Системы контроля окружающей среды № 2 (56) 2024

https://elibrary.ru/ctdvit

УДК 504.3. DOI: 10.33075/2220-5861-2024-2-21-28

АЛГОРИТМ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛЕЙ РАЗЛИЧНОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО МАСШТАБА ДЛЯ ОЦЕНКИ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ С УЧЕТОМ СЛОЖНОГО РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ

А.А. Егоркин[1,2,3], А.П. Куликова[1]

[1]Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
[2]ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
[3] ФГКВОУ ВПО «Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище им. П.С. Нахимова», РФ, г. Севастополь, ул. Дыбенко, 1а

E-mail: egorkin1974@yandex.ru

Работа посвящена выработке алгоритма применения моделей различного пространственного масштаба для оценки негативного воздействия на атмосферный воздух. В начале исследования обосновывается выбор моделей для проведения вычислительного эксперимента. Далее описывается набор данных, необходимых для моделирования. Видом загрязняющих веществ выбраны твердые частицы с диаметром 10 мкм, как наиболее часто используемые в исследованиях по данной тематике. Проведен анализ стационарных полей распространения загрязняющих веществ, сгенерированных с помощью мезомасштабной модели (GRAMM) в сочетании с Лагранжевой моделью (GRAL) для четырех синоптических ситуаций (средний месяц каждого сезона 2023 года). Проведена оценка влияния метеорологических условий, рельефа местности, зданий (сооружений). Подтверждено, что ведущую роль на распространение загрязняющих веществ оказывает скорость ветра и стратификация атмосферы. Определено, что совокупность исследуемых факторов оказывает комплексное влияние на рассеивание загрязняющих веществ и, при оценке воздействия загрязняющих веществ, этот факт необходимо учитывать.

Ключевые слова: мезомасштабные модели, дисперсионные модели, атмосфера, метеорология, климатология.

Поступила в редакцию: 20.05.2024. После доработки: 09.06.2024. Принята к печати: 27.06.2024.

Введение. Так как установление и обслуживание обширной сети мониторинга качества воздуха достаточно дорогая процедура, в качестве альтернативы в настоявшее время прибегают к моделированию качества воздуха для прогнозирования концентраций загрязняющих веществ. В настоящее время актуальным является разработка эффективных методов оценки негативного воздействия на атмосферный воздух от выбросов загрязняющих веществ на основе моделирования распространения загрязняющих веществ.

В качестве одного из видов загрязняющих веществ атмосферного воздуха, как наиболее часто используемые в исследованиях по данной тематике, для исследования были выбраны твердые частицы диаметром 10 мкм (PM_{10}) [1]. В связи с этим мониторинг концентраций PM_{10} является актуальной задачей.

При разработке методов необходимо было учитывать сложный рельеф местности, характерный для приморских прибрежных территорий, поскольку он оказывает самое существенное влияние на процесс рассеивания в атмосфере, а также изменчивость метеорологических условий в течение исследуемого временного периода.

Цель и постановка задач. Гидрометеорологические условия оказывают существенное влияние на распространение загрязняющих веществ в условиях сложного рельефа, и учет этих факторов позволит более точно определить места наибольшей концентрации загрязнений

и разработать эффективные меры их уменьшения.

Целью работы является изучение влияния гидрометеорологических условий на распространение загрязняющих веществ в условиях сложного рельефа. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Выбор расчетной схемы моделирования рассеивания загрязняющих веществ.
2. Выбор параметров источников загрязнения для применения в исследовании.
3. Анализ особенностей гидрометеорологических условий модельного региона приморской территории.
4. Оценка влияния рельефа и гидрометеорологических условий на процессы переноса загрязняющих веществ.

Материалы и методы. В настоящее время основной моделью, которая используется для оценки негативного воздействия на атмосферный воздух является методика, изложенная в источнике [2] и она имеет ряд недостатков:

– модель явно не учитывает при расчете рассеивания загрязняющих веществ сложные ландшафты (требуются сложные вычисления влияния перепада высот);

– модель не использует в расчетах данные о типе почвенного покрова, которые определяют локальный тепловой баланс и поверхностные воздушные потоки из-за различного альбедо, растительности, неравномерности и теплопроводности;

– модель явно не учитывает здания при расчете рассеивания (при расчетах часто используется расчетная сетка размером большим, чем само здание, что не позволяет проводить детальную оценку распространения концентраций).

