

ТЕХНОЛОГИЯ КАРТИРОВАНИЯ РИСКОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРЕДПРИЯТИЯМИ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА АЛМАТЫ



¹Э.А. Закарин, ¹Т.В. Дедова, ¹Л.А. Балакай, ¹К.А. Бостанбеков

¹ТОО "EcoRisk", Алматы, Республика Казахстан

Рассмотрена технология картирования экологических рисков при переносе и трансформации загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу города стационарными источниками. Технология реализована на примере загрязнения воздушного бассейна города Алматы диоксидом серы SO_2 предприятиями теплоэнергетики. Расчеты выполнены с помощью модели WRF-Chem, предварительно настроенной на условия атмосферы города путем параметризации микрофизических процессов и сопоставления с данными наблюдений на метеостанциях города и окрестностей. Построены карты риска на основе множества концентраций примеси для различных метеоситуаций. При этом использованы следующие меры риска: математическое ожидание с исключением маловероятных (менее 1%) всплесков высоких концентраций и повторяемость случаев превышения максимально разовой ПДК. Технология может служить основой информационно-аналитической системы решения различных задач по размещению предприятий и анализу планов воздухоохраных мероприятий.

Ключевые слова: экологические риски, воздушный бассейн, модель WRF-Chem, воздухоохраные мероприятия

Статья поступила в редакцию 13.11.2020, доработана 13.01.2021, принята к публикации 20.01.2021

The Technology of Mapping the Risks of Atmospheric Pollution by Heat and Power Enterprises on the Example of the City of Almaty

¹E.A. Zakarin, ¹T.V. Dedova, ¹L.A. Balakay, ¹K.A. Bostanbekov

¹"EcoRisk" LLP, 050026 Almaty, Republic of Kazakhstan

The technology of mapping of environmental risks during the transfer and transformation of pollutants emitted into the atmosphere of the city by stationary facilities is considered. The technology is implemented on the example of the pollution of the air basin of the city of Almaty with sulfur dioxide SO_2 by heat power enterprises. The calculations were made using the WRF-Chem model, previously adjusted to the city atmosphere by parametrizing of microphysical processes and comparing them with observational data at meteorological stations in the city and the surrounding area. Risk maps were constructed according to a variety of impurity concentrations for various meteorological conditions. The following risk measures were used: the mathematical expectation with the exclusion of unlikely bursts of high concentrations (less than 1%) and the recurrence of cases of exceeding of the maximum one-time MPC. The technology can serve as the basis of an information and analytical system for solving of various tasks concerning location of enterprises and the analysis of plans for air protection measures.

Keywords: environmental risks, air basin, WRF-Chem model, air protection measures

Received 13.11.2020, revised 13.01.2021, accepted for publication 20.01.2021

DOI: 10.18412/1816-0395-2021-4-21-27

Оценка экологических рисков является первоочередной и очень сложной задачей в охране окружающей среды. Многообразие видов человеческой деятельности и стохастический характер реакции природной среды относит риск-задачи к классу сверхсложных. Особенно сильно стохастичность проявляется в подвижных средах — в воздухе и воде. Здесь очень важно вы-

явить неслучайные характеристики случайных процессов и использовать эти характеристики для определения подходящей меры риска. Такой вероятностный подход связан с большим объемом вычислений с использованием суперкомпьютеров и сложных моделей численного решения динамических уравнений переноса, рассеяния и трансформации загрязняющих веществ.

Необходимость решения практических задач выдвинула на первый план методы (модели), в основе которых лежат приблизительные оценки возможного загрязнения природной среды и влияния на животный и растительный мир [1]. Все рассмотренные модели используют самые простые и приблизительные оценки, не учитывающие основные источники неопределенностей. К примеру,

при расчете переноса и рассеяния загрязняющих веществ используется модель AERMOD [2] агентства по охране окружающей среды США (US EPA). Эта модель основана на гауссовой формуле шлейфа загрязняющих атмосферу веществ и справедлива только в условиях постоянного в пространстве и во времени поля ветра. В России сертифицирована риск-модель [3], использующая упрощенную методику расчета загрязнения атмосферы.

В настоящее время возникли условия для использования сложных вероятностных методов расчета риск-задач. Во-первых, благодаря облачным технологиям значительно облегчился доступ к мощной вычислительной технике, во-вторых, разработаны эффективные модели переноса и химической трансформации загрязняющих веществ в атмосфере [4] и водной среде [5].

В данной работе излагается технология рискового картирования загрязнения атмосферы на примере воздушного бассейна г. Алматы — крупнейшего мегаполиса Республики Казахстан с населением более 1,9 млн человек и площадью 682 км². Расположение в предгорной котловине Зайлийского Алатау, где с высокой повторяемостью наблюдаются застойные метеорологические ситуации, делает атмосферу города экологически неблагоприятной. Это связано с тем, что скорости ветра близки к штилевым и колеблются в пределах от 1 до 2 м/с. Ветровой режим г. Алматы включает в себя горно-долинную циркуляцию (ГДЦ), течения вокруг городского острова тепла, температурную инверсию и другие процессы. Но, к сожалению, местные ветры в полной мере не выносят загрязняющие вещества за границу воздушного бассейна города, что способствует его сильному загрязнению и образованию смога.

