

МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.510.4

Система прогноза переноса загрязняющих веществ в атмосфере регионов России

Р.Ю. Игнатов¹, М.И. Нахаев², К.Г. Рубинштейн^{✉ 1, 2}, В.Ю. Цепелев³,
Д.С. Шапошников³, Д.Ю. Обухов³, А.В. Родин³, А.В. Седов^{4*}

¹Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН
115191, г. Москва, ул. Большая Тульская, 52

²Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ
123376, г. Москва, пер. Большой Предтеченский, 13, стр. 1

³НТЦ «Мониторинг среды и экологии», Московский физико-технический институт
(национально-исследовательский университет)
117303, г. Москва, ул. Керченская, 1А, корп. 1

⁴ООО «Большая тройка»
121205, г. Москва, инновационный центр «Сколково», Большой бульвар, 42, стр. 1

Поступила в редакцию 02.03.2024;
после доработки 12.09.2024;
принята к печати 01.10.2024

Представлена система прогноза переноса и трансформации загрязняющих веществ в атмосфере с использованием химико-транспортной модели CHIMERE, учитывающей эмиссии от стационарных, аварийных и подвижных источников. Прогноз метеорологических полей выполнялся с помощью региональной негидростатической модели циркуляции атмосферы высокого разрешения WRF-ARW. Система полностью автоматизирована, что позволяет использовать ее в качестве инструмента для получения оперативной информации в работе ситуационных центров и центров принятия решений в случае аварийных ситуаций на производстве, чрезвычайных ситуаций природного или техногенного характера. Результаты тестирования системы показали ее работоспособность, возможность использования в оперативной и исследовательской работе, а также при разработке сценариев вероятного развития аварийных или чрезвычайных ситуаций в любой точке на территории страны, что способствует реализации мероприятий по ликвидации последствий аварий.

Ключевые слова: прогноз загрязнения атмосферы, химическая транспортная модель, перенос аварийных выбросов, модель атмосферы; simulation of atmospheric pollution, chemical transport model, transfer of accidental emissions, atmospheric model.

Введение

В России, как и в большинстве индустриально развитых стран, есть большое количество производств, регулярно выбрасывающих в атмосферу значительные объемы загрязняющих веществ, которые воздействуют на окружающую атмосферу, почву и население. Эпизодически на этих производствах происходят аварийные выбросы, интенсивность и локализация которых подлежат оперативной оценке.

Прогноз качества воздуха в настоящее время осуществляется при помощи химических транспорт-

ных моделей (XTM): CHIMERE (<https://www.lmd.polytechnique.fr/chimere/>), WRF-CHEM (https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/model_overview.html), SILAM (<http://silam.fmi.fi/index.html>) [1–3]. Изменчивость концентраций загрязняющих веществ в атмосфере и осадения на поверхности зависит прежде всего от метеорологических факторов. Для прогноза метеорологических полей обычно используются мезомасштабные гидродинамические модели. Так, например, созданная в Гидрометцентре России технология прогнозирования загрязнения воздуха в Московском регионе на основе XTM CHIMERE-2013b и гидродинамической модели атмосферы COSMO-Ru7-ART позволяет рассчитывать прогнозы полей концентрации загрязняющих веществ с заблаговременностью до трех суток [4]. Полностью автоматизированной системы расчета концентраций примесей, обладающей интерфейсом взаимодействия «оператор–система» и позволяющей оперативно производить расчеты в любой географической области, нет ни в России, ни за рубежом.

* Роман Юрьевич Игнатов (prognostist@gmail.com); Мурат Ислемгалиевич Нахаев (muratmeteo@mail.ru); Константин Григорьевич Рубинштейн (k.g.rubin@googlemail.com); Валерий Юрьевич Цепелев (tsepelev.vu@mipt.ru); Дмитрий Сергеевич Шапошников (shaposhnikov@phystech.edu); Дмитрий Юрьевич Обухов (obukhov.du@mipt.ru); Александр Вячеславович Родин (rodin.av@mipt.ru); Артем Владимирович Седов (as@big3.ru).

Цель настоящей работы — создание системы прогноза переноса и трансформации загрязняющих веществ для произвольно выбранного региона России, позволяющей посредством универсального интерфейса осуществлять расчеты гидродинамических моделей циркуляции атмосферы, сопряженных с ХТМ, и представлять результаты в виде трехмерного облака загрязняющих веществ, перемещающегося над фактическим рельефом местности, и графиков изменения концентраций загрязняющих веществ во времени и пространстве. Для решения этой задачи была разработана система оперативного прогноза распространения в атмосфере аварийного выброса загрязняющих веществ в произвольно выбранном регионе России на базе прогностической модели WRF-ARW и сопряженной с ней CHIMERE. Система управляется при помощи простого графического интерфейса. Ниже представлены краткое описание созданной системы и анализ качества прогнозов на отдельном примере.

1. Общая архитектура системы

В основе архитектуры системы лежит клиент-серверное взаимодействие. Пользователь запускает клиентскую часть системы в WEB-браузере, который, в свою очередь, взаимодействует с серверной частью системы, расположенной на удаленном сервере. Разработанный программный комплекс позволяет управлять процессом численного прогноза, представлять результаты расчетов в табличном и графическом видах (одномерные, двумерные и трехмерные изображения) и хранить результаты вычислений.

Разработанный интерфейс взаимодействия оператора и комплекса моделей дает возможность:

- выбирать домен (область, на которой будут проводиться расчеты), настраивать и запускать сис-

тему предварительной настройки параметров проекции домена;

- автоматически формировать файлы постоянных эмиссий загрязняющих веществ в выбранном домене; в зависимости от координат центральной точки домена выбирать набор исходных данных: ЕМЕР или НТАР;

- использовать графический редактор для создания рабочих процессов, отслеживания хода их выполнения и сообщений об ошибках;

- запускать систему прогноза загрязнения атмосферы;

- управлять рабочими процессами.