Основываясь на результатах исследований, проведенных в работах [3, 4, 5], которые демонстрируют преимущества Лагранжевых моделей для сложных ландшафтов и используют методологию комплексного использования моделей различного пространственного разрешения для прогнозирования распространения загрязняющих веществ в атмосфере, были выбраны модели Graz Mesoscale Model (GRAMM) и Graz Lagrangian model (GRAL) [6], которые были использованы для моделирования рассеивания загрязняющих веществ от источников.

Первичные воздушные потоки рассчитываются мезомасштабной метеорологической моделью с использованием алгоритма GRAMM, основанного на усредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса (RANS equations) и законе сохранения массы.

Модель GRAL моделирует дисперсию частиц загрязняющих веществ от источников вдоль воздушного потока в 3D-модели. Это означает, что в моделировании учитываются топография, свойства поверхности и здания.

В качестве объекта для исследования была выбрана типичная приморская территория с характерными особенностями рельефа и метеоусловий. Для исследования был выбран район промышленных выбросов, которые вероятно могут наносить вред близлежащей жилой застройке, с этой целью была проанализирована публичная кадастровая карта региона и реестр объектов негативного воздействия на окружающую среду.

Источники выбросов определены методом анализа публичных данных из реестра Федеральной службы по надзору в сфере природопользования - Росприроднадзора. В качестве загрязняющих веществ для исследования, как отмечено выше, выбраны частицы PM_{10} и был составлен реестр источников выбросов PM_{10}. Для района исследования выделено 102 источника из них - 55 площадных источников и 47 точечных, и был составлен реестр источников выбросов PM_{10}.

Были определены параметры для площадных источников: высота источника (м); площадь ($м^2$), для точечных – высота источника (м); диаметр устья трубы (м); объём (куб.м), скорость (м/с) и температура (°C) газовоздушной смеси. В работе было принято допущение (в связи с отсутствием данных) о непрерывной работе источников выбросов. Информация о топографии местности была оцифрована (рис. 1, 2).

В модели GRAMM 3D-модель рельефа была основана на расширенных данных Shuttle Land Elevation от Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) [7] в формате GeoTIFF с пространственным разрешением 50 м.

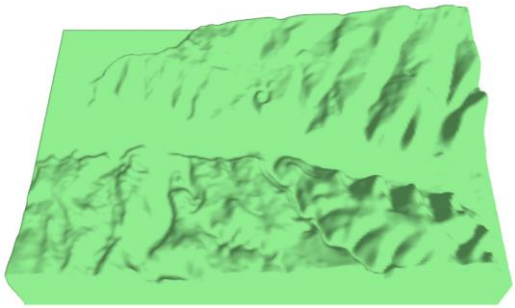


Рис. 1. 3D – модель рельефа, смоделированная GRAMM
Fig. 1. 3D terrain model modeled by GRAMM

В модели GRAL применялся ландшафтный слой с пространственным разрешением 4 м на пиксель и в дальнейшем использовался для размещения зданий. GeoTIFF был преобразован в формат ASCII (American standard code for information interchange) [8], который использовался в модели (рис. 2).

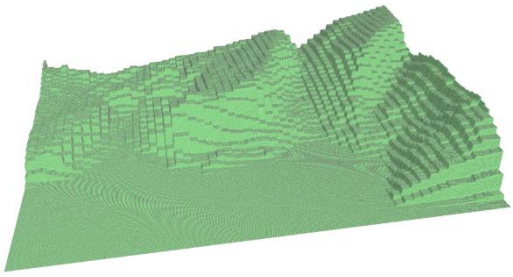


Рис. 2. 3D - модель рельефа, смоделированная GRAL
Fig. 2. 3D terrain model modeled by GRAL

Вычисления полей ветра в мезомасштабной модели требуют файла землепользования и рельефа. Сведения о землепользовании были взяты из данных службы мониторинга земель Copernicus (CLMS), которые находятся в открытом доступе.

Для определения категорий землепользования района исследования данные визуализированы на платформе QGIS, затем выделен район согласно размеру домена мезомасштабного моделирования (рис. 3).