Немалый вклад в общий объем выбросов вносят предприятия теплоэнергетики города, работающие на угле. Эти

предприятия загрязняют атмосферу большим количеством вредных веществ, среди которых весьма токсичным является диоксид серы SO₂ (III класс опасности), что определяет актуальность задачи, поставленной в данной работе.

Основная особенность проблемы оценки рисков при загрязнении атмосферы — это возникновение цепочки неопределенностей. Во-первых, неопределенность, связанная с количеством, составом и временем выбросов загрязняющих веществ. Во-вторых, генератором неопределенности является стохастический характер атмосферных процессов переноса выбрасываемых примесей. В-третьих, неопределенностью являются результаты воздействия загрязняющих веществ и продуктов их химической трансформации на биологические сообщества и, особенно, на человека. Общий вероятностный подход к решению подобной задачи в случае аварийного загрязнения природной среды изложен в работе [6]. Опираясь на указанную работу, в настоящей статье рассматривается задача загрязнения атмосферы, причем учитывается стохастичность атмосферных процессов и их влияние на риски переноса и рассеяния выбросов загрязняющих веществ предприятий теплоэнергетики. В последующих работах авторы планируют учесть неопределенность чувствительности населения города к загрязнению атмосферы и отработать технологию картирования рисков вредного воздействия на здоровье человека.

В основе вероятностной модели лежит множество полей загрязнения атмосферы, полученное путем решения серии прямых задач. При этом принято, что генератором неопределенности является стохастичность атмосферы, что достигается путем перебора различных метеоситуаций. Для решения прямых задач использовалась модель Weather Research Forecasting с блоком Chemistry (WRF-Chem) [7], инструментарий которой

позволяет осуществлять поэтапное нацеливание на выбранную территорию (downscaling), проводить параметризацию физических и микрофизических процессов (турбулентности, радиации, приземного слоя и др.), а также учитывать химическую трансформацию загрязняющих веществ с использованием различных механизмов фотохимических реакций.

В основу методики положена стохастическая модель, расчетный алгоритм которой обобщенно состоит из трех основных этапов [8]:

- формирование множества возможных значений концентрации выбранного ингредиента путем моделирования переноса и трансформации этого загрязняющего вещества для различных метеоситуаций;
- выбор меры риска загрязнения атмосферы и расчет этой характеристики в каждой ячейке вычислительной сетки;
- формирование карты риска, объединяющей результаты расчетов в ячейках в единый массив с выделением зон разной степени риска.

Технология рискового картирования загрязнения атмосферы

Технология построения карт риска, предлагаемая в данной работе, приведена в виде схемы вычислительного комплекса (рис. 1). Расчет по этой схеме включает следующие этапы: 1 — формирование входных данных, включая набор параметризаций; 2 — расчет полей метеозадач с детализацией до локального масштаба и множества концентраций загрязняющего вещества при различных метеоситуациях; 3 — выбор меры риска и построение карты риска. Цепочку расчетов полей загрязнений для каждой метеоситуации выполняет модель WRF-Chem. На последнем этапе используется стохастическая (риск) модель. Рассмотрим последовательно основные этапы вычислительного комплекса.

На первом этапе формируются входные данные модели

WRF-Chem. Это данные о подстилающей поверхности (землепользование, рельеф местности, источники выбросов). Источниками информации являлись геоинформационные данные и данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Слой землепользования формировался согласно стандартному набору USGS (United States Geological Survey) (24 категории), который был дополнен категориями городской застройки. Трехмерная модель рельефа была построена с использованием продукта Aster GDEM на основе данных сенсора ASTER спутника Terra.

Согласно алгоритму, принятому в модели WRF-Chem, расчеты были выполнены на трех вложенных вычислительных сетках с нацеливанием на г. Алматы и его окрестности. Сетки имели пространственное разрешение 9, 3 и 1 км по горизонтали и 38 уровней по вертикали со сгущением в нижнем 200-метровом слое. Краевые условия на свободных границах задавались на основе метеополей GFS [9], полученных методом реанализа.

В список входных данных включены параметры настройки на физических и химических процессах, наиболее характерные для данного района. Модель WRF-Chem предоставляет большой набор методов параметризации, описывающих турбулентность, солнечную радиацию, конвекцию и другие локальные закономерности атмосферы и подстилающей поверхности, а также возможность выбора механизма химических реакций в атмосфере.

