

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 004.891.2:504.054

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-70-80>

Оценка влияния выбросов от объектов энергетики на Байкальскую природную территорию

Владимир Русланович Кузьмин^{1✉}, Максим Сергеевич Зароднюк²,
Людмила Васильевна Массель³

¹⁻³Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

¹rulisp@vigo.su, <https://orcid.org/0000-0001-5749-4441>

²max@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7920-5583>

³massel@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9088-9012>

Резюме. Цель работы – создание технологии для проведения комплексных исследований по оценке влияния объектов энергетики на окружающую среду. Предлагаемая технология интегрирует нормативные методики для расчета выбросов загрязняющих веществ, методики расчета рассеивания загрязняющих веществ, а также результаты лабораторного анализа проб снега на содержание загрязняющих веществ. Для поддержки технологии был разработан научный прототип интеллектуальной системы поддержки принятия решений WIAIS (Web-oriented Impact Assessment Information System). Созданная технология включает три основных этапа: этап расчета количественных показателей выбросов загрязняющих веществ, этап расчета рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и этап оценки проб снега на содержание в них загрязняющих веществ и сравнение их с полученными результатами. Для апробации предложенной технологии был проведен вычислительный эксперимент, в рамках которого была произведена оценка влияния выбросов от котельных, расположенных на Байкальской природной территории и работающих на различных видах угля. Апробация производилась на основе сведений о 48 котельных, использующих разнообразное оборудование с разной установленной мощностью и находящихся в различных местах в пределах Байкальской природной территории. В результате апробации были получены сведения об основных загрязняющих веществах, выбрасываемых объектами энергетики (сульфаты, оксиды азота, твердые вещества). Установлены количественные показатели выбросов загрязняющих веществ: так, общий объем загрязняющих веществ в окружающую среду составляет 18,33 тыс. т/год. Также установлены наиболее крупные источники загрязняющих веществ – это котельные, работающие в г. Слюдянка, п. Еланцы, г. Северобайкальск и пгт. Нижнеангарск. Технология может использоваться для проведения экологических оценок как существующих энергетических предприятий, так и при планировании строительства новых объектов энергетики. Также технология может быть применена при разработке рекомендаций по снижению выбросов загрязняющих веществ от энергетических предприятий.

Ключевые слова: выбросы вредных веществ, Байкальская природная территория, экология, энергетические системы и комплексы, оценка влияния

Финансирование: Данное исследование было выполнено в рамках проекта по госзаданию ИСЭМ СО РАН № FWEU-2021-0007 AAAA-A21-121012090007-7, отдельные аспекты прорабатывались при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-07-00351.

Для цитирования: Кузьмин В. Р., Зароднюк М. С., Массель Л. В. Оценка влияния выбросов от объектов энергетики на Байкальскую природную территорию // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 1. С. 70–80. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-70-80>.

Impact assessment of emissions from energy facilities on the Baikal natural area

Vladimir R. Kuzmin^{1✉}, Maksim S. Zarodnyuk², Lyudmila V. Massel³

¹⁻³Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

¹rulisp@vigo.su, <https://orcid.org/0000-0001-5749-4441>

²max@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7920-5583>

³massel@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9088-9012>

Abstract. This work aims to establish a technology for conducting a comprehensive assessment of the impact of energy facilities on the environment. The proposed strategy combines regulatory methods for calculating pollutant emissions and dispersion, as well as the laboratory findings on pollutant content in snow samples. To assist the technology, a scientific prototype of an intelligent decision-making support system known as WIAIS (Web-oriented Impact Assessment Information System) was developed. The proposed technology includes three principal stages: calculating the quantitative indicators of pollutant emissions, calculating the pollutant dispersion in the atmosphere, examining snow samples for the pollutant content and comparing them with the obtained results. For practical evaluation of the proposed technology, a computational experiment was performed, which assessed the impact of emissions from the boiler plants located in the Baikal natural area and powered by different types of coal. The testing was performed using the data on 48 boiler plants of various installed capacities having different equipment and located all over the Baikal nature area. Data on the main pollutants emitted by energy facilities (sulfates, nitrogen oxides, solids) were obtained. Quantitative indicators of pollutant emissions were established; thus, the total volume of pollutants amounts to 18.33 thousand tons/year. Furthermore, the largest sources of pollutants were identified, including boiler plants in Slyudyanka, Elantsy settlement, Severobaikalsk, and Nizhneangarsk settlement. Therefore, the proposed methodology can be used for environmental assessments of the existing power plants, as well as for designing new power facilities and developing recommendations for reducing pollutant emissions.

Keywords: pollutant emission, Baikal natural territory, ecology, energy systems and complexes, impact assessment

Funding: The research was carried out under the State Assignment Project of the Melentiev Energy Systems Institute SB RAS No. FWEU-2021-0007 AAAA-A21-121012090007-7, some aspects were developed with the partial financial support of the RFBR grant No. 19-07-00351.