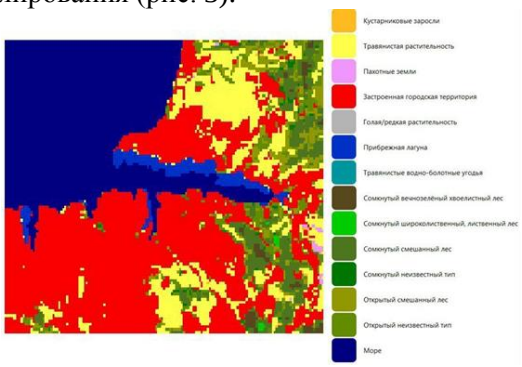
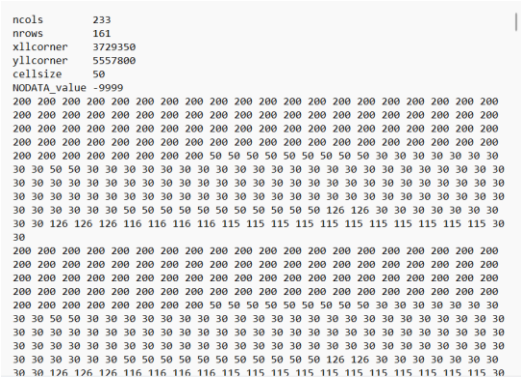


Рис. 3. Пример карты землепользования
Fig. 3. Example of a land use map

Далее данные интерполированы в формат файла txt, содержащий код для каждой точки сетки, с шагом 50 м и «шапочку» с размерами сетки и координатами района исследования (рис. 4).



```
ncols        233
nrows        161
xllcorner    3729350
yllcorner    5557800
cellsize     50
NODATA_value -9999
200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200
200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200
200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200
200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200
200 200 200 200 200 200 200 200 50 50 50 50 50 50 50 50 30 30 30 30 30 30 30
30 30 50 50 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30
30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30
30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30
30 30 30 30 30 30 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 126 126 30 30 30 30 30 30 30
30 30 126 126 126 116 116 116 115 115 115 115 115 115 115 115 115 115 115 115 30
30
200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200
200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200
200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200
200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200
200 200 200 200 200 200 200 200 50 50 50 50 50 50 50 50 30 30 30 30 30 30 30
30 30 50 50 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30
30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30
30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30
30 30 30 30 30 30 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 126 126 30 30 30 30 30 30 30
30 30 126 126 126 116 116 116 116 115 115 115 115 115 115 115 115 115 115 115 30
```

Рис. 4. Пример файла в формате txt, отражающий коды землепользования
Fig. 4. An example file in txt format reflecting land use codes

Файл включает в себя категории: кустарниковые заросли; травянистая растительность; пахотные земли; застроенная городская территория; голая/редкая растительность; прибрежная лагуна; травянистые водно-болотные угодья; сомкнутый вечнозелёный хвоелистный лес; сомкнутый вечнозелёный широколиственный, лиственный лес; сомкнутый смешанный лес; море.

Препятствиями для рассеивания загрязняющих веществ являлись здания и иные постройки. На основе наборов дан-

ных картографического сервиса (OSM) был разработан специальный векторный слой в Shp-формате, характеризующий гражданские и промышленные объекты. Для зданий, у которых отсутствует атрибут высоты, была взята информация из картографической системы 2GIS: высота здания была рассчитана через параметр количества этажей и коэффициент 3,2 м на каждый этаж (с учетом чердаков и технических помещений).

Из архива были взяты метеорологические данные: с сайта rp5.ru, за исследуемый год (2023 год). Исходный файл был обработан и переконвертирован в формат, используемый программами. Отредактированный файл содержит в себе численные значения, записанные через запятую по пяти параметрам: дата, время, скорость ветра, направление ветра, коэффициент устойчивости атмосферы (рис. 5).

Дата и время за сутки – 8 измерений, каждые 3 часа. Скорость ветра, измеренная в м/с.

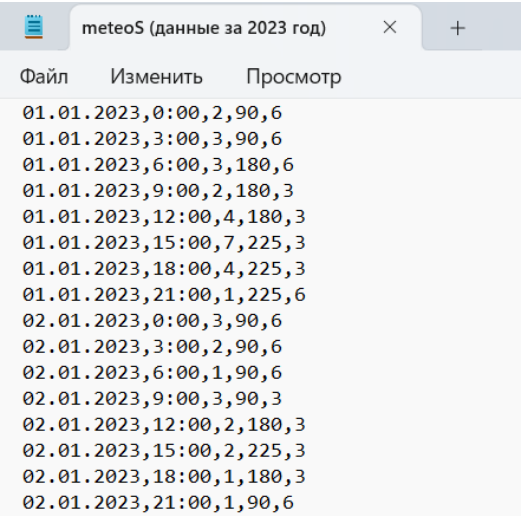


Рис. 5. Метеорологический файл в формате txt
Fig. 5. Meteorological file in txt format

Направление ветра, измеренное на высоте 10–12 метров над земной поверхностью, осреднённое за 10-минутный период, в исходном файле измеряется в румбах; для файла, применяемого в программе (MET), выполнен перевод из румбов в градусы.