На следующем этапе были выполнены расчеты полей метеоэлементов и загрязнения атмосферы с помощью модели WRF-Chem. Вычисления выполнялись многократно в соответствии с количеством метеоситуаций. На рис. 1 они условно изображены в виде параллельных стрелок. В результате этих расчетов формируется пакет полей метеоэлементов, который используется для сопоставления с данными природных

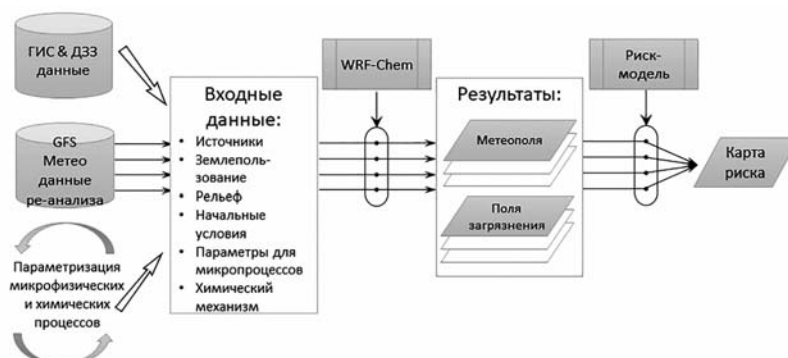


Рис. 1. Схема вычислительного комплекса рискового картирования
Fig. 1. Scheme of the risk mapping computational complex

наблюдений на метеостанциях, и множество полей загрязнения атмосферы, необходимых для решения риск-задачи.

На последнем этапе по алгоритму стохастической модели [6] выполнялись расчеты математического ожидания, дисперсии или другой меры риска в каждой ячейке приземного слоя вычислительной сетки и далее все ячейки объединялись в итоговую карту риска.

Формирование пакета метеоситуаций

Принцип отбора метеоситуаций зависит от постановки задачи. Например, в случае анализа рисков загрязнения атмосферы в экстремальных условиях необходимо проанализировать многолетний ряд синоптических карт и выбрать периоды малоподвижной атмосферы. Осредненные риски можно рассчитать, если использовать непрерывные периоды, охватывающие всевозможные ситуации. При этом следует помнить, что при численном решении метеорологических задач со

временем накапливаются ошибки аппроксимации, поэтому расчетный период не должен превышать 5–7 дней. К примеру, в работе [10] годовой статистический анализ выполняется на отрезках в 7 дней.

В данной работе пакет метеоситуаций был сформирован с использованием данных за ноябрь месяц четырехлетнего периода 2016–2019 гг., когда предприятия теплоэнергетики работали на полную мощность. Этот период разбили на недельные отрезки, начиная с 1 ноября каждого года, но сам расчет каждой недели начинали на сутки раньше, отводя эти сутки на "разогрев" модели. Предположим, что вредное воздействие загрязнения атмосферы может проявиться при получасовой экспозиции, т.е. при расчете рисков будем использовать поля концентраций, полученные в конце каждого получасового отрезка. При таком подходе множество концентраций в каждой ячейке вычислительной сетки составит статистически значимое количество.

Вариант конфигурации параметров WRF-Chem [12, 13] WRF-Chem parameter configuration option [12, 13]

Параметр	Описание
Микрофизика облаков	Шестикомпонентная спектральная модель
Коротковолновая и длинноволновая радиация	Модифицированная параметризация Млоуера
Приземный слой	Теория подобия Монино-Обухова
Пограничный слой	Параметризация Божул-Лакаре
Конвекция	Параметризация Каина-Фритша
Городской полог	Многоуровневая модель городского полога (BEP – Building Environment Parameterization)
Турбулентность	2D Смагоринский (только горизонт. диффузия)
Химический механизм	RADM2 (Regional Acid Deposition Model, 2nd generation)

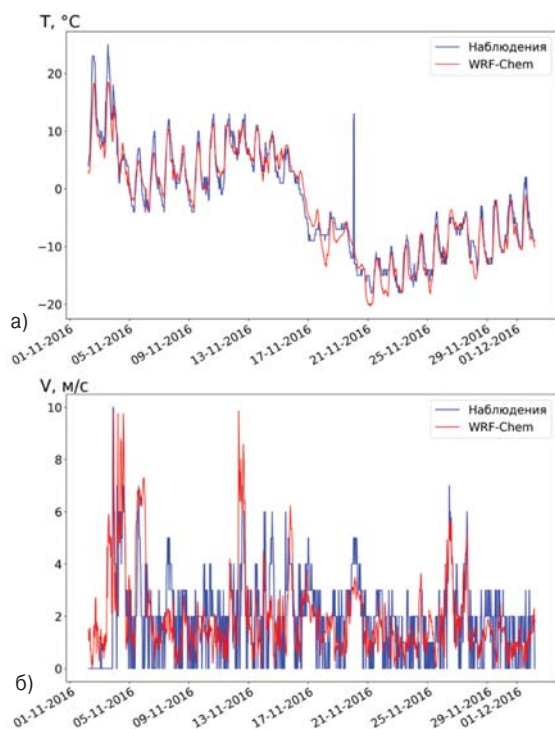


Рис. 2. Динамика изменения температуры (а) и скорости ветра (б) с 02.11.2016 по 02.12.2016 в районе метеостанции Аэропорт
Fig. 2. Dynamics of changes in temperature (a) and wind speed (b) from 02.11.2016 to 02.12.2016 in the Airport meteorological station area

