук А.А., Язиков Е.Г. Многомерный статистический анализ эколого-геохимических измерений. Ч. II. Компьютерный практикум. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 150 с.
53. Альмов В.Т., Тарасова Н.П. Техногенный риск: Анализ и оценка. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 113 с.
54. Dawoud E., Purucker S. Quantitative Uncertainty Analysis of Superfund Residential Risk Pathway Models for Soil and Groundwater. – USA: USEPA, 1996. – 256 p.
55. Осипова Н.А., Новиков С.А. Анализ неопределенности при оценке риска воздействия химических соединений на здоровье человека: св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016612688, лицензионное соглашение от 16.05.2016.
56. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Саев, Б.А. Ревич, Е.П. Янин и др. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
57. Минералогия пылевых аэрозолей в зоне воздействия промышленных предприятий г. Томска / Е.А. Филимоненко, А.В. Таловская, Е.Г. Язиков, Ю.В. Чумак, С.С. Ильенок // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 8-3. – С. 760–765.
58. Методические подходы к комплексной оценке экологического риска (с учетом различных уровней экосистемы) / Н.В. Ефимова, В.И. Гребенщикова, Г.А. Забуга, П.В. Кузнецов // Экологический риск: Материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием. – Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 1997. – С. 19–21.
59. Арбузов С.И. Металлоносность углей Сибири // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 77–83.
60. Волостнов А.В., Арбузов С.И. Токсичные элементы в углях Сибири // Энергетик. – 2011. – № 3. – С. 39–44.
61. Vejehati F., Xu Z., Gupta R. Trace elements in coal: Associations with coal and minerals and their behavior during coal utilization – a review // Fuel. – 2010. – № 4. – P. 904–911.
62. Влияние города Томска на химический и дисперсный состав атмосферного аэрозоля в приземном слое / В.Г. Аршинова, Б.Д. Белан, Т.М. Рассказчикова, Д.В. Симоненков // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 21. – № 6. – С. 486–491.

Поступила 23.10.2017 г.

Информация об авторах

Осипова Н.А., кандидат химических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Таловская А.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Филимоненко Е.А., кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Язиков Е.Г., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Новиков С.А., доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 551.578.46:504.4:622.333.012

ECOLOGICAL RISKS CAUSED BY TOXIC ELEMENTS IMPACT ON AMBIENT AIR DETERMINED IN THE STUDY OF THE SNOW COVER IN TOMSK GRES-2 AREA

Nina A. Osipova¹,
osipova@tpu.ru

Anna V. Talovskaya¹,
talovskaj@yandex.ru

Ekaterina A. Filimonenko¹,
filimonenko@tpu.ru

Egor G. Yazikov¹,
yazikoveg@tpu.ru

Sergey A. Novikov¹,
nsa@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is caused by the need of sustainable development of coal power. One of components to achieve this sustainability is the predictive assessment of the impact of solid emissions resulting from coal combustion, in transition of raw materials into digestible form, on the health of population in terms of increasing the share of coal generation in the fuel sector.

The main aim of the research is to determine the level of air pollution with solid emissions from thermal energy (Tomsk GRES-2), and to define the value of inhalation health risk based on the study of the snow cover.

Objects. To assess the environmental health risks on the territory of Tomsk the authors have selected the areas corresponding to the regions with the highest influx of anthropogenic dust particles in the impact zone of Tomsk GRES-2, as well as the area outside the impact zone of Tomsk GRES-2, to compare the results of the study.

Methods: atmogeochemical; risk assessment methods of chemical substances on human health; method for recovery of elemental concentrations in ambient air on the basis of their content in solid phase of snow cover; analysis of uncertainties in calculation of average daily doses using a random sampling of values with a certain distribution laws of the consider values.

Results. On the territory influenced by the GRES-2 the authors determined a high level of accumulation of Zn, Ba, W, Ni, V, Cu, Co in solid residue of snow relative to the background site that reflects the specificity of the effect of emissions of the considered power plant on the air. The greatest specific contribution to the integral level, non-cancer risks from chronic inhalation exposure of metals in the vicinity of the GRES-2 make Cu, Al, Mn, Ba and Zn. For all elements with carcinogenic properties, with the exception of Cr (VI), the values of the individual cancer risk is below 10^{-6} , which corresponds to a negligibly small level of risk. Individual carcinogenic risk caused by inhalation of Cr (VI) has values in the range from $7,65 \cdot 10^{-7}$ to $4,6 \cdot 10^{-5}$, and the values corresponding the upper boundary are considered according to the common methodology as a valid risk. The levels of risk from inhalation exposure of chemical elements in the zones of influence of Tomsk GRES-2, as well as the values of individual carcinogenic risk are acceptable.