Направление ветра имеет следующую классификацию: дующий с севера - 360°, с востока – 90°, с юга – 180°, с запада – 270°, с северо-востока – 45°, с юго-востока – 135°, с юго-запада – 225°, с северо- запада – 315°.

Значения коэффициента стратификации атмосферы варьируются от A – G (1–7).

В файле формата MET были использованы числовые значения от 1 - 6, что соответствует буквенному обозначению от A – F, в табл. № 1.

Таблица 1. Классы устойчивости по Пасквиллу

Класс, стратификация атмосферы	Типичная скорость ветра, м/с	Описание погоды	Вертикальный градиент температуры, К/м
A *неустойчивая*	1	Безоблачно	>>> 0,01
B *неустойчивая*	2	Солнечно и тепло	>> 0,01
C *неустойчивая*	5	Переменная облачность в течение дня	> 0,01
D *нейтральная*	5	Облачный день или облачная ночь	<< 0,01
E *устойчивая*	3	Переменная облачность в течение ночи	< 0,01
F *устойчивая*	2	Ясная ночь	Инверсия (отрицательный градиент)

Категории F и G часто не разделяются, категорию G рекомендуется включать в категорию F. Эти две категории характерны для ночных условий при инверсии температуры в нижнем слое атмосферы

Коэффициент устойчивости атмосферы рассчитан вручную для каждого срока наблюдения, ориентируясь на таблицу, сформированную по методике Пасквилла.

Анализ расчета розы ветров за четыре исследуемых месяца показан на рис. 6. Скорость ветра равная 2–3 м/с для исследуемого временного интервала соответствует тридцати процентам.

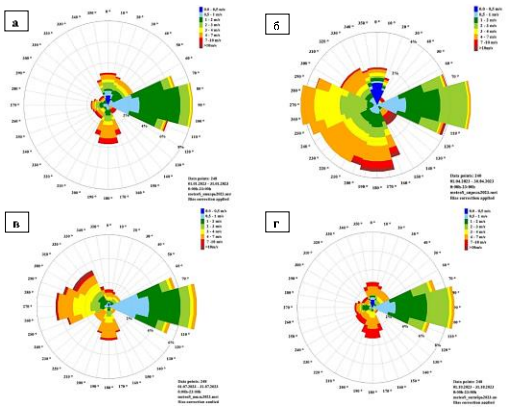


Рис. 6. Розы ветров (а–январь, б–апрель, В–июль, г–октябрь 2023 г.)
Fig. 6. Wind roses (a–January, b–April, c–July, d–October 2023)

При этом среднегодовая скорость ветра составляет 3.7 м/с. Повторяемость штилевых условий не превышает 3%, для всех выбранных месяцев, что соответствует условиям исследуемого региона. Преобладающим направлением ветра определено как восточное для всех случаев. Результаты показывают, что наибольшие скорости ветра составляли 7–10 м/с с частотой повторяемости около 4%. В течение суток наибольшие средние скорости ветра наблюдались в 15:00 для всех месяцев. Скорость ветра менее 1,0 м/с отмечалась примерно в 30% случаев.

Анализ расчета розы классов устойчивости атмосферы за четыре исследуемых месяца представлен на рис. 7.

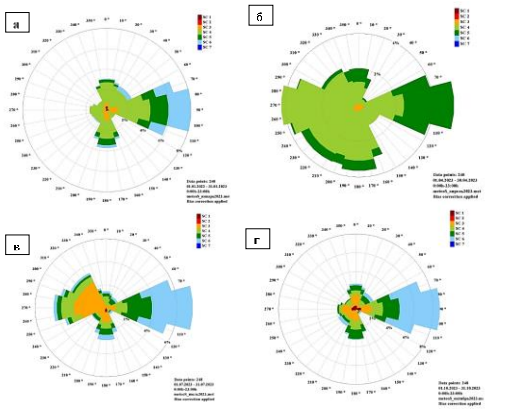


Рис. 7. Розы классов устойчивости (а–январь, б–апрель, в–июль, г–октябрь 2023 г.)
Fig. 7. Roses of stability classes (a–January, b-April, c-July, d-October 2023)

По результатам можно сделать вывод о преобладающих нейтральных и стабильных условиях, способствующих высотному переносу веществ, но отрицательно влияющих на перенос от низких источников.