Решение прямых задач лежит в основе описываемого метода, и важно подобрать для WRF-Chem такую конфигурацию методов параметризации, которая по возможности минимизирует погрешности расчетов. С этой целью было проведено более 80 тестовых расчетов и осуществлен отбор по мини-

мальным значениям средней, абсолютной и среднеквадратичной погрешности для данных по температуре, скорости и направлению ветра. В таблице приведен выбранный вариант конфигурации основных методов параметризации и механизма фотохимических реакций. Однако нельзя утверждать, что выбранный вариант является самым оптимальным, поскольку наличие городской застройки и сильно пересеченной местности в окрестностях города Алматы значительно усложняет задачу. Вероятно, более мелкое дробление сетки и/или применение специализированных методов (например, модели CIM [11]) позволит уменьшить погрешности расчетов.

Ниже проведено сравнение модельных данных и результатов метеорологических наблюдений, содержащихся в базе данных [14]. Для детального сравнения были выбраны данные наблюдений на метеостанции Аэропорт, где измерения выполняются более часто (через каждые полчаса, а не через 3 ч, как на других метеостанциях) и они не искажаются в результате влияния плотной городской застройки (рис. 2).

Результаты сравнительного анализа показывают, что модельные расчеты качественно верно отражают основные закономерности метеорологических

процессов. Например, рис. 2, а, где приведено изменение температуры за ноябрь 2016 г., показывает, что результаты расчетов хорошо улавливают дневные и ночные изменения температуры, а также вторжения теплого и холодного воздуха при смене синоптической ситуации. При этом погрешность расчетов лежит в пределах 2–3 °С, если не принимать во внимание явные ошибки в данных наблюдениях. Расчеты скорости ветра (рис. 2, б) так же, как и измерения характеризуют ветер как слабый, порывистый с резким усилением с приходом циклонов. К сожалению, используемые анемометры плохо приспособлены к измерениям малых скоростей ветра и данные наблюдений округляются до целочисленных значений, что увеличивает разброс между измеренными и модельными величинами.

Важное значение для данной задачи имеет статистический анализ повторяемости отклонения (bias) результатов расчета от наблюдений. На рис. 3 приведена гистограмма отклонения рассчитанной скорости ветра от наблюдаемой. При этом результаты расчета были округлены до целочисленных значений подобно данным метеонаблюдений. Из рисунка видно, что основная масса результатов расчета соответствует натурным наблюдениям, но имеются отклонения результатов моделирования в сторону больших скоростей (правый участок гистограммы).

Статистику направлений скорости ветра характеризуют диаграммы "Роза ветров", которые приведены на рис. 4. Диаграмма, построенная по данным наблюдений метеостанции Аэропорт, показана на рис. 4, а, а на рис. 4, б — по результатам расчета (диаграммы созданы по данным за ноябрь месяц 2016–2019 гг.). Как видно из рис. 4, можно выделить два типа течений — это, в основном, региональный западный ветер со скоростями выше 3–4 м/с и слабый (1–2 м/с) местный горный ветер южного направления.

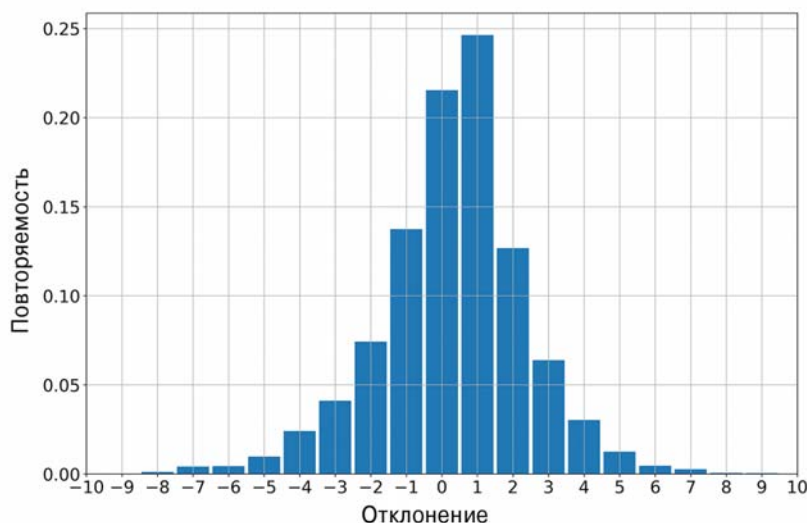


Рис. 3. Гистограмма частоты отклонения расчетной скорости ветра от наблюдаемой
Fig. 3. Histogram of the rated wind speed frequency deviation from the observed one

Расчеты также выделяют эти два ветровых режима, но имеются различия по преимущественному направлению. Региональный ветер дует с ЗЮЗ, а горный — преимущественно с юго-запада. Вероятно, для сильно пересеченной местности необходима более густая расчетная сетка, точнее учитывающая речные долины, где формируются достигающие аэропорта ночные потоки холодного воздуха.