Для реализации перечисленных возможностей был разработан программный комплекс, который позволяет оператору выбирать географический центр расчетной области, размер и шаг вложенной сетки, автоматически скачивать начальные метеорологические данные, запускать прогноз метеорологических полей и осуществлять расчет ХТМ. Созданные оператором расчетные задания отображаются в таблице (рис. 1). Оператор имеет возможность контролировать расчет, запускать задачи на внешних серверах, останавливать или перезапускать любое из заданий.

После успешного окончания расчетов прогностической модели результаты передаются в ХТМ. В расчетах ХТМ используются данные о фоновой эмиссии загрязняющих веществ из базы ЕМЕР (<https://emep.int>) или EDGAR (<https://edgar.jrc.ec.europa.eu>), пересчитанные для выбранной расчетной области и даты. Оператор может с помощью графического интерфейса задать в любой точке расчетной области источник выброса загрязняющих веществ и указать его параметры. Этот выброс (или множество выбросов) будет учтен при расчете ХТМ, в процессе которого будут получены поля концентраций и осаждения загрязняющих веществ.

Запуск расчета модели ▶

Запуск расчета сценария ▶

Расчетные задания

Модельные расчеты ▾

Задача ▾	Домен ▾	Выброс ▾	Дата ▾	Начало ▾	Конец ▾	Расчет ▾	Запуск ▾	Прогресс ▾	Статус ▾
Москва. Совместный расчет от 12.12.2023 00:00 (на 24 ч.) 👁️ 🔗							100%	Завершена	
Транспортная модель 📄	📍 Москва. Расчетная область 200 x 200 км с шагом сетки 2 км	⊗	12.12.2023 00:00	13.12.2023 00:24	13.12.2023 01:20	✔️	Регулярный	100%	Завершена
Прогностическая модель 📄	📍 Москва. Расчетная область 200 x 200 км с шагом сетки 2 км	⊗	12.12.2023 00:00	12.12.2023 23:54	13.12.2023 00:24	✔️	Регулярный	100%	Завершена
Получение данных 📄	📍 Москва. Расчетная область 200 x 200 км с шагом сетки 2 км	⊗	12.12.2023 00:00	12.12.2023 17:20	12.12.2023 23:54	✔️	Регулярный	100%	Завершена
Москва (тест). Совместный расчет от 11.12.2023 00:00 (на 24 ч.) 🔗							31%	Выполняется	
Транспортная модель	📍 Москва (тест). Расчетная область 200 x 200 км с шагом сетки 2 км	🔥	11.12.2023 00:00			⊗	Вручную	0%	В очереди
Транспортная модель	📍 Москва (тест). Расчетная область 200 x 200 км с шагом сетки 2 км	🔥	11.12.2023 00:00			⊗	Вручную	0%	В очереди
Транспортная модель	📍 Москва (тест). Расчетная область 200 x 200 км с шагом сетки 2 км	🔥	11.12.2023 00:00			⊗	Вручную	0%	В очереди

Рис. 1. Таблица расчетных заданий модельного комплекса

По окончании расчетов полученные результаты можно визуализировать на интерактивной трехмерной географической карте (рис. 2, цв. вкладка) или в виде графиков, карт и диаграмм (рис. 3, цв. вкладка), а также выгрузить в файл в формате NetCDF4.

Интерфейс визуализации поддерживает перемещение, вращение и масштабирование визуализированных данных моделирования на трехмерной карте с помощью указателя мыши. Отображение результатов расчета доступно с помощью таких слов, как облака, изолинии, столбчатые диаграммы совместно с отображением модельной сетки, полями осадения, траекторий переноса загрязняющих веществ и полями ветра. На трехмерной карте поддерживается анимация результатов расчетов с временным шагом от 1 ч на период до 72 ч вперед. Графический интерфейс позволяет выбрать любую точку в расчетной области и любое загрязняющее вещество для построения графиков и диаграмм.

На рис. 3 на верхнем графике показана зависимость концентрации загрязняющего вещества от географических координат разреза (сверху долгота, снизу широта) и высоты в метрах. На центральной карте приведена проекция выброса на географическую карту. На правом графике — изменение концентрации загрязняющего вещества по высоте для выбранной точки в заданный момент времени. На нижнем графике — изменение концентрации загрязняющего вещества с высотой по времени. На левой панели показана средняя концентрация загрязняющих веществ на выбранной высоте (100 м) в заданной точке.

2. Модель численного прогноза циркуляции атмосферы

Для прогноза циркуляции атмосферы в созданной системе была использована региональная негидростатическая модель циркуляции атмосферы WRF-ARW версии 4.3.3, созданная в Национальном центре атмосферных исследований США [5]. Модель является свободно распространяемой с открытым программным кодом, что дает широкую возможность для ее усовершенствования и адаптации к самым разным задачам в пространственных масштабах от сотен метров до тысяч километров. Модель основана на решении системы негидростатических уравнений, учитывающих неоднородность подстилающей поверхности. В качестве вертикальной координаты модели используется давление воздуха в σ -системе, где $\sigma_i = p_i/p_s$ — отношение давления на данном модельном слое к приземному давлению воздуха.