Далее в работе представлены результаты расчетов распространения концентраций загрязняющих веществ согласно выбранным временным интервалам (рис. 8–12).

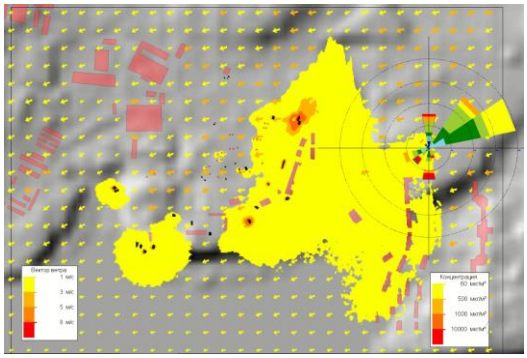


Рис. 8. Максимальная среднесуточная концентрация PM_{10} на карте рельефа, январь 2023 (GRAL)
Fig. 8. The maximum average daily concentration of PM10 on the relief map, January 2023(GRAL)

Так же в работе проведен анализ влияния осадков на распространение загрязняющих веществ с визуализацией области возможного их выпадения (рис. 9).

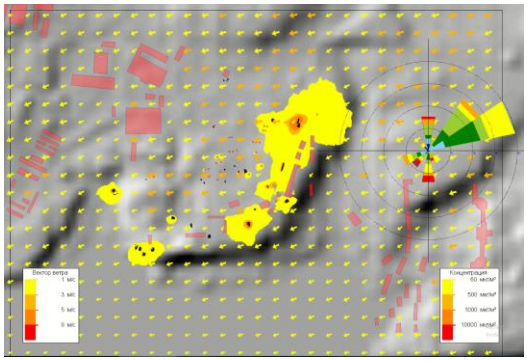


Рис. 9. Максимальная среднесуточная концентрация PM_{10} на карте рельефа, январь 2023, влияние осадков (GRAL)
Fig. 9. The maximum average daily concentration of PM10 on the relief map, January 2023, impact of precipitation (GRAL)

Месяц январь был выбран для моделирования как период с наибольшей повторяемостью образования осадков и наибольшей областью распространения загрязняющего вещества среди четырех месяцев.

Анализ метеорологических данных и распространения загрязняющих веществ в январе свидетельствует о влиянии стратификации на этот процесс по сравнению с другими месяцами.

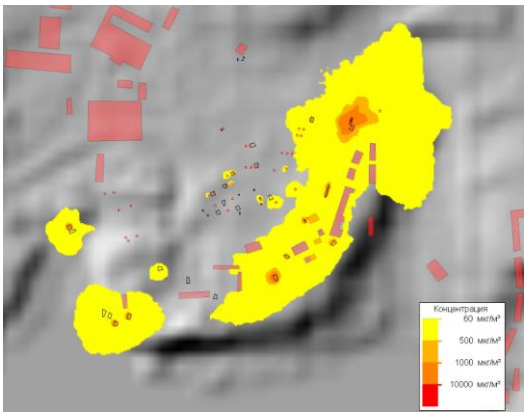


Рис. 10. Максимальная среднесуточная концентрация PM_{10} на карте рельефа, апрель 2023 (GRAL)
Fig. 10. The maximum average daily concentration of PM10 on the relief map, April 2023 (GRAL)

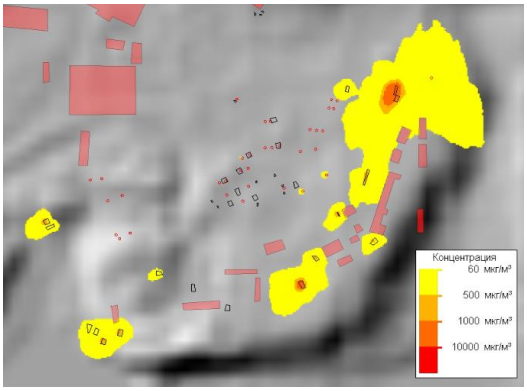


Рис. 11. Максимальная среднесуточная концентрация PM_{10} на карте рельефа, июль 2023 (GRAL)
Fig. 11. The maximum average daily concentration of PM10 on the relief map, July 2023 (GRAL)