For citation: Kuzmin V. R., Zarodnyuk M. S., Massel L. V. Impact assessment of emissions from energy facilities on the Baikal natural area. *iPolytech Journal*. 2022;26(1):70-80. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-70-80>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проблемы оценки воздействия выбросов и снижения влияния от промышленных объектов, в число которых входят объекты электроэнергетики, становятся все более актуальными и обсуждаются как на российском, так и на международном уровнях. Так, согласно директиве ЕС 2016/2284⁴, к 2030 г. страны ЕС должны снизить выбросы вредных веществ в атмосферу,

в том числе оксидов серы, в среднем на 70%, а выбросы оксидов азота – на 60% по сравнению с 2005 г. [1]. Поправка⁵ ужесточает требования по снижению выбросов парниковых газов к 2030 г. с 50% до 55% по сравнению с 1990 г. В Российской Федерации с 2018 г. действует национальный проект «Экология», согласно паспорту которого до 2024 г. предусмотрены ликвидация наиболее опасных объектов накопленного вреда окружаю-

⁴Directive (EU) 2016/2284 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2016 on the reduction of national emissions of certain atmospheric pollutants, amending Directive 2003/35/EC and repealing Directive 2001/81/EC. [Электронный ресурс]. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2016.344.01.0001.01.ENG&toc=OJ:L:2016:344:TOC (25.06.2021).

⁵Amended proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulation (EU) 2018/1999 (European Climate Law). COM/2020/563 final [Электронный ресурс]. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020PC0563> (25.06.2021).

щей среде и экологическое оздоровление водных объектов (в число которых входит и оз. Байкал) и снижение выбросов опасных загрязняющих веществ, оказывающих наибольшее негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека, в два раза [2, 3]. Также стоит отметить, что, согласно Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 г. [4, 5], одними из приоритетов являются: переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, а также рациональное природопользование и энергетическая эффективность.

Основными источниками информации для экологических оценок деятельности объектов энергетики являются замеры и мониторинг выбросов загрязняющих веществ в природную среду, а также Государственные отчеты и отчеты конкретных предприятий. Однако в том случае, если подобная информация отсутствует, то оценка влияния энергетических объектов может быть проведена по результатам вычислительного эксперимента с использованием утвержденных методик. Существующие методики, используемые для оценки влияния объектов энергетики, применяются по отдельности, что усложняет проведение подобных исследований. Авторам не удалось найти сведения о попытках интеграции этих методик.

В статье рассматриваются результаты оценки деятельности энергетических объектов, расположенных на Байкальской природной территории, а именно: количественные показатели выбросов загрязняющих веществ и расчеты рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. Оценка производилась при помощи разработанной технологии для оценки влияния объектов энергетики на окружающую среду с применением утвержденных правительством РФ методик и авторской интеллектуальной системы поддержки принятия решений «WIS», которые будут рассмотрены в статье.

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как отмечалось выше, проблемы оценки воздействия выбросов привлекают все большее внимание.

В России для определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах электростанций применяется ряд утвержденных нормативных методик, например, «Методика для определения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок ТЭС»⁶ и «Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 т пара в ч или менее 20 Гкал/ч»⁷. Область их применения включает в себя:

- установление предельно допустимых и временно согласованных выбросов;
- планирование мероприятий по снижению выбросов;
- контроль выбросов вредных веществ в атмосферный воздух.

Указанные методики позволяют определить объемы выбросов газообразных вредных загрязняющих веществ (ЗВ) (таких, как оксиды углерода, серы и азота) по данным инструментальных замеров и результатов расчетов, объемы выбросов твердых ЗВ. Эти методы универсальны и их можно использовать как для оценки деятельности электростанций [6, 7], так и других промышленных предприятий [8].

Для оценки рассеивания ЗВ в атмосферном воздухе, а также для прогнозирования рассеивания ЗВ с учетом планируемых природоохранных мероприятий, в настоящее время используются «Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе» (МРР-2017⁸) и [9]. МРР-2017 применяется для расчетов в случаях:

- определения нормативов выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух и разработки мероприятий по защите окружающей среды и мероприятий, которые ока-

⁶РД 34.02.305-98. Методика определения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок ТЭС. Введ. 01.07.1998. М.: ПМБ ВТИ, 1998.

⁷Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час. Введ. 01.01.2000. Спб.: Фирма «Интеграл».

зывают влияние на уровень загрязнения воздуха, а также оценку их результатов;

- обоснования размеров санитарно-защитных зон;

- оценки воздействия планируемой деятельности на качество атмосферного воздуха, а также оценки краткосрочных и долгосрочных уровней загрязненности воздуха и соответствующих концентраций загрязняющих атмосферу веществ.

Однако у МРР-2017 существует недостаток, связанный с небольшой дальностью расчетов – 100 км. Подобного расстояния может быть достаточно для небольших энергетических объектов, однако для крупных электростанций дальность обнаружения выбросов вредных веществ может достигать 200–250 км.