Key words:

Solid snow residue, heavy metals, inhalation risk, carcinogenic risk, non-carcinogenic risk, thermal power plant.

The research was financially supported by the RFBR grant (no. 16–45–700184p_a). The research was carried out at national Research Tomsk Polytechnic University within the frame of the TPU Competitiveness Enhancement Program among the leading world research centers.

REFERENCES

1. Zorina T.G. Sustainable energy development: essence and methodological approaches to assessment. *Modern management technologies*, no. 1 (49), Article number: 4905. In Rus. Available at: <http://sovman.ru/article/4905/> (accessed 15 October 2017).
2. Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 goda [The energy strategy of Russia for the period up to 2030]. Available at: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (accessed 20 September 2017).
3. Yakutseni S.P. *Rasprostranennost uglevodorodnogo syrya, obogashchennogo tyazhelymi elementami-primesyami. Otsenka ekologicheskikh riskov* [Occurrence of hydrocarbon material enriched with heavy element-impurities. Assessment of ecological risks]. St-Petersburg, Nedra Publ., 2005. 372 p.
4. Epstein P.R., Buonocore J.J., Eckerle K., Hendryx M., Stout B.M., Heinberg R., Clapp R.W., May B., Reinhart N.L., Ahern M.M., Doshi S.K., Glustrom L. Full cost accounting for the life cycle of coal. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2011, vol. 1219, no. 1, pp. 73–98.
5. Wu D., Zhang F., Lou W., Li D., Chen J. Chemical characterization and toxicity assessment of fine particulate matters emitted from the combustion of petrol and diesel fuels. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 605–606, pp. 172–179.
6. Megido L., Suarez-Pena B., Negral L., Castrillon L., Fernandez-Nava Y. Suburban air quality: Human health hazard assessment of potentially toxic elements in PM10. *Chemosphere*, 2017, vol. 177, pp. 284–291.
7. Tang Z., Chai M., Cheng J., Jin J., Yang Y., Nie Z., Huang Q., Li Y. Contamination and health risks of heavy metals in street