В модели реализована технология расчетов на вложенных расчетных сетках. При этом минимальный шаг сетки составляет 1 км. Для географической привязки расчетных областей (выбор области, учет рельефа и распределения категорий землепользования подстилающей поверхности) используются глобальные топографические данные раз-

личного разрешения — от 100 км до 90 м. В расчетах применялись следующие параметризации физических процессов: микрофизики облаков [6], коротковолновой радиации RRTMG [7], пограничного слоя University of Washington (TKE) [8], приземного слоя Revised MM5 [9], процессов в почве Noah—MP Land Surface Model [10, 11], конвекции Grell Ensemble Scheme [12, 13]. В качестве начальных и граничных условий брались данные глобальной прогностической системы GFS (Global Forecast System — Система глобальных прогнозов США) (<https://nomads.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod/>).

3. Описание химической транспортной модели

Мы использовали XTM CHIMERE (версия 2020 г., релиз № 3), разработанную в Национальном центре научных исследований Франции и предназначенную для прогноза концентраций различных химических соединений в газообразной и аэрозольной фазах (<https://www.lmd.polytechnique.fr/chimere/>).

Химическая транспортная модель CHIMERE содержит два блока газофазных реакций: MELCHIOR-1 (~ 80 веществ, > 300 реакций) и MELCHIOR-2 (~ 40 веществ, > 110 реакций). Аэрозоль по составу разделяется на семь типов, при расчетах было задано 10 градаций по размерам частиц от 0,01 до 40,0 мкм (0,1E-07; 0,220071E-07; 0,4843125E-07; 0,1065832E-06; 0,2345586E-06; 0,5161956E-06; 0,1135997E-05; 0,25E-05; 0,5E-05; 0,1E-04; 0,4E-04). Конфигурация XTM предусматривает использование химического блока MELCHIOR-1 или его «усеченной» версии MELCHIOR-2 либо использование XTM в качестве модели переноса пассивной примеси в зависимости от поставленной задачи.

Простейшие органические вещества (метан, этан, этилен, изопрен и метанол) представлены в модели индивидуально, для более сложных выбранных молекул, представляющие семейства соединений (*n*-бутан для алканов, пропен для алкенов, о-ксилол для ароматических соединений, апинен для терпенов и этанол для спиртов). Эти летучие органические соединения подвергаются реакциям окисления с OH, NO₃ и O₃ (последний только для ненасыщенных соединений), приводящим к образованию перекиси (RO₂) радикалов. На границах расчетной области XTM CHIMERE концентрации примесей задаются по результатам климатического моделирования: для газовых примесей в качестве граничных начальных условий применяются данные модели LMDz-INCA, для аэрозолей — GOCARD.

Ключевыми процессами, влияющими на концентрации химических веществ, представленных в XTM CHIMERE, являются: первичные выбросы (кадастры эмиссий), перенос (адвекция и перемешивание), химические преобразования и осадение. В XTM CHIMERE предусмотрен интерфейс обращения к двум базам данных о землепользовании GLCF (Global Land Cover Facility) и GlobCover

(GlobCover Land Cover). База данных GLCF, разработанная университетом Мэриленда, имеет горизонтальное разрешение 1×1 км и содержит 14 классов почвенно-растительного покрова, определенных на основе спутниковых снимков (<http://www.landcover.org>). GlobCover разработана по инициативе Европейского космического агентства, имеет разрешение по горизонтали примерно 300×300 м и содержит 22 класса земного покрова [14]. Типы землепользования необходимы CHIMERE для расчета ряда таких процессов, как осаждение, биогенные выбросы, турбулентное трение и теплоперенос в приповерхностном слое атмосферы.

Описание процесса сухого осаждения в модели построено на методе, описанном в работе [13] и основанном на резистивной аналогии, подразумевающей параметризацию эффективного сопротивления поверхности потоку осаждения. Влажное осаждение определяется в модели абсорбцией газов, конденсированными частицами воды в облаках и осадках, параметризованными на основе известных принципов, а также вымыванием аэрозоля осадками.

При расчете сухого осаждения используется ряд параметризаций процессов взаимодействия атмосферы с растительным покровом, учитывающих в основном устьичные и поверхностные процессы, которые зависят от типа землепользования, сезона и индекса площади листьев (LAI — Leaf Area Index). Для учета изменчивости роста растительности при расчете скорости осаждения используются LAI, индекс площади поверхности (SAI) и фенологический фактор «fphen». Существуют два способа оценки этих параметров в модели. Если используется схема MEGAN, то перечисленные параметры считываются из базы данных. В противном случае параметры оцениваются с использованием простых функций [15].

4. Оценки прогноза приземных метеорологических полей

Качество прогноза загрязнения атмосферы в большой мере зависит от качества прогностических метеорологических полей. С целью анализа качества прогноза метеорологических полей у подстилающей поверхности была проведена оценка прогнозов с заблаговременностью 0–24 ч за период 13–20.08.2023 г. в окрестностях г. Ангарска. В качестве эталона использовались данные наблюдений на метеорологических станциях Росгидромета. Были получены стандартные оценки прогноза температуры на высоте 2 м, скорости ветра на высоте 10 м и сумм осадков мм/12 ч для двух областей:

1) небольшой области, включающей только район расположения постов наблюдений за агентами загрязнения (рис. 4, а, цв. вкладка), в которой расположены пять метеорологических станций (область расчета);

2) расширенной области, включающей 15 наблюдательных станций (рис. 4, б, цв. вкладка), позволяющих получить репрезентативные результаты.

Для оценки прогноза метеорологических полей были рассчитаны все характеристики, указанные в Наставлении по метеорологическим прогнозам [16]. Из табл. 1 видно, что прогноз температуры воздуха на высоте 2 м был достаточно успешен практически во всех диапазонах наблюдавшихся температур. Средняя по выборке прогнозов систематическая ошибка была менее 1°C . Следует отметить небольшое занижение моделью прогностических температур воздуха в диапазоне выше $+15^\circ\text{C}$, которое составляет $1\text{--}1,9^\circ\text{C}$ и особенно заметно в области расчета.