Также применяются методы, описанные М. Е. Берляндом в [9], где приводятся различные методы и сведения для проведения исследований, связанных с оценкой рассеивания загрязняющих веществ. Приведены критерии опасности загрязнения атмосферы и примеры их использования при прогнозе. Описаны физические основы прогноза загрязнения воздуха – прогностические уравнения, осреднение концентраций, учет туманов и смогов, а также влияние, оказываемое рельефом. Описанные методы прогноза загрязнения воздуха можно разделить на две группы: численные и статистические. Численные методы помогают оценить максимальные разовые концентрации примеси от отдельных источников и интегральные от площадных и совокупных источников, а также прогноз смогов. Статистические методы позволяют оценить годовой и суточный ход загрязнения воздуха, оценить концентрацию примесей, рассчитать интегральные показатели загрязнения воздуха в городе. Изложенные методы также позволяют спрогнози-

ровать неблагоприятные метеорологические условия и провести регулирование выбросов в атмосферу. Применение указанных методов оценки рассеивания ЗВ было описано в [10–13].

За рубежом для проведения подобных исследований используются модель HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) [14] и модель AERMOD⁹. HYSPLIT позволяет производить вычисления траекторий переноса, распространение химических преобразований и симуляцию оседания веществ на поверхности. Одной из основных областей ее применения является анализ обратной траектории (back trajectory analysis) с целью выявления источника определенных воздушных масс и установления взаимосвязей «источник-реципиент» [15–17]. Однако, несмотря на широкое применение HYSPLIT, агентство по защите окружающей среды США (U.S. Environmental Protection Agency, U.S. EPA) не рекомендует использовать эту модель при разработке законодательных и регулирующих документов, указывая на тот факт, что HYSPLIT не в состоянии учесть вторичные химические реакции и сильно зависит от метеорологических данных, а именно: от частоты получения этих данных и их географической привязки, и предлагает использовать вместо этого систему AERMOD, состоящую из 3 компонентов¹⁰:

- стационарная модель краткосрочного рассеивания выбросов загрязняющих веществ в атмосферу;

- препроцессор метеорологических сведений AERMET;

- препроцессор ландшафта AERMAP.

В настоящий момент AERMOD применяется в различных исследованиях, связанных с оценкой рассеивания и идентификацией источников выбросов [18–20]. В [20] было по-

⁸Приказ Минприроды России от 06.06.2017 № 273 «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе» (Зарегистрировано в Минюсте России 10.08.2017 № 47734) [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456074826> (28.06.2021).

⁹AERMOD: DESCRIPTION OF MODEL FORMULATION [Электронный ресурс]. URL: http://www.eng.utoledo.edu/aprg/courses/dm/aermod/aermod_mfd.pdf (28.06.2021).

¹⁰U.S. Environmental Protection Agency, 2015. Guidance on the use of models for assessing the impacts of emissions from single sources on the secondarily formed pollutants ozone and PM_{2.5} [Электронный ресурс]. URL: https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-09/documents/epa-454_r-16-005.pdf (28.06.2021).

казано, что система с высокой точностью определяет местоположение источника выброса – средняя ошибка составила 25 м, причем максимальные и минимальные ошибки составили 57 и 10 м, соответственно. Исследование модели также показало, что применение различных наборов данных по «сложному» ландшафту незначительно влияет на точность работы [21].

В результате анализа источников авторам не удалось найти информацию о попытках интеграции различных нормативных методик для проведения расчетов.

ОПИСАНИЕ ПРИМЕНЯЕМЫХ МЕТОДОВ, ПОДХОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ

Для оценки влияния энергетических систем и комплексов на окружающую среду была предложена следующая технология, включающая три этапа:

1. Расчет количественных показателей выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах электростанций – для расчетов применяются «Методика для определения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок»⁶ и «Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал/ч»⁷.

2. Расчет рассеивания выбросов вредных веществ в атмосферном воздухе – для расчетов используются «Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе»¹¹ (МРР-2017) и методы, описанные в [9].

3. Сравнение результатов расчетов с результатами снегосъемов – используем результаты о концентрациях загрязняющих веществ (например, SO_4^{2-} , NO_x , HCO_3^- и др.) полученных путем лабораторного анализа проб снега, взятых в точках исследования.

Технология может использоваться для проведения экологических оценок, как существующих энергетических предприятий, так и при планировании строительства новых объ-

ектов энергетики. Также технология может быть применена при разработке рекомендаций по снижению выбросов загрязняющих веществ от энергетических предприятий. Выбор указанных методик для проведения расчетов обуславливается их большим соответствием поставленным целям, так, например, в МРР-2017 приведены сведения о ряде показателей для расчетов, специфичных для различных регионов Российской Федерации.

Для поддержки предлагаемой технологии был разработан научный прототип интеллектуальной системы поддержки принятия решений (ИСППР) «WIAIS» (Web-oriented Impact Assessment Information System), архитектура и основные компоненты которой были рассмотрены в предыдущих работах авторов [22, 23].

Для апробации предложенной технологии и разработанной ИСППР был проведен вычислительный эксперимент, в рамках которого выполнялась оценка влияния выбросов от котельных, расположенных на Байкальской природной территории (БПТ) и работающих на различных видах угля. Апробация производилась на основе сведений о 48 котельных, использующих различное оборудование, имеющих различную установленную мощность и находящихся в различных местах в пределах БПТ.