- dust from a coal-mining city in eastern China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, vol. 138, pp. 83–91.
8. Bari M.A., Kindziński W.B. Concentrations, sources and human health risk of inhalation exposure to air toxics in Edmonton, Canada. *Chemosphere*, 2017, vol. 173, pp. 160–171.
 9. Cheng X., Huang Y., Long Z., Ni S., Shi Z., Zhang C. Characteristics, Sources and Health Risk Assessment of Trace Metals in PM10 in Panzhihua, China. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2017, vol. 98, no. 1, pp. 76–83.
 10. Maghakyan N., Tepanosyan G., Belyaeva O., Sahakyan L., Saghatlyan A. Assessment of pollution levels and human health risk of heavy metals in dust deposited on Yerevan's tree leaves (Armenia). *Acta Geochimica*, 2017, vol. 36, no. 1, pp. 16–26.
 11. Emmanouil C., Drositi E., Vasilatou V., Diapouli E., Krikonis K., Eleftheriadis K., Kungolos A. Study on particulate matter air pollution, source origin, and human health risk based of PM10 metal content in Volos City, Greece. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 2017, vol. 99, no. 4, pp. 691–709.
 12. Yang C., Tiyp T., Hou Y.-J., Gao Y.-X., Liu F., Xia N. Assessment of heavy metals pollution and its health risk of atmospheric dust fall from east part of Junggar Basin in Xinjiang. *Huanjing Kexue (Environmental Science)*, 2016, vol. 37, no 7, pp. 2453–2461.
 13. Li K., Liang T., Wang, L. Risk assessment of atmospheric heavy metals exposure in Baotou, a typical industrial city in northern China. *Environmental Geochemistry and Health*, 2016, vol. 38, no. 3, pp. 843–853.
 14. George J., Masto R.E., Ram L.C., Das T.B., Rout T.K., Mohan M. Human Exposure Risks for Metals in Soil Near a Coal-Fired Power-Generating Plant. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2015, vol. 68, no. 3, pp. 451–461.
 15. Nadal M., Schuhmacher M., Domingo J.L. Probabilistic human health risk of PCDD/F exposure: a socioeconomic assessment. *Journal of Environmental Monitoring*, 2004, no. 6, pp. 926–931.
 16. Onishchenko G.G., Novikov S.M., Rakhmanin Yu.A., Avaliani S.L., Bushutueva K.A. *Osnovy otsenki riska dlya zdorovya naseleniya pri vozdeystvii khimicheskikh veshchestv, zagryaznyayushchikh okruzhayushchuyu sredu* [Principles of risk assessment for public health at exposure of chemicals polluted the environment]. Moscow, NII ECH i GOS Publ., 2002. pp. 239–245.
 17. Mayorova O.A. *Geokhimicheskyy podkhod k otsenke ekologicheskogo riska*. Diss. Kand. nauk [Geochemical approach to environmental risk assessment. Cand. Diss.]. Moscow, 2002. 110 p.
 18. Rakhmanin Yu.A., Novikov S.M., Shashina T.A., Ivanov S. *Rukovodstvo po otsenke riska dlya zdorovya naseleniya pri vozdeystvii khimicheskikh veshchestv, zagryaznyayushchikh okruzhayushchuyu sredu* [The risk assessment guidance for public health when exposed to chemicals that pollute the environment]. Moscow, Federal center for sanitary inspection Ministry of health of Russia Publ., 2004. 143 p.
 19. Te Winkel H. Environmental and health aspects of ashes produced at co-combustion of biomass. *WOCA Conference 3rd World of Coal Ash*. Lexington, 2009. Cod 79062.
 20. Revich B.A. *K otsenke vliyaniya deyatelnosti TEK na kachestvo okruzhayushchey sredy i zdorovye naseleniya* [The impact of the energy sector on the environment quality assessment and population health]. *Studies on Russian Economic Development*, 2010, no. 4, pp. 87–99.
 21. Zakharenkov V.V., Kisilitsyna V.V. Prioritization of environmental measures based on risk assessment for the health of the population of an industrial city. *Advances in current natural sciences*, 2014, no. 2, pp. 12–15. In Rus.
 22. Volkotrub L.P., Chemeris T.V. Cancer epidemiology in Tomsk. *Siberian Medical Journal*, 2002, no. 1–2, pp. 65–68. In Rus.
 23. Vorobyeva A.I., Medvedev M.A., Volkotrub L.P., Vasilyeva M.V. *Atmosfernye zagryazneniya Tomsk i ikh vliyaniye na zdorovye naseleniya* [Atmospheric pollution in Tomsk and its impact on the health of population]. Tomsk, TSU Publ., 1992. 192 p.