Таблица 1

Оценки качества прогноза температуры воздуха на высоте 2 м с 13 по 20.08.2023 г.

Диапазон температур, $^\circ\text{C}$	Число станций	Количество наблюдений	МЕ, $^\circ\text{C}$	MAE, $^\circ\text{C}$
<i>Расширенная область</i>				
Все данные	16	1094	-0,42	1,74
0...5	16	7	0,50	0,86
5...10	16	177	0,98	1,62
10...15	16	407	-0,21	1,18
15...20	16	365	-1,00	2,16
20...25	16	138	-1,39	2,48
<i>Область расчета</i>				
Все данные	5	354	-0,79	1,74
0...5	5	6	0,31	0,73
5...10	5	63	0,52	1,48
10...15	5	140	-0,41	1,11
15...20	5	107	-1,71	2,50
20...25	5	38	-1,92	2,56

Примечание. МЕ — средняя ошибка; MAE — средняя абсолютная ошибка.

Оценки качества прогноза ветра приведены в табл. 2, из которой можно сделать вывод о высоком качестве прогноза ветра в большинстве диапазонов его скоростей. Можно отметить небольшое завышение малых значений скорости ветра. Таким

Таблица 2

Оценки качества прогноза ветра на высоте 10 м с 13 по 20.08.2023 г.

Диапазон скорости, м/с	Число станций	Количество наблюдений	МЕ, м/с	MAE, м/с	VEKT
<i>Расширенная область</i>					
Все данные	16	1094	0,74	1,39	2,15
Штиль	16	177	1,85	1,85	1,85
0...2	16	661	0,92	1,22	2,07
2...5	16	235	-0,34	1,42	2,46
5...10	16	21	-2,18	2,36	3,62
<i>Область расчета</i>					
Все данные	5	354	0,82	1,41	2,10
Штиль	5	64	2,08	2,08	2,08
0...2	5	221	0,99	1,25	1,99
2...5	5	61	-0,70	1,18	2,44
5...10	5	8	-2,41	2,41	2,75

Примечание. VEKT — векторная ошибка ветра.

образом, моделью хуже воспроизводятся штилевые условия. Однако следует учитывать, что точность самих измерений скорости ветра на метеорологических станциях составляет около 1 м/с, при этом средняя величина абсолютной ошибки прогноза скорости ветра не превышает 1,41 м/с, что лишь немногим выше точности самих измерений. В прогнозах отмечается занижение умеренных скоростей ветра (5–10 м/с) на величину от 2,2 до 2,4 м/с. В целом прогнозное поле ветра получается более сглаженным по сравнению с данными наблюдений.

В табл. 3 приведены оценки качества прогноза 12 часовых сумм осадков. Видно, что модель практически всегда их завышает. Это происходит во всех диапазонах интенсивности наблюдавшихся осадков и, вероятно, связано с недостаточно точной настройкой параметризации физических процессов для данного района. В первую очередь это касается параметризации микрофизики облаков и конвекции.

Таблица 3

Оценки качества прогноза осадков с 13 по 20.08.2023 г.

Диапазон 12 часовых сумм осадков, мм/12 ч	Число станций	Количество наблюдений	МЕ, мм/12 ч	MAE, мм/12 ч
<i>Расширенная область</i>				
Все данные	16	226	2,61	3,95
Без осадков	16	137	1,31	1,31
0...1	16	33	4,14	4,46
1...3	16	14	3,34	5,23
3...15	16	19	5,05	10,01
15...50	16	22	8,23	11,39
<i>Область расчета</i>				
Все данные	5	76	4,37	4,56
Без осадков	5	53	2,54	2,54
0...1	5	8	4,90	5,12
1...3	5	2	–0,66	2,27
3...15	5	6	13,49	14,57
15...50	5	7	11,22	11,11

Для улучшения прогноза требуется более детальный анализ на большом временном интервале. Необходимы также дополнительные эксперименты с другими параметризациями микрофизики облаков и параметров конвекции.

5. Анализ результатов прогноза загрязнения приземной атмосферы

В данной работе поля концентраций загрязняющих веществ рассчитывались с использованием химического блока MELCHIOR-1 с учетом антропогенных полей эмиссий, базы данных EDGAR-HTAP, актуализированных в 2011 г., с горизонтальным разрешением $0,1 \times 0,1^\circ$. Эмиссии лесных пожаров при расчетах не учитывались. Базой данных о землепользовании служила GlobCover. Расчетный домен составил 100×100 узлов с горизонтальным шагом сетки 2 км. По вертикали было задано 20 уровней с давлением на верхней границе 200 гПа.

Область прогноза концентраций загрязняющих веществ располагалась практически в центре расчетного домена.

Для оценки качества воспроизведения уровня загрязнения воздуха с помощью ХТМ в качестве натурных измерений брались данные наблюдений на станциях мониторинга качества воздуха, расположенных в окрестностях г. Иркутска. Точное местоположение станций доступно на сайте [17]. На этих станциях производится мониторинг основных загрязняющих веществ, а средние за сутки концентрации приводятся в таблицах. Именно эти параметры и принимались в качестве исходных значений. Поля концентраций рассчитывались ХТМ для каждого часа, а затем усреднялись посуточно. Тестовые расчеты проводились с 13 по 20.08.2023 г. Краткое описание результатов и оценок качества прогнозов приведены ниже.