На первом этапе был выполнен расчет количественных показателей выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферу. Для проведения этого расчета требуются сведения об энергетических объектах и их технических характеристиках (таких, как количество и типы котлоагрегатов, объем и тип сжигаемого топлива, установленная мощность, степень фильтрации (пылеочистки)). В качестве источника информации о технических характеристиках топлив в вычислительном эксперименте использовался справочник марочного состава и потребительских свойств российских углей, издаваемый независимым аналитическим агентством «Росинформуголь».

По результатам выполнения расчета бы-

¹¹Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе. Введ. 01.01.2018. М., 2018.

ли получены сведения о количественных показателях выбросов от выбранных объектов энергетики, согласно которым:

– общий объем загрязняющих веществ в окружающую среду составляет 18,33 тыс. т/год, из которых 11,27 тыс. т/год выбрасывается объектами, расположенными в Республике Бурятия, и 7,06 тыс. т/год выбрасывается объектами, расположенными на территории Иркутской области;

– основной вклад в выбросы загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу, вносят выбросы пыли – 14,3 тыс. т/год или 78% от общего объема выбросов загрязняющих веществ;

– основными источниками выбросов загрязняющих веществ в атмосферу являются котельные, работающие в г. Слюдянка, п. Еланцы, г. Северобайкальск и пгт. Нижнеангарск.

В таблице приведены результаты расчета в табличном виде, на рис. 1 – представление полученных результатов с помощью геоинформационной системы.

На втором этапе был выполнен расчет рассеивания выбросов вредных веществ в атмосферном воздухе. Перед выполнением расчетов необходимо внести дополнительные сведения о котельных, а именно: высоту

и диаметр дымовых труб, температуру уходящей газовоздушной смеси (ГВС) (в °С), а также указать для электростанции максимальную дальность расчета в километрах. В качестве источника сведений о количественных показателях выбросов были использованы результаты, полученные на предыдущем этапе. Метеорологические сведения (такие, как температура воздуха, направление ветра), требуемые для расчета, загружаются системой автоматически из открытых источников (проекты Gismeteo и RP5).

При выполнении вычислительного эксперимента по расчету рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе были получены следующие результаты:

1. Установлены основные направления распространения рассеивания загрязняющих веществ.

2. Основная часть загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу, оседает преимущественно в радиусе 150–250 м от источника выброса. Это связано, во-первых, с низкой высотой труб у рассматриваемых объектов, во-вторых, с низкой температурой уходящей ГВС.

На рис. 2 показано представление полученных результатов при помощи геоинформационной системы.

Пример результатов расчета в табличном виде
 Example of calculation results in a tabular form

Объект	Топливо	Выбросы всего, тыс. т/год	Твердые вещества, тыс. т/год	SO ₄ ²⁻ , тыс. т/год	NO _x , тыс. т/год	Очистка, %	Установленная мощность, МВт
Ольхонский р-н	–	0,704	0,498	0,206	0,0003	–	9,51
с. Еланцы	–	0,671	0,468	0,109	0,0001	–	8,35
Центральная котельная	–	0,364	0,252	0,112	0,0001	–	4,06
Котел 1	уголь (черемховский)	0,052	0,036	0,016	0,00002	0	0,58
Котел 2	уголь (черемховский)	0,052	0,036	0,016	0,00002	0	0,58
Котел 3	уголь (черемховский)	0,052	0,036	0,016	0,00002	0	0,58
Котел 4	уголь (черемховский)	0,052	0,036	0,016	0,00002	0	0,58
Котел 5	уголь (черемховский)	0,052	0,036	0,016	0,00002	0	0,58
Котел 6	уголь (черемховский)	0,052	0,036	0,016	0,00002	0	0,58
Котел 7	уголь (черемховский)	0,052	0,036	0,016	0,00002	0	0,58

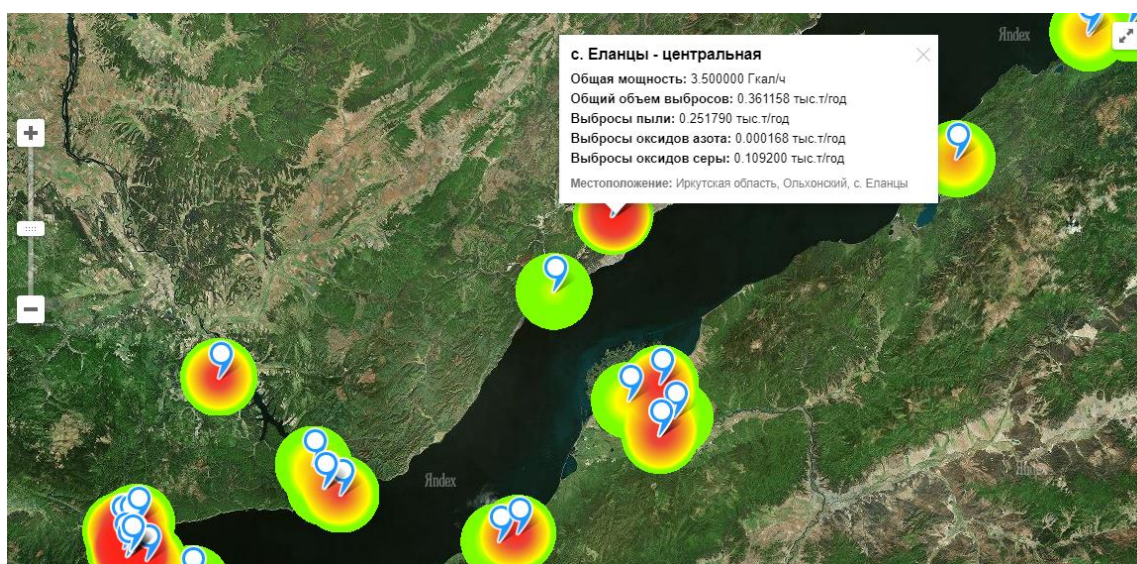


Рис. 1. Геовизуализация результатов количественного расчета выбросов
Fig. 1. Geovisualization of the results of quantitative calculation of emissions