Таким образом, статистически значимый набор метеоситуаций, полученный с помощью модели WRF-Chem, удовлетворительно описывает метеорологические процессы и может быть использован в качестве генератора случайных процессов. Вносимые погрешности можно уменьшить, более точно учитывая влияние пересеченной местности, городской застройки и микрофизических процессов.

Картирование рисков загрязнения атмосферы

Задачу риска загрязнения атмосферы рассмотрим на конкретном примере выбросов диоксида серы SO_2 предприятиями теплоэнергетики. Воспользуемся информацией о расположении предприятий, высоте труб и мощности выбросов, приведенной в проекте предельно допустимых выбросов (ПДВ). Из рассмотрения исключим ТЭЦ-1, которая к настоящему времени переведена на газ и выброс SO_2 при этом существенно сократился.

Ключевой вопрос во всех задачах риск-анализа — это выбор меры риска, т.е. параметра, характеризующего возможные негативные последствия принятых решений. При вероятностном подходе стоит вопрос о подборе неслучайной характеристики, которая с возможной точностью предсказала бы степень риска и указала его причину. В качестве меры риска рассматриваются такие характеристики, как математическое ожидание, дисперсия, их возможные сочетания или даже квантиль заданного уров-

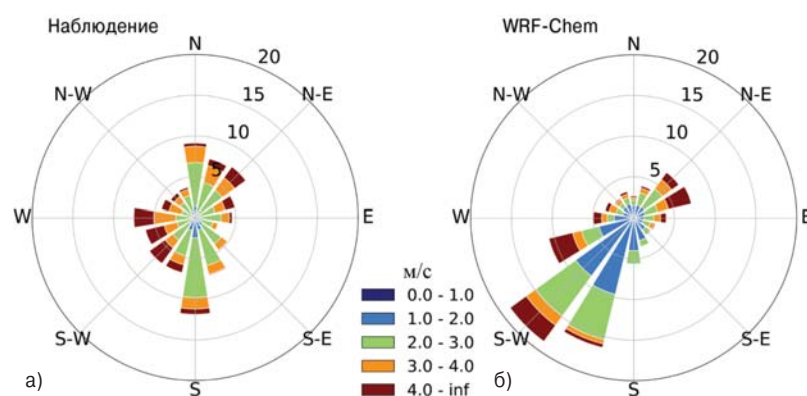


Рис. 4. Диаграмма "Роза ветров", построенная по данным наблюдений (а) и расчетным данным (б)

Fig. 4. "Wind rose" diagram, created according to the observational (a) and calculated data (b)

ня [15], но при этом подчеркивается, что выбор меры зависит от поставленной задачи.

В данной работе демонстрируются два варианта картирования рисков. Использование математического ожидания как меры риска может привести к значительным ошибкам при высокой неопределенности. Этот разброс случайной величины можно уменьшить, если исключить маловероятные всплески концентрации примеси. На рис. 5 показан пример такого картирования рис-

ка, где использован квантиль 0,99 для удаления событий, вероятность которых меньше 1 %. В данном варианте предполагается, что маловероятное высокое загрязнение воздуха является кратковременным и на средний уровень загрязнения влияния не оказывает. На приведенной карте математическое ожидание загрязнения г. Алматы и его окрестностей показано областями, залитыми цветом, каждый из которых соответствует определенной концентрации двуокиси

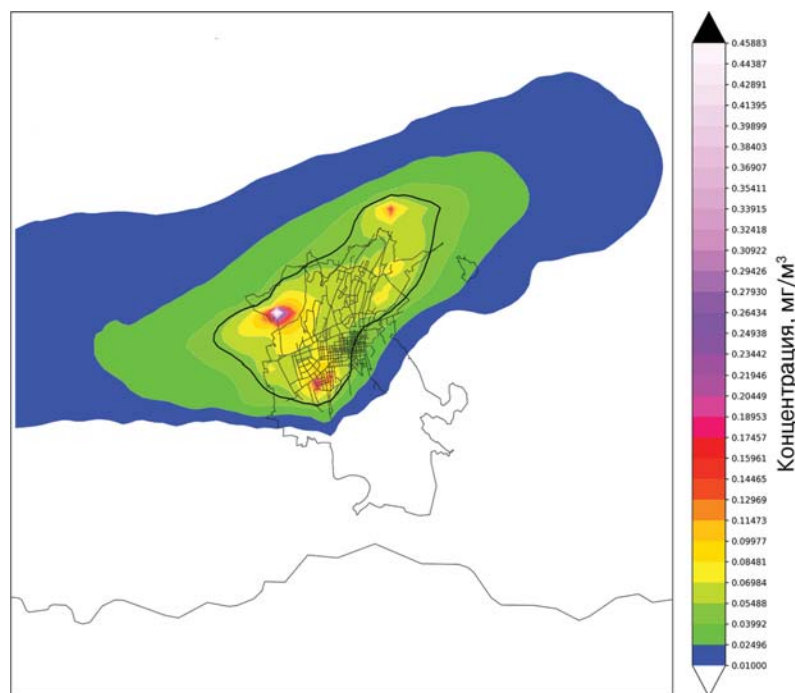


Рис. 5. Карта меры риска, выраженной в величине математического ожидания с удалением маловероятных событий (меньше 1%)