На рис. 5 представлена изменчивость средних за сутки концентраций на станциях мониторинга качества воздуха Иркутской области, а также расчетная концентрация, полученная ХТМ и взятая в ближайших к наблюдательным станциям мониторинга ячейках. Как видно из рис. 5, систематическая ошибка прогноза наблюдается практически на всех станциях мониторинга. При этом величина отклонения соответствует абсолютной ошибке с обратным знаком, что говорит о систематическом, а не статистическом характере отклонения. Модель занижает прогностические значения концентраций на $150\text{--}300 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$, а на отдельных станциях — до $600 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$, что, вероятно, связано с недооценкой транспортной нагрузки при расчете полей эмиссий, а также дополнительным вкладом в наблюдаемые уровни загрязнения воздуха продуктов горения лесных пожаров. Подпрограмма расчета эмиссий в ходе вычислений, как правило, применяет маску улично-дорожной сети при перераспределении эмиссии, однако для восточных регионов РФ такие данные отсутствуют. Кроме того, занижение рассчитанных концентраций может быть также частично связано с отсутствием периода «разогрева» ХТМ при старте с глобальных начальных условий.

На рис. 6 приведены данные анализа прогнозов на сутки вперед концентраций взвешенных частиц размером менее 10 мкм (PM_{10}). Как видно, общая картина существенно не отличается от прогноза концентраций оксида углерода. Также наблюдается систематическое занижение прогностических концентраций. Для некоторых районов систематическая ошибка составляет до 50% от наблюдаемой величины.

В то же время полученные результаты являются лишь отражением тестовых расчетов для короткого периода времени и не могут служить надежными оценками работы ХТМ. Для получения статистически надежных оценок необходимо иметь более длительные ряды наблюдение/прогноз, а также данные наблюдений более высокого разрешения по времени.

Выявленные систематические погрешности однозначно указывают на занижение ХТМ расчетных

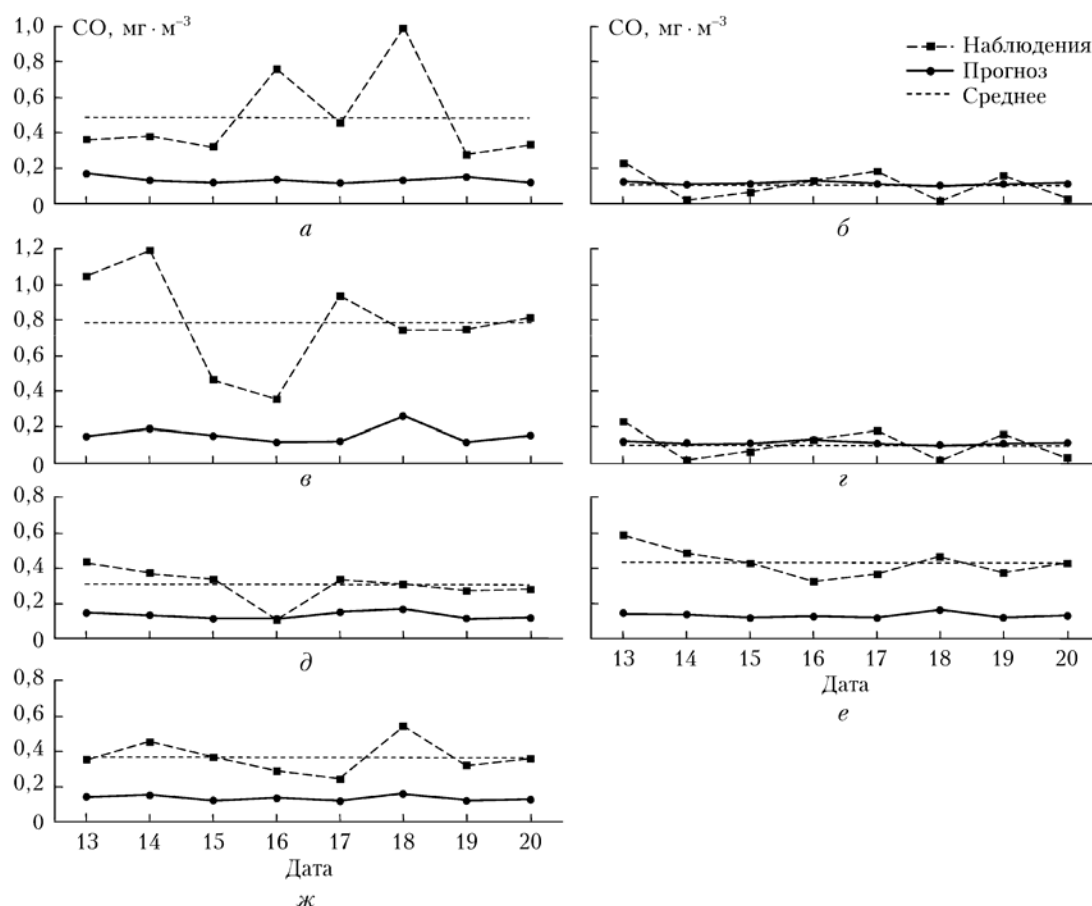


Рис. 5. Изменчивость средних за сутки концентраций СО на станциях мониторинга качества атмосферного воздуха Иркутской области 13–20.08.2023 г.: *а* – Ангарск, ул. Московская, 30, $ME = -0,353$, $MAE = 0,353$, $\sigma^2 = 0,057$; *б* – Байкальск, Промбаза, МС, $ME = 0,009$, $MAE = 0,067$, $\sigma^2 = 0,006$; *в* – Иркутск, ул. Лермонтова, д. 317, $ME = -0,629$, $MAE = 0,629$, $\sigma^2 = 0,068$; *г* – Иркутск, ул. Мира, д. 101, $ME = -0,152$, $MAE = 0,152$, $\sigma^2 = 0,005$; *д* – Шелехов, Комсомольский бульвар, д. 14, $ME = -0,171$, $MAE = 0,173$, $\sigma^2 = 0,008$; *е* – Черемхово, ул. Шевченко, д. 72, $ME = -0,300$, $MAE = 0,300$, $\sigma^2 = 0,006$; *ж* – Усолье-Сибирское, ул. Интернациональная, д. 52, $ME = -0,230$, $MAE = 0,230$, $\sigma^2 = 0,008$