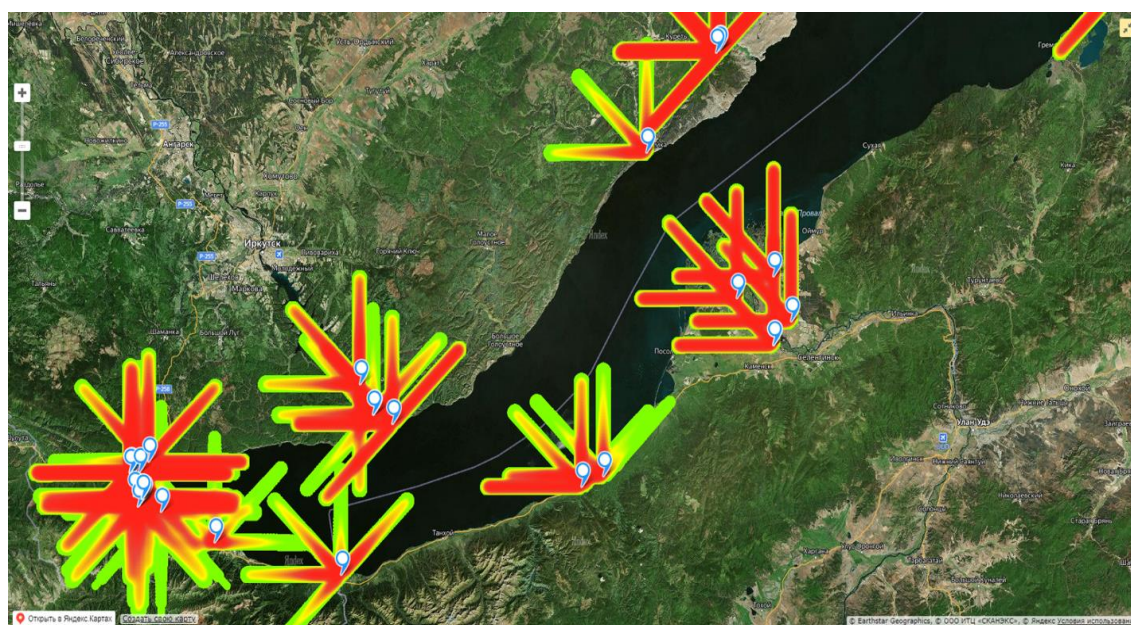


Рис. 2. Геовизуализация результатов расчета рассеивания выбросов
Fig. 2. Geovisualization of the results of emission dispersion calculation

Результаты расчета рассеивания вредных веществ являются предварительными, так как в расчетах не учитывается рельеф местности, что можно видеть на рис. 2. Так, например, г. Слюдянка (на рис. 2 расположен в нижнем левом углу) окружен сопками, что приводит к тому, что загрязняющие вещества, выбрасываемые в атмосферный воздух, будут преимущественно оседать на небольшом расстоянии от населенного пункта.

На третьем этапе была произведена загрузка результатов анализа проб снега, взятых в БПТ. Результаты содержат количественные показатели загрязняющих веществ по 12 параметрам (например, таким как NO_x , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- и другим), полученным из 157 точек замера.

Геовизуализация полученных результатов показана на рис. 3.