 24. Talovskaya A.V., Raputa V.F., Filimonenko E.A., Yazikov E.G. Experimental and numerical studies of long-term snow cover pollution by uranium and thorium in the vicinity of thermal power plant (on the example of Tomsk hydroelectrostation-2). *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2013, vol. 26, no. 8, pp. 642–646. In Rus.
 25. Filimonenko E.A., Talovskaya A.V., Yazikov E.G. Mineralogy characteristic of dust aerosols in fuel and power supplying plant area (by the example of Tomsk GRES-2). *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2012, vol. 25, no. 10, pp. 896–901. In Rus.
 26. Trapeznikov S.Ya., Luneva Yu.V., Chaturova N.A. *Gosudarstvenny doklad «O sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy Tomskoy oblasti v 2015 godu»* [State report «On the state and environmental protection of the Tomsk region in 2015»]. Tomsk, Deltaplan Publ., 2016. 156 p.
 27. Ardakov G.N. *Ispolzovanie snezhnogo pokrova v gorodakh dlya otsenki ikh vliyaniya na okruzhayushchuyu prirodnyuyu sredu*. Avtorefat Kand. nauk [The use of snow cover in cities for estimation of their impact on the environment. Cand. Diss. Abstract]. Samara, 2004. 21 p.
 28. Davidson C.I., Elias R.W. Dry Deposition and Resuspension of Trace-Elements in the Remote High Sierra. *Geophysical Research Letters*, 1982, vol. 9, pp. 91–93.
 29. Boyev V.M., Vereshchagin N.N., Dunaev V.N. Determination of ambient pollutions by the results of study of the snow cover. *Hygiene and sanitation*, 2003, no. 5, pp. 69–71. In Rus.
 30. Artamonova S.Yu. Chemical and Phase Composition of Technogenic Aerosol in the Region of Siberian Chemical Plant (Tomsk Region). *Chemistry for Sustainable Development*, 2014, vol. 22, no 3, pp. 229–240. In Rus.
 31. Raputa V.F., Lezhenin A.A., Yaroslavtseva T.V., Devyatova A.Yu. Measurements and Numerical Studies of Snow Cover Pollution near Thermal Power Stations in the City of Novosibirsk. *The Bulletin of Irkutsk State University. Earth Sciences*, 2015, vol. 12, pp. 77–93. In Rus.
 32. Ryzhakova N.K., Raputa V.F., Rogova N.S., Borisenko A.L., Pokrovskaya E.A. Spatial distribution of chemical elements in air emissions of coal CHP. *Ecology and industry of Russia*, 2013, no. 1, pp. 52–55. In Rus.
 33. Bortnikova S.B., Raputa V.F., Devyatova A.Yu., Yudakhin F.N. Methods of analyzing data on the snow cover contamination in the areas affected by industrial enterprises (by the example of Novosibirsk). *Environmental Geoscience*, 2009, no. 6, pp. 515–525. In Rus.
 34. Talovskaya A.V., Filimonenko E.A., Yazikov E.G. Dynamics of the elemental composition of the snow cover in the north-eastern zone of influence of Tomsk-Seversk industrial agglomeration. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2014, vol. 27, no. 6, pp. 491–495. In Rus.
 35. Jacob D.J. Introduction to atmospheric chemistry, Princeton, N.J., Princeton University Press, 1999. 280 p.
 36. Azimi S., Ludwig A., Thévenot D.R. Trace metal determination in total atmospheric deposition in rural and urban areas. *Science of the Total Environment*, 1999, vol. 308, pp. 247–256.
 37. Ivlev L.S. *Khimicheskyy sostav i struktura atmosfernykh aerozoley* [Chemical composition and structure of atmospheric aerosols]. Leningrad, LGU Publ., 1982. 365 p.
 38. Ceburnis D., Sakalys, J., Armolaitis K., Valiulis D., Kvietkus K. In-stack emissions of heavy metals estimated by moss biomonitoring method and snow-pack analysis. *Atmospheric Environment*, 2002, vol. 36, no. 9, pp. 1465–1474.
 39. Shatilov A.Yu. *Veshchestvennyy sostav i geokhimicheskaya kharakteristika atmosfernykh vypadeniy na territorii Obskogo basseyna*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Composition and geochemical characteristics of atmospheric sediments in the territory of Ob basin. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2001. 24 p.
 40. Savichev O.G., Ivanov A.O. Atmospheric depositions in the middle Ob basin and their impact on hydrochemical river flow. *Russian*