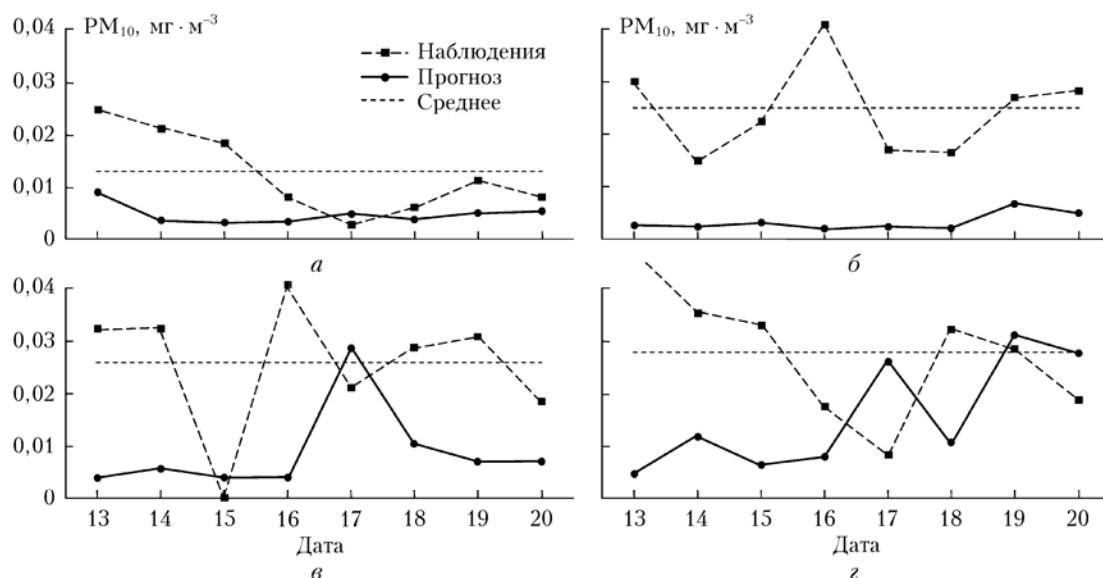


Рис. 6. Изменчивость средних за сутки концентраций PM_{10} на станциях мониторинга качества атмосферного воздуха Иркутской области 13–20.08.2023 г.: *а* – Ангарск, ул. Московская, 30, $ME = -0,008$, $MAE = 0,008$; *б* – Байкальск, Промбаза, МС, $ME = -0,021$, $MAE = 0,021$; *в* – Иркутск, ул. Мира, д. 101, $ME = -0,016$, $MAE = 0,019$; *г* – Шелехов, Комсомольский бульвар, д. 14, $ME = -0,012$, $MAE = 0,019$

значений, но при этом модуль величины отклонения и абсолютная погрешность равны, что указывает на возможность потенциально успешного применения постобработки полученных результатов с помощью введения поправочных коэффициентов. Подобная практика применяется и в части постпроцессинга моделей атмосферы, в том числе современными нейросетевыми методами, и может быть использована в ХТМ [18, 19]. Величина ошибки расчетных концентраций PM_{10} , полученных в данном эксперименте, в целом сопоставима с погрешностями прогноза, полученными в других работах [20]. Кроме того, летом 2023 г. на территории Восточной Сибири наблюдались ландшафтные пожары, влияние которых при расчетах не учитывалось, так как основная задача настоящей статьи — показать возможность разработки и применения качественно нового и доступного для многих специалистов инструмента.

Заключение

Впервые в нашей стране создана современная система оперативного и аварийного расчета переноса и осаждения химически активных веществ и пассивных примесей на базе комплекса атмосферной и транспортной моделей, объединенных графическим интерфейсом и представлением результатов расчета в виде трехмерного облака точек на физическом рельефе местности. Возможность задания параметров аварийного выброса загрязняющих веществ в произвольно выбранной точке дает возможность оперативно изучать распространение загрязнений в атмосфере в реальных условиях. Система полностью автоматизирована и адаптирована к использованию в любом произвольно выбранном районе РФ, что позволяет применять ее в качестве инструмента принятия решений по оценке и минимизации последствий аварий в работе ситуационных центров.

Представленные в настоящей статье первые оценки результатов являются лишь демонстрацией тестовых расчетов для короткого периода. Для получения статистически надежных показателей созданной системы необходимы результаты измерений концентраций загрязняющих веществ за более продолжительные периоды, а также соответствующие по пространственно-временному разрешению данные натурных наблюдений.