Во всех четырех случаях заметно влияние местности на процесс рассеивания загрязняющих веществ. Источники

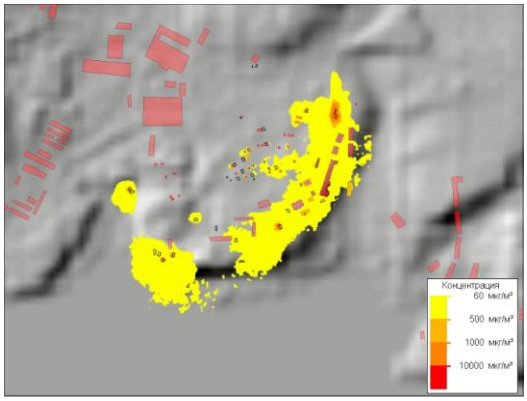


Рис. 12. Максимальная среднесуточная концентрация PM_{10} на карте рельефа, октябрь 2023 (GRAL)
Fig. 12. The maximum average daily concentration of PM10 on the relief map, October 2023 (GRAL)

выбросов расположены на возвышенности над морской акваторией и эта местность по сравнению с другими характеризуется усилением скорости ветра, что в свою очередь способствует лучшему рассеиванию. Эту зависимость хорошо иллюстрирует рис. 8. Где скорость ветра выше, концентрация загрязняющих веществ практически отсутствует.

Здания и сооружения выступают как препятствия, образуя зону застоя и способствуя накоплению загрязняющего вещества.

Заключение. В результате проведенного исследования в соответствии с поставленными задачами можно предложить следующий алгоритм применения моделей различного пространственного масштаба и сделать выводы по работе.

1. На основе анализа литературных источников была выбрана методология проведения исследования, определены тип и вид моделей для проведения вычислительных экспериментов. Для проведения мезомасштабного моделирования ветровых потоков выбрана модель GRAMM. В свою очередь для моделирования дисперсии распространения загрязняющих веществ в сложном рельефе выбрана модель GRAL.

2. Собрана информация об основных источниках загрязнения в выбранной местности и проведен ее анализ. Определено, что основными источниками за-

грязнения являются промышленные выбрасывающие в атмосферу твердые загрязняющие вещества PM_{10}.

Частицы характеризуются высоким риском для здоровья человека при попадании в легкие и оказывают негативное воздействие на флору и фауну акваторий. Поэтому исследование было посвящено анализу распространения данных частиц в атмосферном воздухе и определении границ возможных зон риска для населения и морской акватории.

3. На основе собранных данных проведена работа по созданию цифровых моделей местности исследуемой территории для двух численных моделей с различным шагом сетки.

4. Проведен анализ спутниковых снимков и разработана карта землепользования исследуемого региона.

5. На основе полученных модельных данных проведен анализ особенностей гидрометеорологических полей исследуемого региона для четырёх центральных месяцев каждого сезона 2023 года: январь, апрель, июль, октябрь.

6. В соответствии с рекомендациями модели GRAL были определены классы устойчивости гидрометеоусловий. Выявлена наибольшая повторяемость этих классов для каждого месяца. По результатам можно сделать вывод о преобладающих нейтральных и стабильных условиях, способствующих высотному переносу веществ, но отрицательно влияющих на перенос от низких источников.

8. Можно сделать вывод о влиянии гидрометеорологических факторов на процессы рассеивания загрязняющих веществ, который проявляется в том, что во время устойчивой стратификации атмосферы и низкой скорости ветра – 0 – 2 м/с (штиль) загрязняющие вещества застаиваются в балках и городских каньонах.

9. При оценке воздействия загрязняющих веществ на приморские территории необходимо учитывать многообразие метеорологических факторов, параметры подстилающей поверхности.

10. Совместное использование мезомасштабной модели и дисперсионной дает больше преимуществ для оценки воздействия загрязняющих веществ на атмосферу, обеспечивает достаточный уровень достоверности оценки концентраций загрязняющих веществ в поверхностном слое и позволяет оценить вклады источников загрязняющих веществ в суммарную концентрацию в любой точке моделируемой области.