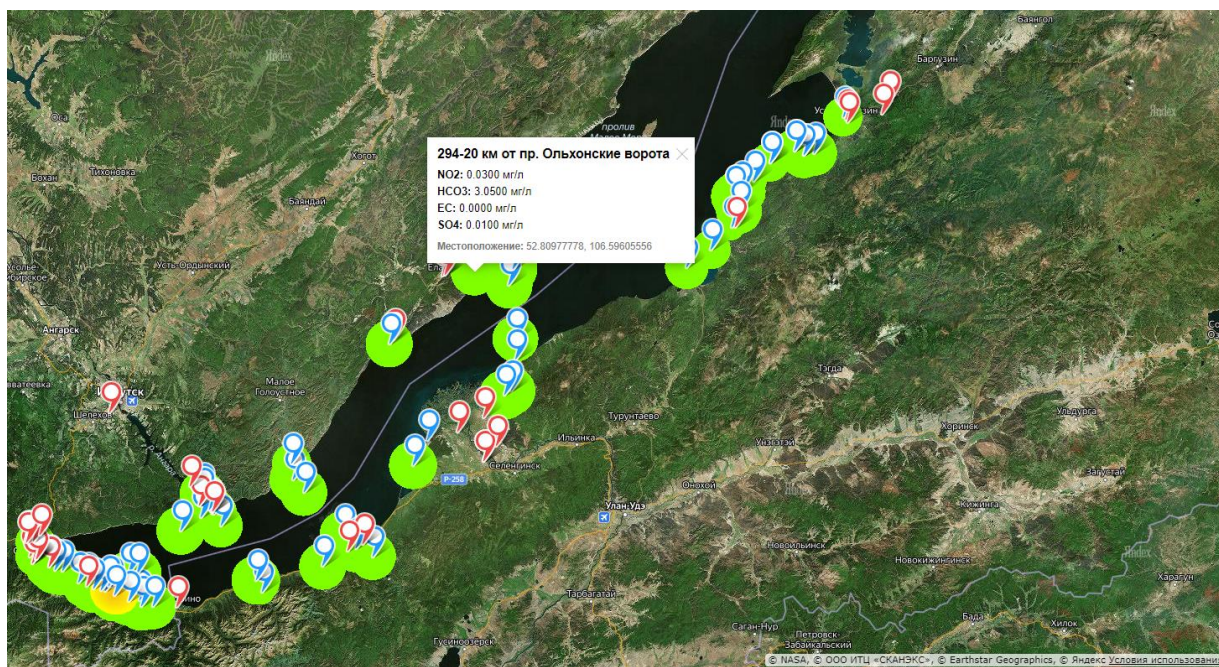


Рис. 3. Гевизуализация результатов анализа проб снега
Fig. 3. Geovisualization of the analysis results of snow samples

Красными маркерами на карте обозначены объекты энергетики, участвовавшие в расчетах, описанных выше; синими – точки, в которых производилось взятие проб снега.

Загруженные результаты анализа проб снега могут быть использованы как при исследовании локального рассеивания загрязняющих веществ от малых объектов энергетики, так и при исследовании дальнего (регионального) переноса загрязняющих веществ в атмосферном воздухе от крупных электростанций. В настоящий момент корректное сравнение результатов анализа проб снега с результатами расчетов рассеивания затруднительно в связи с тем, что при расчете рассеивания не учитывается рельеф местности. Однако загруженные результаты могут быть использованы для анализа концентрации загрязняющих веществ на временном промежутке в течение нескольких лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье была рассмотрена предлагаемая технология для оценки влияния энергетических систем и комплексов на окружающую среду, приведены ее основные этапы и при-

меняемые методики. Этапы предлагаемой технологии могут быть использованы как для проведения комплексных исследований, описанных в статье, так и по отдельности: например, для организации хранения результатов анализа проб снега и сравнения их на определенном временном промежутке или только для оценки объемов загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух.

Показаны результаты проведенных вычислительных экспериментов, которые позволили установить загрязняющие вещества, выбрасываемые объектами энергетики в атмосферный воздух и их количественные показатели, а также основные источники этих выбросов. В будущем планируется интегрировать в систему сведения о предельно допустимых концентрациях (ПДК) загрязняющих веществ для проведения автоматизированной оценки о превышении ПДК, а также сведения о рельефе вокруг объектов, для которых производится расчет рассеивания, что позволит корректно рассчитывать перенос загрязняющих веществ на дальние расстояния.