Список литературы

1. Kukkonen J., Olsson T., Schultz D.M., Baklanov A., Klein T., Miranda A.I., Monteiro A., Hirtl M., Tarvainen V., Boy M., Peuch V.-H., Poupkou A., Kioutsioukis I., Finardi S., Sofiev M., Sokhi R., Lehtinen K.E.J., Karatzas K., San José R., Astitha M., Kallos G., Schaap M., Reimer E., Jakobs H., Eben K. A review of operational, regional-scale, chemical weather forecasting models in Europe // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12, N 1. P. 1–87. DOI: 10.5194/acp-12-1-2012.
2. Нахаев М.И., Березин Е.В., Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Коновалов И.Б., Блинов Д.В. Прогнозирование концентраций загрязняющих веществ в атмосфере с применением химической транспортной модели CHIMERE и модели COSMO-Ru7 // *Труды Гидрометцентра России*. 2015. Вып. 357. С. 146–164.
3. Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Ткачева Ю.В., Ривин Г.С., Курсанов А.А., Борисов Д.В., Лезина Е.А. Система прогнозирования качества воздуха на основе химических транспортных моделей // *Гидрометеоролог. исслед. и прогнозы*. 2019. № 4 (374). С. 203–218.
4. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D., Barker D., Duda M., Huang X.-Y., Wang W., Powers J.G. Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note. DOI: 10.5065/D68S4MVH.
5. He C., Valayamkunnath P., Barlage M., Chen F., Gochis D., Cabell R., Schneider T., Rasmussen R., Niu G.-Y., Yang Z.-L., Niyogi D., Ek M. NCAR IS SPONSORED BY THE NSF, 2023: The community Noah–MP land surface modeling system technical description Version 5.0 No. NCAR/TN-575+STR. 284 p. DOI: 10.5065/ew8g-yr95.
6. Thompson G., Field P., Rasmussen R., Hall W. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization // *Mon. Weather Rev.* 2008. V. 136. P. 5095–5115. DOI: 10.1175/2008MWR2387.1.
7. Iacono M.J., Delamere J.S., Mlawer E.J., Shephard M.W., Clough S.A., Collins W.D. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. P. D13103. DOI: 10.1029/2008JD009944.
8. Park S., Bretherton C.S. A new moist turbulence parameterization in the Community Atmosphere Model // *J. Clim.* 2009. V. 22. P. 3422–3448. DOI: 10.1175/2008JCLI2556.1.
9. Jimenez P.A., Dudhia J., Gonzalez–Rouco J.F., Navarro J., Montavez J.P., Garcia–Bustamante E. A revised scheme for the WRF surface layer formulation // *Mon. Weather Rev.* 2012. V. 140. P. 898–918. DOI: 10.1175/MWR-D-11-00056.1.
10. Niu G.-Y., Yang Z.-L., Mitchell K.E., Chen F., Ek M.B., Barlage M., Kumar A., Manning K., Niyogi D., Rose-ro E., Tewari M., Xia Y. The community Noah land surface model with MultiParameterization options (Noah–MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. P. D12109. DOI: 10.1029/2010JD015139.
11. Yang Z.-L., Niu G.-Y., Mitchell K.E., Chen F., Ek M.B., Barlage M., Longuevergne L., Manning K., Niyogi D., Tewari M., Xia Y. The community Noah land surface model with MultiParameterization options (Noah–MP): 2. Evaluation over global river basins // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. P. D12110. DOI: 10.1029/2010JD015140.
12. Grell G.A., Devenyi D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. P. 1693. DOI: 10.1029/2002GL015311.
13. Wesely M. Parameterization of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models // *Atmos. Environ.* 1989. V. 23. P. 1293–1304.
14. Grell G.A. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations // *Mon. Weather Rev.* 1993. V. 121. P. 764–787. DOI: 10.1175/1520-0493(1993)121<0764:PEOAUB>2.0.CO;2.
15. Emberson L.-D., Simpson D., Tuovinen J.-P., Ashmore M.-R., Cambridge H.-M. Towards a model of ozone deposition and stomatal uptake over Europe. Technical report, 2000. EMEP/MS-CW 2000.

16. *Руководящий документ* РД 52.27.724–2019 *Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения*. М.: Типография АМА-ПРЕСС, 2019. 66 с.
17. *Федеральный информационно-исследовательский центр Росгидромета*. URL: https://www.feerc.ru/baikal/ru/monitoring/air/ask_overall (дата обращения: 02.02.2024).
18. *Krasnopolsky V.M.* The Application of Neural Networks in the Earth System Sciences: Neural Networks Emulations for Complex Multidimensional Mappings. Springer, 2013. 206 p. DOI: 10.1007/978-94-007-6073-8.
19. *Быков Ф.Л.* Статистическая коррекция прогнозов погоды по модели COSMO с помощью нейронных сетей // *Метеорол. и гидрол.* 2020. № 3. С. 5–20.
20. *Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Кирсанов А.А., Борисов Д.В., Ткачева Ю.В., Ривин Г.С., Лезина Е.А.* Тестирование и перспективы технологии прогнозирования загрязнения воздуха с применением химических транспортных моделей CHIMERE и COSMO-Ru2ART // *Гидрометеорол. исслед. и прогнозы.* 2022. № 4. С. 147–170. DOI: 10.37162/2618-9631-2022-4-6-29.

R.Yu. Ignatov, M.I. Nakhaev, K.G. Rubinstein, V.Yu. Tsepelev, D.S. Shaposhnikov, D.Yu. Obukhov, A.V. Rodin, A.V. Sedov. A system for predicting the transport of pollutants in the atmosphere for Russian regions.

A system has been created for numerical prediction of concentrations of pollutants in the atmosphere and their deposition to the ground using the Chimere chemical transport model, which takes into account emissions from stationary, emergency, and mobile sources. The forecast of meteorological fields was carried out using the regional high-resolution non-hydrostatic atmospheric model WRF-ARW. The system is fully automated, which allows it to be used as a tool for quickly obtaining operational information in the work of situation centers and decision-making centers in the cases of industrial, natural, and man-made emergencies. The results of testing the system showed its operability, the possibility of using it in operational and research work, as well as in scenarios of development of emergency situations anywhere in the country and implementation of measures to assess and eliminate the consequences of accidents. The first results of the calculation of atmospheric pollution with the system are presented. They can be considered as test. To obtain statistically reliable results, it is necessary to have longer series of measurements of atmospheric pollution concentrations and of higher resolution.