- Academy of Sciences. Geographic series*, 2010, no. 1, pp. 63–70. In Rus.
41. Filimonenko E.A. *Ekologo-geokhimicheskaya obstanovka v rayonakh raspolozheniya obyektov teploenergetiki po dannym izucheniya nerastvorimoy i rastvorimoy faz snega (na primere Tomskoy oblasti)*. Avtoreferat Kand. Dis. [Ecological and geochemical situation in the areas of thermal engineering objects location by the data of studying soluble and insoluble snow phases. Cand. Diss Abstract]. Tomsk, 2015. 21 p.
 42. Bykov A.A., Schastlivtsev E.L., Pushkin S.G., Klimovich M.Yu. Razrabotka i aprobatsiya lokalnoy modeli vypadeniya zagryaznyayushchikh veshchestv promyshlennogo proiskhozhdeniya iz atmosfery na podstilayushchuyu poverkhnost [Development and testing the local model of human-made pollutant fallout from atmosphere to the substrate]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2002, vol. 10, no. 5, pp. 563–574.
 43. *Metodika rascheta osrednennykh za dlitelny period kontsentratsiy vybrasyvaemykh v atmosferu vrednykh veshchestv (dopolnenie k OND-86)* [Technique for calculating the average concentrations of contaminant injected into atmosphere for a long period (supplement to OND-86)]. St-Petersburg, GGO im. A.I. Voeykova, 2005. 17 p.
 44. Osipova N.A., Filimonenko K.A., Talovskaya A.V., Yazikov E.G. Geochemical approach to human health risk assessment of inhaled trace elements in the vicinity of industrial enterprises in Tomsk, Russia. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2015, vol. 21, no. 6, pp. 1664–1685.
 45. Yazikov E.G., Shatilov A.Yu., Talovskaya A.V. *Sposob opredeleniya zagryaznenosti snegovogo pokrova tekhnogennymi komponentami* [Method for determining snow cover pollution with man-made components]. Patent RF, no. 2229737, 2004.
 46. *Risk assessment guidance for Superfund*: Vol. 1. Human Health Evaluation Manual. P. A. Interim Final. Washington, DC, USA, USEPA, 1989. 192 p.
 47. *Health Effects Assessment Summary Tables (HEAST)*. Washington, DC, USA, USEPA, 1997. 241 p.
 48. *Guidelines for ecological assessment*. EPA/630/R-95/002F. Washington, DC, USA, USEPA, 1998. 162 p.
 49. *The Risk Assessment Information System*. 2005. Available at: <http://rais.ornl.gov/> (accessed 20 September 2017).
 50. USEPA. 2007. Sources of chronic dose-response information. Table 1. Prioritized chronic dose-response values for screening risk assessments. Available at: www.epa.gov/ttn/atw/toxsource/chronicsources.html (accessed 15 September 2017).
 51. *O vvedenii v deystvie GN 2.1.6.1338-03 Predelno dopustimye kontsentratsii (PDK) zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosfere vozdukhe naseleennykh mest: Postanovlenie Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 30.05.2003 N 114 (red. ot 30.08.2016)* [GN 2.1.6.1338-03 Maximum permissible concentration (MPC) of polluting substances in atmospheric air of populated areas]. Consultant Plus. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_42954/ (accessed 15 September 2017).
 52. Mihalchuk A.A., Yazikov E.G. *Mnogomerny statistichesky analiz ekologo-geokhimicheskikh izmereniy. Ch. II. Kompyuterny praktikum* [Multivariate statistical analysis of environmental geochemical measurements. P. II. Computer workshop]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2014. 150 p.
 53. Alymov V.T., Tarasova N.P. *Tekhnogenny risk: Analiz i otsenka* [Technogenic risk: Analysis and assessment]. Moscow, Akademik Publ., 2004. 113 p.
 54. Dawoud E., Purucker S. *Quantitative Uncertainty Analysis of Superfund Residential Risk Pathway Models for Soil and Groundwater*. USA, USEPA, 1996. 256 p.
 55. Osipova N.A., Novikov S.A. Analiz neopredelenosti pri otsenke riska vozdeystviya khimicheskikh soedineniy na zdorove cheloveka [Uncertainty analysis in the risk assessment of the effects of chemicals on human health]. *Certificate of state registration of computer programs no. 2016612688 license agreement, 16.05.2016*.
 56. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Geochemistry of the environment]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p.
 57. Filimonenko E.A., Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Chumak Yu.V., Ilenok S.S. Mineral composition of solid aerosols particles in impact zones of Tomsk's industrial enterprises. *Fundamental research*, 2013, no. 8–3, pp. 760–765. In Rus.
 58. Efimova N.V., Grebenshchikova V.I., Zabuga G.A., Kuznetsov P.V. Metodicheskie podkhody k kompleksnoy otsenke ekologicheskogo riska (s ucheto razlichnykh urovney ekosistemy) [Methodical approaches to complex environmental risk assessment (taking into account the different elements of the ecosystem)]. *Ekologichesky risk. Materialy IV Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Ecological Risk. Proc. of the fourth All-Russian scientific conference with international participation]. Irkutsk, V.B. Sochavy Institut of Geography SO RAN, 1997. pp. 19–21.
 59. Arbutov S.I. Metalbearing ability of Siberian coals. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 1, pp. 77–83. In Rus.
 60. Volostnov A.V., Arbutov S.I. Toksichnye elementy v uglyakh Sibiri [Toxic elements in coals of Siberia]. *Energetik*, 2011, no. 3, pp. 39–44.
 61. Vejahati F., Xu Z., Gupta R. Trace elements in coal: Associations with coal and minerals and their behavior during coal utilization – a review. *Fuel*, 2010, no. 4, pp. 904–911.
 62. Arshinova V.G., Belan B.D., Rasskazchikova T.M., Simonenkov D.V. Influence of the Tomsk city on the chemical and disperse composition of the surface aerosol. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2008, vol. 21, no. 6, pp. 486–491. In Rus.

Received: 23 October 2017.

Information about the authors

Nina A. Osipova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Anna V. Talovskaya, Cand. Sc., National Research associate professor, Tomsk Polytechnic University.

Ekaterina A. Filimonenko, Cand. Sc., National Research assistant, Tomsk Polytechnic University.

Egor G. Yazikov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sergey A. Novikov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.