Fig. 5. Map of the risk measure expressed in the value of the mathematical expectation with the removal of unlikely events (less than 1%)

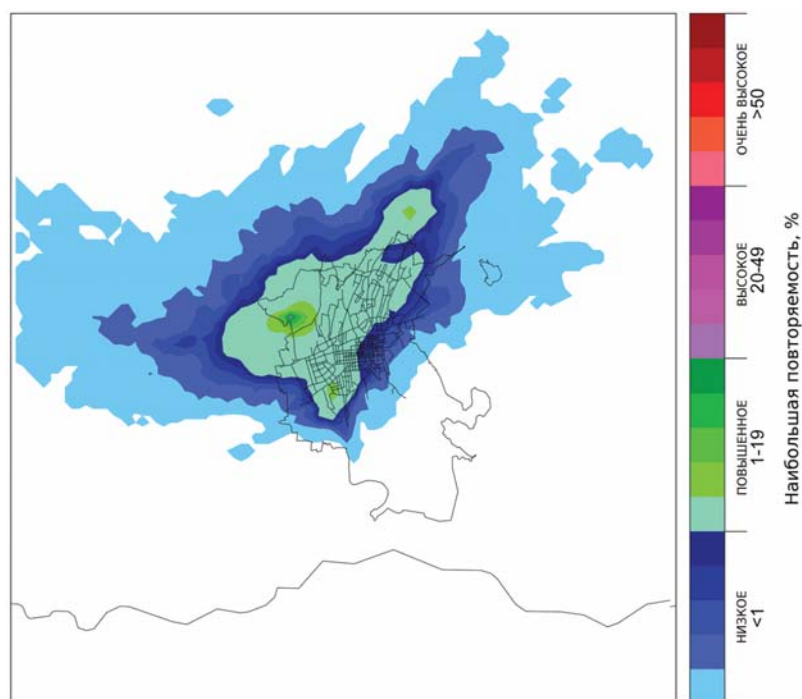


Рис. 6. Карта меры риска, выраженная в наибольшей повторяемости превышения максимально разовой ПДК

Fig. 6. Map of the risk measure expressed the highest frequency of the maximum one-time MPC exceeding

серы (см. легенду, расположенную правее). Утолщенная черная линия показывает область, в которой есть риск превышения среднесуточной ПДК ($ПДК_{с.с.} = 0,05 \text{ мг/м}^3$) для SO_2 . Эта область занимает значительную часть города. Граница города, дорожная сеть, а также государственная граница Республики Казахстан приведены на карте линиями серого цвета.

Другой вариант рискового картирования основан на методике оценки качества атмосферного воздуха [16], учитывающей повторяемость случаев высокого уровня загрязнения (выше максимально разовой ПДК ($ПДК_{м.р.}$)). Рис. 6 иллюстрирует соответствующую карту риска. Из рисунка видно, что вероятностный анализ, учитывающий только события высокого загрязнения, также указывает на

то, что повышенный риск охватывает большую территорию города. Но значительная часть этой территории попадает в нижнюю границу повышенного риска.

Приведенные результаты исследований свидетельствуют, по мнению авторов, об эффективности использования предложенной технологии в экспертном анализе имеющихся рисков и оценке возможных рисков при планировании воздухоохраных мероприятий и размещении новых предприятий. Важно отметить, что эксперты имеют возможность построить карты различных критериев риска и провести углубленный анализ поставленной задачи.

Заключение

Обобщая результаты, изложенные в данной статье, можно заключить следующее.

- Разработана технология картирования рисков загрязнения атмосферы города, включающая формирование входных данных, многократный расчет метеоситуаций с учетом переноса и трансформации загрязняющих веществ и построение карт риска.

- Изложенная технология картирования рисков загрязнения атмосферы города или промышленного района опирается на современную модель решения прямых задач переноса, рассеяния и трансформации загрязняющих веществ WRF-Chem.

- В результате сбора и обработки большого количества входной информации и выбора эффективной конфигурации методов параметризации физических и химических процессов модель была адаптирована к условиям города Алматы.

- Статистический анализ результатов расчета скорости ветра и температуры за ноябрь месяц 2016–2019 гг. показал удовлетворительное соответствие данным наблюдений на метеостанциях Алматы и предгорных окрестностей.