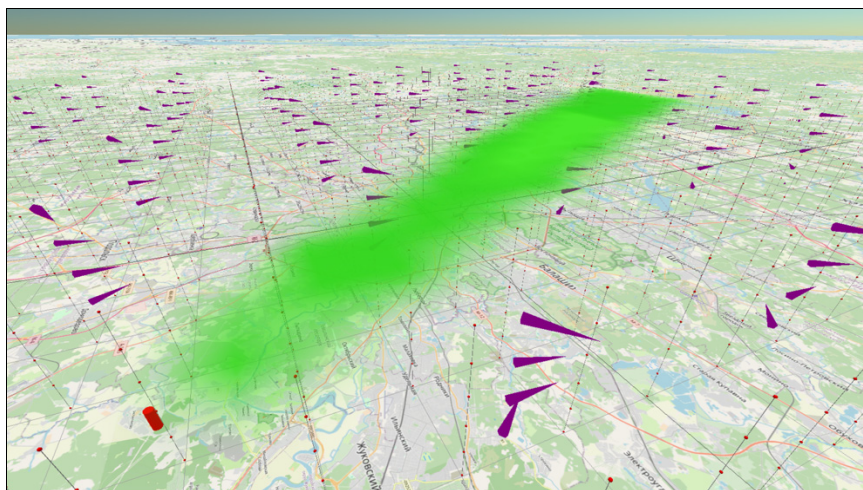


Рис. 2. Пример визуализации расчета выброса диоксида азота из точечного источника и визуализация поля ветра в узлах сетки по высотам

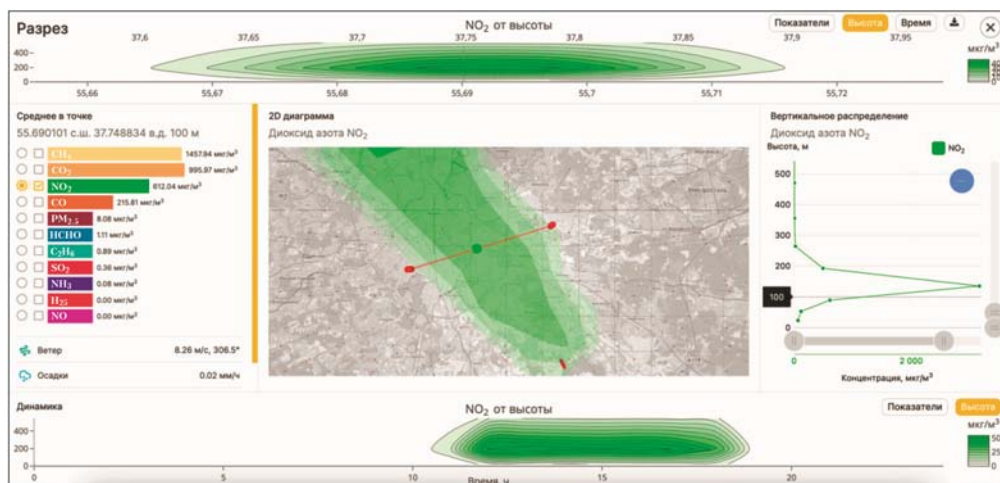


Рис. 3. Пример визуализации модельных расчетов концентрации диоксида азота в разрезе

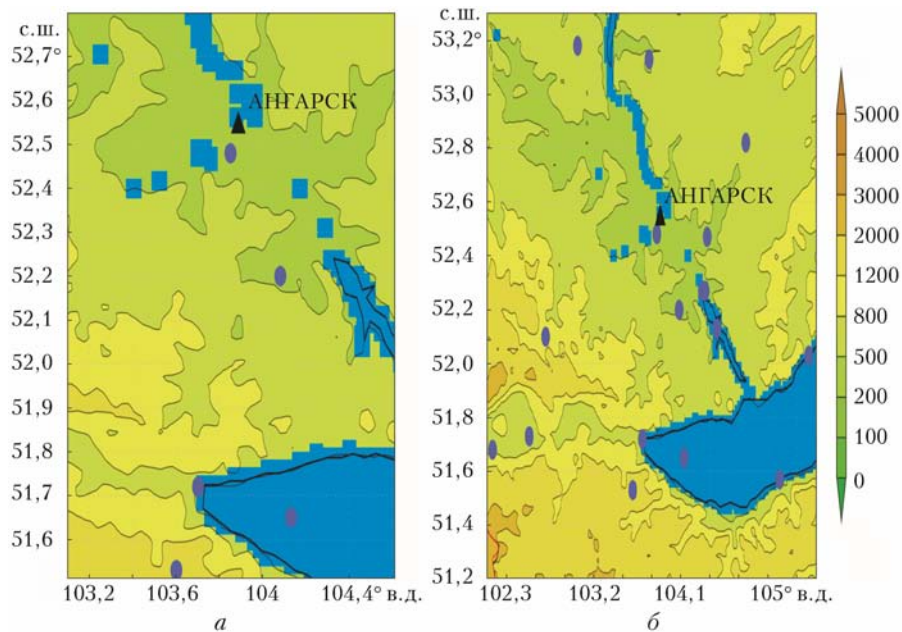


Рис. 4. Карта численного прогноза метеополей с разрешением 2 (а) и 6 км (б); синими кружками обозначены наблюдательные станции, по которым рассчитывались оценки прогноза