Список источников

1. Serrano H. C., Oliveira M. A., Barros C., Augusto A. S., Pereira M. J., Pinho P., et al. Measuring and mapping the effectiveness of the European air quality directive in reducing N and S deposition at the ecosystem level // *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 647. P. 1531–1538. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.059>.
2. Semenova G. Global environmental problems in Russia // *Key Trends in Transportation Innovation (KTTI-2019): E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 157. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015702023>.
3. Egorchenkov A. V., Egorchenkov D. A. Social aspects of environmental issues in the context of the national project «Ecology» // *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2020. Vol. 579. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/579/1/012099>.
4. Моисеев Н. А., Трындына Н. С., Ахмадеев Б. А. Анализ энергетической стратегии России // *Наука и практика Российского экономического университета им. Г. В. Плеханова*. 2019. Т. 11. № 3. С. 49–55.
5. Alekseev A. N., Bogoviz A. V., Goncharenko L. P., Sybachin S. A. A critical review of Russia's energy strategy in the period until 2035 // *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2019. Vol. 9. № 6. P. 95–102. <https://doi.org/10.32479/ijeep.8263>.
6. Децук В. С. Методы снижения выбросов загрязняющих веществ при сжигании органических топлив в котлах ТЭС // *Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт*. 2017. № 2. С. 27–29.
7. Созаева Л. Т., Шунгаров И. Х., Хегай А. Г. Загрязнение атмосферного воздуха теплоснабжающими предприятиями города Нальчика // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова*. 2018. № 590. С. 190–198.
8. Березуцкий А. Ю., Катин В. Д. Анализ выбросов вредных веществ нефтеперерабатывающими предприятиями и механизмов их образования при горении топлива // *Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке науч.-практ. конф.: тр. Всерос. творческой конф. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС*, 2011. Т. 2. С. 315–322.
9. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 272 с.
10. Кормина Л. А., Сукач О. О. Внедрение ресурсосберегающих технологий в энергетике // *Химия. Экология. Урбанистика*. 2020. Т. 2020-1. С. 120–123.
11. Семакина А. В., Платунова Г. Р., Мансуров А. Р. Состояние атмосферного воздуха на территории Республики Башкортостан // *Вестник Удмуртского университета. Серия: Биология. Науки о Земле*. 2020. Т. 30. № 3. С. 278–284. <https://doi.org/10.35634/2412-9518-2020-30-3-278-284>.
12. Литвинова Н. А., Азаров В. Н. О модели вертикального распределения концентраций загрязняющих веществ по высоте зданий с учетом типа локальной застройки // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2021. № 3. С. 108–121.
13. Беляев Н. Н., Славинская Е. С., Кириченко Р. В. Численные модели для прогноза загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта // *Наука та прогрес транспорту // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2016. № 6. С. 25–32. <https://doi.org/10.15802/stp2016/90457>.
14. Stein A. F., Draxler R. R., Rolph G. D., Stunder B. J. B., Cohen M. D., Ngan F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2015. Vol. 96. Iss. 12. P. 2059–2077. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>.
15. Fleming Z. L., Monks P. S., Manning A. J. Review: untangling the influence of air-mass history in interpreting observed atmospheric composition // *Atmospheric Research*. 2012. Vol. 104-105. P. 1–39. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.09.009>.
16. Ma Yunfeng, Wang Maibo, Wang Shuai, Wang Yue, Feng Lei, Wu Kaiyu. Air pollutant emission characteristics and HYSPLIT model analysis during heating period in Shenyang, China // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2021. Vol. 193. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08767-4>.
17. Chang Lisa Tzu-Chi, Barthelemy Xavier, Watt Sean, Jiang Ningbo, Riley Matthew, Azzi Merched. The use of 'HYSPLIT in NSW' in air quality management and forecasting // *CASANZ 2021: the 25th International Clean Air and Environment Conference*. 2021. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/351803192_THE_USE_OF_%27HYSPLIT_IN_NSW%27_IN_AIR_QUALITY_MANAGEMENT_AND_FORECASTING (16.09.2021).
18. Cerqueira J. S., Albuquerque H. N., Sousa F. A. S. Atmospheric pollutants: modeling with AERMOD software // *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2019. Vol. 12. P. 21–32. <https://doi.org/10.1007/s11869-018-0626-9>.
19. Gopi R., Saravanakumar R., Elango K. S., Chandrasekar A., Navaneethan K. S., Gopal N. Construction emission management using wind rose plot and AERMOD application // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2021. Vol. 1145. P. 012106. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1145/1/012106>.
20. Pandey G., Sharan M. Application of AERMOD for the identification of a point-source release in the FFT-07 experiment // *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2021. Vol. 14. P. 679–690. <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00971-y>.
21. Rzeszutek M., Szulecka A. Assessment of the AERMOD dispersion model in complex terrain with different types of digital elevation data // *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2021. Vol. 642. P. 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/642/1/012014>.
22. Massel L. V., Kuzmin V. R. Typal intelligent DSS for making strategic decisions in the energy sector and examples of application based on agent-service approach // *Proceedings of the 21st Workshop on Computer Science and Information Technologies*. 2019. P. 273–278.

<https://doi.org/10.2991/csit-19.2019.48>.

23. Кузьмин В. Р. Разработка информационной подсистемы для расчета и визуализации вредных выбросов

от объектов энергетики // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 1. С. 142–155. <https://doi.org/38028/ESI.2020.17.1.011>.