- Технология апробирована на примере загрязнения атмосферы г. Алматы газом SO_2 , выбрасываемого предприятиями теплоэнергетики. Апробированы два варианта меры риска — математического ожидания с удалением экстремально высоких концентраций, вероятность которых меньше 1 %, и повторяемости высоких уровней загрязнения (выше $ПДК_{м.р.}$).

- Технология может стать основой информационно-аналитической системы с развитым интерфейсом настройки на различные задачи, включая виды примесей, типы источников и критерии рисков.

Эта работа выполнялась в рамках программы грантового финансирования Комитетом науки при Министерстве образования и науки Республики Казахстан Риск-анализ влияния предприятий теплоэнергетики на загрязнение воздушного бассейна города (на примере г. Алматы) № AP05132380 Программа 217 "Развитие науки" Подпрограмма 102 "Грантовое финансирование научных исследований" Приоритет: "Энергетика и машиностроение" 2018–2020.

This work was carried out within the framework of the grant funding program by the Science Committee under the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan "Risk assessment of heat energy plants impact on air city pollution (on an example of Almaty city)" No. AP05132380 Program 217 "Development of Science" Subprogram 102 "Grant financing of scientific research" Priority: "Energy and Mechanical Engineering" 2018–2020.

Литература

References

1. Anenberg S., Belova A., Brandt J., Fann N., Greco S. and etc. Survey of Ambient Air Pollution Health Risk Assessment Tools. Risk Analysis, Special Issue: Air Pollution Health Risks. September 2016. Vol. 36. Iss. 9. P. 1718–1736.
2. U.S.EPA. User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model – AERMOD. EPA-1 454/B-16-011. U.S. Environ. Protection Agency, Research Triangle Park, 2016. NC 2 27711.
3. P2.1.10.1290-04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М., Федеральный центр ГСЭН Минздрава России, 2004. 143 с.
4. Baklanov A., Mahura A., Sokhi R. Integrated systems of meso-meteorological and chemical transport models. Springer, 2010. 190 p. ISBN 978-3-642-13979-6.
5. MIKE21 and MIKE 3 Flow Model FM. Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation. Danish Hydraulic Institute, Horsholm, Denmark, 2017. 64 p.
6. Zakarin E.A., Kim D.K. A Stochastic Model of Biota Damage in the Case of Accidental Pollution of Environment. Journal of Applied and Industrial Mathematics. 2014. Vol. 8. No. 1. P. 143–151.
7. Grell G., Fast J., Gustafson W.I., Peckham S.E., McKeen S., Salzmann M., Freita S. On-line Chemistry within WRF. Description and Evaluation of a State-of-the-Art Multiscale Air Quality and Weather Prediction Model In book: Integrated Systems of Meso-Meteorological and Chemical Transport Models. Springer, 2010. P. 41–54. DOI: 10.1007/978-3-642-13980-2_3.
8. Закарин Э.А., Балакай Л.А., Бостанбеков К.А., Дедова Т.В., Жетписов Р.А. Математическое моделирование рисков загрязнения воздушного бассейна города. Гидрометеорология и экология. 2019. № 2. С. 50–61.
9. National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce (2015): NCEP GDAS/FNL 0.25 Degree Global Tropospheric Analyses and Forecast Grids. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. DOI: 10.5065/D65Q4T4Z.
10. Solbakken K., Birkelund Y. Evaluation of the Weather Research and Forecasting (WRF) model with respect to wind in complex terrain. Journal of Physics: Conference Series. 2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1102/1/012011> (дата обращения 02.10.2020).
11. Mauree D., Blond N., Clappier A. Multi-scale modeling of the urban meteorology: Integration of a new canopy model in the WRF model. Urban Climate. 2018. DOI: 10.1016/j.uclim.2018.08.002.
12. Skamarock W.C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D.O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J.G., Duda M.G., Barke D.M., Huang X.-Y. A Description of the Advanced Research WRF Version 4. NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR, 2019. 145 p. DOI: 10.5065/1dfh-6p97.
13. Stockwell W., Middleton P., Chang J. The Second Generation Regional Acid Deposition Model Chemical Mechanism for Regional Air Quality Modeling. J. of Geophysical Research Atmospheres. 1990. 95(D10). P. 16343–18367. DOI: 10.1029/JD095iD10p16343.
14. Погода в 243 странах мира [Электронный ресурс]. URL: <http://rp5.kz/docs/about/ru> (дата обращения 02.10.2020).
15. Вишняков Я.Д., Радаев Н.Н. Общая теория рисков. М., Академия, 2008. 368 с.