Исследование выполнено частично в рамках государственного задания Института природно-технических систем по теме *«Фундаментальные и прикладные исследования закономерностей и механизмов формирования региональных изменений природной среды и климата под влиянием глобальных процессов в системе океан-атмосфера» (№ госрегистрации 124013000609-2).*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *W.H. Organizations*, Global urban ambient air pollution database. URL https:www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/

2. *Приказ* Министерства природных ресурсов № 273 от 6 июня 2017 года. URL:https://minjust.consultant.ru/files/36322

3. *Berchet A., Zink K., Oettl D., Brunner J., Emmenegger L., Brunner D.* Evaluation of high-resolution GRAMM–GRAL (v15.12/v14.8) NOx simulations over the city of Zürich, Switzerland. Geoscientific Model Development. 2017. Vol. 10. P. 3441–3459.

4. *Oettl D., Veratti G.* A comparative study of mesoscale flow-field modelling in an Eastern Alpine region using WRF and GRAMM-SCI. Atmospheric Research. 2021. Vol. 249. P. 105288.

5. *Ling H., Lung S.-C.C., Uhrner U.* Micro-scale particle simulation and traffic-related particle exposure assessment in an Asian residential community. Environmental Pollution. 2020. Vol. 266. P. 115046.

6. *Graz* Lagrangian Model. Available online: URL: https://gral.tugraz.at/

7. *Shuttle* Radar Topography Misson. URL: https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/

8. *ESRI* ASCII Raster Format. URL: http://resources.esri.com/help/9.3/arcgisengine/java/GP_ToolRef/spatial_analyst_tools/esri_ascii_raster_format.htm.

THE ALGORITHM FOR APPLYING MODELS OF VARIOUS SPATIAL SCALE TO ASSESS THE NEGATIVE EFFECTS ON ATMOSPHERIC AIR, TAKING INTO ACCOUNT THE COMPLEX THE TERRAIN

A.A. Egorkin[1,2,3], A.P. Kulikova[1]

[1]Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28
[2]FGAOU VO "Sevastopol State University", RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33
[3]FGKVOU VPO "Black Sea Higher Naval Order of the Red Star School named after P.S. Nakhimov", RF, Sevastopol, Dybenko St., 1a

The work is devoted to the development of an algorithm for the application of models of various spatial scales to assess the negative impact on atmospheric air. At the beginning of the study, the choice of models for conducting a computational experiment is justified. The following describes the set of data required for modeling. Solid particles with a diameter of 10 microns were selected as the type of pollutants, as the most frequently used in research on this topic. The analysis of stationary pollutant propagation fields generated using the mesoscale model (GRAMM) in combination with the Lagrangian model (GRAL) for four synoptic situations (the average month of each season in 2023) was carried out. The impact of meteorological conditions, terrain, buildings (structures) was assessed. It has been confirmed that wind speed and atmospheric stratification play a leading role in the spread of pollutants. It is determined that the totality of the studied factors has a complex effect on the dispersion of pollutants and this fact must be taken into account when assessing the effects of pollutants.
Keywords: mesoscale models, dispersion models, atmosphere, meteorology, climatology.

REFERENCES

1. *W.H. Organizations*, Global urban ambient air pollution database. Available at: https:www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/
2. *Prikaz* Ministerstva prirodnyh resursov № 273 ot 6 Iyunya 2017 g. (Order of the Ministry of Natural Resources No. 273 of June 6, 2017). Available at: https://minjust.consultant.ru/files/36322
3. *Berchet A., Zink K., Oettl D., Brunner J., Emmenegger L., and Brunner D.* Evaluation of high-resolution GRAMM–GRAL (v15.12/v14.8) NOx simulations over the city of Zürich, Switzerland. *Geoscientific Model Development*, 2017, Vol. 10, pp. 3441–3459.
4. *Oettl D. and Veratti G.* A comparative study of mesoscale flow-field modelling in an Eastern Alpine region using WRF and GRAMM-SCI. *Atmospheric Research*, 2021, Vol. 249, 105288 p.
5. *Ling H., Lung S.-C.C., and Uhrner U.* Micro-scale particle simulation and traffic-related particle exposure assessment in an Asian residential community. *Environmental Pollution*, 2020, Vol. 266, 115046 p.
6. *Graz* Lagrangian Model. Available at: https://gral.tugraz.at/
7. *Shuttle* Radar Topography Mission. Available at: https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/
8. *ESRI* ASCII Raster Format. Available at: http://resources.esri.com/help/9.3/arcgisengine/java/GP_ToolRef/spatial_analyst_tools/esri_ascii_raster_format.htm