References

1. Serrano H. C., Oliveira M. A., Barros C., Augusto A. S., Pereira M. J., Pinho P., et al. Measuring and mapping the effectiveness of the European air quality directive in reducing N and S deposition at the ecosystem level. *Science of the Total Environment*. 2019;647:1531-1538. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.059>.
2. Semenova G. Global environmental problems in Russia. In: *Key trends in transportation innovation (KTTI-2019): E3S Web of Conferences*. 2020;157. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015702023>.
3. Egorchenkov A. V., Egorchenkov D. A. Social aspects of environmental issues in the context of the national project "Ecology". In: *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2020;579. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/579/1/012099>.
4. Moiseev N. A., Tryndina N. S., Akhmadeev B. A. Analysis of Russian energy strategy. *Nauka i praktika Rossijskogo ekonomicheskogo universiteta imeni G. V. Plehanova = Science and Practice of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2019;11(3):49-55. (In Russ.).
5. Alekseev A. N., Bogoviz A. V., Goncharenko L. P., Sybachin S. A. A critical review of Russia's energy strategy in the period until 2035. *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2019;9(6)95-102. <https://doi.org/10.32479/ijee.8263>.
6. Detsuk V. S. Methods of reducing pollutant emissions when burning fossil fuels in the boilers of TPP. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport = Bulletin of BSUT: science and transport*. 2017;2:27-29. (In Russ.).
7. Sozaeva L. T., Shungarov I. H., Hegaj A. G. The pollution of atmosphere air by heating enterprises of Nalchik town. *Trudy Glavnoj geofizicheskoy observatorii imeni A.I. Voejkova*. 2018;590:190-198. (In Russ.).
8. Berezuckij A. Yu., Katin V. D. Analysis of harmful emissions by oil refineries and their formation mechanisms during fuel combustion. In: *Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke: trudy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy tvorcheskoj konferencii = Scientific-technical and economic cooperation of the Asia-Pacific countries in the XXI century: proceedings of All-Russian scientific and practical creative conference*. Khabarovsk: Far Eastern State Transport University; 2011, vol. 2, p. 315-322. (In Russ.).
9. Berlyand M. E. *Prediction and regulation of air pollution*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1985. 272 p. (In Russ.).
10. Kormina L. A., Sukach O. O. Introduction of resource-saving technologies in the energy sector. *Himiya. Ekologiya. Urbanistika*. 2020;2020-1:120-123. (In Russ.).
11. Semakina A. V., Platunova G. R., Mansurov A. R. Condition of the atmospheric air in the territory of the republic of Bashkortostan. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o Zemle = Bulletin of Udmurt University. Series: Biology. Earth Sciences*. 2020;30-3;278-284. <https://doi.org/10.35634/2412-9518-2020-30-3-278-284>. (In Russ.).
12. Litvinova N. A., Azarov V. N. On the model of the vertical distribution of pollutant concentrations along the height of buildings taking into account the type of local development. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta: Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura = Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture*. 2021;3;108-121. (In Russ.).
13. Biliaiev M. M., Slavinska O. S., Kyrychenko R. V. Numerical prediction models for air pollution by motor vehicle emissions. *Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovskogo natsional'nogo universitetu zaliznynoho transport = Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2016;(6):25-32. <https://doi.org/10.15802/stp2016/90457>. (In Russ.).
14. Stein A. F., Draxler R. R., Rolph G. D., Stunder B. J. B., Cohen M. D., Ngan F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2015;96(12):2059-2077. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>.
15. Fleming Z. L., Monks P. S., Manning A. J. Review: untangling the influence of air-mass history in interpreting observed atmospheric composition. *Atmospheric Research*. 2012;104-105:1-39. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.09.009>.
16. Ma Yunfeng, Wang Maibo, Wang Shuai, Wang Yue, Feng Lei, Wu Kaiyu. Air pollutant emission characteristics and HYSPLIT model analysis during heating period in Shenyang, China. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2021;193. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08767-4>.
17. Chang Lisa Tzu-Chi, Barthelemy Xavier, Watt Sean, Jiang Ningbo, Riley Matthew, Azzi Merched. The use of 'HYSPLIT in NSW' in air quality management and forecasting. *CASANZ 2021: the 25th International Clean Air and Environment Conference*. 2021. Available from: https://www.researchgate.net/publication/351803192_THE_USE_OF_%27HYSPLIT_IN_NSW%27_IN_AIR_QUALITY_MANAGEMENT_AND_FORECASTING [Accessed 16th September 2021]. (In Russ.).
18. Cerqueira J. S., Albuquerque H. N., Sousa F. A. S. Atmospheric pollutants: modeling with AERMOD software. *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2019;12:21-32. <https://doi.org/10.1007/s11869-018-0626-9>.
19. Gopi R., Saravanakumar R., Elango K. S., Chandrasekar A., Navaneethan K. S., Gopal N. Construction emission management using wind rose plot and AERMOD application. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1145:012106. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1145/1/012106>.

20. Pandey G., Sharan M. Application of AERMOD for the identification of a point-source release in the FFT-07 experiment. *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2021;14:679-690. <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00971-y>.
21. Rzeszutek M., Szulecka A. Assessment of the AERMOD dispersion model in complex terrain with different types of digital elevation data. In: *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2021;642:012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/642/1/012014>.
22. Massel L. V., Kuzmin V. R. Typal intelligent DSS for making strategic decisions in the energy sector and ex-

- amples of application based on agent-service approach. In: *Proceedings of the 21st Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT 2019)*. 2019;273-278. <https://doi.org/10.2991/csit-19.2019.48>.
23. Kuzmin V. R. Development of information subsystem for calculation and visualization of harmful emissions from energy objects. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management*. 2020;1:142-155. <https://doi.org/38028/ESI.2020.17.1.011>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузьмин Владимир Русланович,
младший научный сотрудник,
Отдел систем искусственного интеллекта
в энергетике,
Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева
СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

Зароднюк Максим Сергеевич,
кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник Отдела теплосиловых систем,
Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева
СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

Массель Людмила Васильевна,
доктор технических наук, профессор,
заведующая Отделом систем искусственного
интеллекта в энергетике,
Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева
СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 14.10.2021; одобрена после рецензирования 09.12.2021; принята к публикации 15.02.2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir R. Kuzmin,
Junior Researcher,
Department of Artificial Intelligence Systems
in the Energy Sector,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

Maksim S. Zarodnyuk,
Cand. Sci. (Phys.- Math.),
Researcher of the Department of Heat Power Systems,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

Lyudmila V. Massel,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Artificial Intelligence Systems
in the Energy Sector,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 14.10.2021; approved after reviewing 09.12.2021; accepted for publication 15.02.2022.