16. РД 52.04.667-2005 "Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. Общие требования к разработке, построению, изложению и содержанию". [Электронный ресурс]. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293791/4293791180.htm> (дата обращения 02.10.2020).
1. Anenberg S., Belova A., Brandt J., Fann N., Greco S. and etc. Survey of Ambient Air Pollution Health Risk Assessment Tools. Risk Analysis, Special Issue: Air Pollution Health Risks. September 2016. Vol. 36. Iss. 9. P. 1718–1736.
2. U.S.EPA. User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model – AERMOD. EPA-1 454/B-16-011. U.S. Environ. Protection Agency, Research Triangle Park, 2016. NC 2 27711.
3. R2.1.10.1290-04. Rukovodstvo po otsenke riska dlya zdorov'ya naseleniya pri vozddeystvii khimicheskikh veshchestv, zagryaznyayushchikh okruzhayushchuyu sredu. M., Federal'nyi tsentr GSEN Minzdrava Rossii, 2004. 143 s.
4. Baklanov A., Mahura A., Sokhi R. Integrated systems of meso-meteorological and chemical transport models. Springer, 2010. 190 p. ISBN 978-3-642-13979-6.
5. MIKE21 and MIKE 3 Flow Model FM. Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation. Danish Hydraulic Institute, Horsholm, Denmark, 2017. 64 p.
6. Zakarin E.A., Kim D.K. A Stochastic Model of Biota Damage in the Case of Accidental Pollution of Environment. Journal of Applied and Industrial Mathematics. 2014. Vol. 8. No. 1. P. 143–151.
7. Grell G., Fast J., Gustafson W.I., Peckham S.E., McKeen S., Salzmann M., Freita S. On-line Chemistry within WRF. Description and Evaluation of a State-of-the-Art Multiscale Air Quality and Weather Prediction Model In book: Integrated Systems of Meso-Meteorological and Chemical Transport Models. Springer, 2010. P. 41–54. DOI: 10.1007/978-3-642-13980-2_3.
8. Zakarin E.A., Balakai L.A., Bostanbekov K.A., Dedova T.V., Zhetpisov R.A. Matematicheskoe modelirovanie riskov zagryazneniya vozdušnogo basseina goroda. Gidrometeorologiya i ekologiya. 2019. № 2. S. 50–61.
9. National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce (2015): NCEP GDAS/FNL 0.25 Degree Global Tropospheric Analyses and Forecast Grids. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. DOI: 10.5065/D65Q4T4Z.
10. Solbakken K., Birkelund Y. Evaluation of the Weather Research and Forecasting (WRF) model with respect to wind in complex terrain. Journal of Physics: Conference Series. 2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1102/1/012011> (дата обращения 02.10.2020).
11. Mauree D., Blond N., Clappier A. Multi-scale modeling of the urban meteorology: Integration of a new canopy model in the WRF model. Urban Climate. 2018. DOI: 10.1016/j.uclim.2018.08.002.
12. Skamarock W.C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D.O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J.G., Duda M.G., Barke D.M., Huang X.-Y. A Description of the Advanced Research WRF Version 4. NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR, 2019. 145 p. DOI: 10.5065/1dfh-6p97.
13. Stockwell W., Middleton P., Chang J. The Second Generation Regional Acid Deposition Model Chemical Mechanism for Regional Air Quality Modeling. J. of Geophysical Research Atmospheres. 1990. 95(D10). P. 16343–18367. DOI: 10.1029/JD095iD10p16343.
14. Pogoda v 243 stranakh mira [Elektronnyi resurs]. URL: <http://rp5.kz/docs/about/ru> (data obrashcheniya 02.10.2020).
15. Vishnyakov Ya.D., Radaev N.N. Obshchaya teoriya riskov. M., Akademiya, 2008. 368 s.
16. RD 52.04.667-2005 "Dokumenty o sostoyanii zagryazneniya atmosfery v gorodakh dlya informirovaniya gosudarstvennykh organov, obshchestvennosti i naseleniya. Obshchie trebovaniya k razrabotke, postroeniyu, izlozheniyu i soderzhaniyu". [Elektronnyi resurs]. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293791/4293791180.htm> (data obrashcheniya 02.10.2020).

Э.А. Закарин – д-р техн. наук, директор, ТОО "EcoRisk", e-mail: zakarin_edige@mail.ru • Т.В. Дедова – канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник, ТОО "EcoRisk", e-mail: dedova@mail.ru • Л.А. Балакай – канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник, ТОО "EcoRisk", e-mail: balakay@inbox.ru • К.А. Бостанбеков – канд. техн. наук, мл. науч. сотрудник, ТОО "EcoRisk", e-mail: kairat.boss@gmail.com

E.A. Zakarin – Dr. Sci. (Eng.), Director, "EcoRisk" LLP, e-mail: zakarin_edige@mail.ru • T.V. Dedova – Cand. Sci. (Eng.), Leading Research Fellow, "EcoRisk" LLP, e-mail: dedova@mail.ru • L.A. Balakay – Cand. Sci. (Eng.), Leading Research Fellow, "EcoRisk" LLP, e-mail: balakay@inbox.ru • K.A. Bostanbekov – Cand. Sci. (Eng.), Junior Research Fellow, "EcoRisk" LLP, e-mail: kairat.boss@gmail.com