

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 504.064.36

DOI: 10.22213/2410-9304-2025-3-4-11

Решение задачи аппроксимации цифровых моделей рельефа территории для моделирования путей горизонтальной миграции загрязняющих веществ

Р. А. Галиакберов, Ижевский нефтяной научный центр, Ижевск, Россия

К. И. Дизендорф, кандидат физико-математических наук, доцент,

ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

И. Р. Подлесных, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Статья посвящена вопросам разработки программного продукта для выполнения аппроксимации цифровых моделей рельефа территорий для целей экологического мониторинга химически опасных объектов.

В статье проведен анализ текущей ситуации в области экологического мониторинга химических опасных объектов, выявлен проблемный вопрос, заключающийся в необходимости повышения эффективности работы систем экологического мониторинга с применением инструментов моделирования миграции загрязняющих веществ. Моделирование миграции загрязняющих веществ проводится на цифровых моделях рельефа территории, что создает определенные трудности в виде высокой степени их детализированности, что приводит к возникновению на территории незначительных участков локального скопления загрязняющих веществ, которыми в силу размеров рассматриваемой территории можно пренебречь. Таким образом, перед применением цифровых моделей рельефа в целях моделирования миграции загрязняющих веществ становится обязательной их первичная обработка с целью исключения незначительных перепадов высот и искажения результатов моделирования. Для решения выявленного проблемного вопроса предлагается разработанный авторами программный продукт, направленный на выполнение аппроксимации цифровых моделей рельефа территории. Авторами рассмотрены различные подходы, методы и способы выполнения аппроксимации, выявлены наиболее перспективные с точки зрения рассматриваемого вопроса, рассмотрена необходимость разработки дополнительных модулей и алгоритмов для повышения точности и наглядности выходных данных. В статье приведено подробное описание работы программного продукта как в целом, так и отдельных модулей, рассмотрены алгоритмы и результаты (выходные данные) их работы, выполнено описание графического интерфейса. В ходе выполнения анализа результатов работы программного продукта выявлена его высокая эффективность в рамках выполнения задачи аппроксимации цифровых моделей рельефа территории, сделаны выводы о возможности его применения при проведении моделирования миграции загрязняющих веществ в ходе совершенствования системы экологического мониторинга химически опасных объектов.

Ключевые слова: экологический мониторинг, биомониторинг, моделирование, миграция загрязняющих веществ, аппроксимация, цифровые модели рельефа, триангуляция Делоне, метод ближайших соседей.

Введение

На сегодняшний день биологический мониторинг (биомониторинг) является одной из ключевых подсистем комплексного экологического мониторинга и контроля на территориях зон влияния химически опасных объектов. Направленность исследований биомониторинга непосредственно на окружающую среду позволяет дать наиболее точную и достоверную информацию как о текущем состоянии окружающей среды, так и о предполагаемых путях изменения экологической обстановки, что делает биомониторинг одним из наиболее важных источников информации в системе поддержания устойчивого функционирования окружающей среды [1–5].

В силу того, что объектом исследований биомониторинга является непосредственно окру-

жающая среда, учет физических и биологических процессов, происходящих в ней, с одной стороны, является обязательным для достижения необходимого уровня точности и достоверности получаемых данных и снижения временных и финансовых затрат. С другой стороны, многогранность, сложность и уникальность физических и биологических процессов делают указанную задачу одной из наиболее сложных при организации работ по совершенствованию системы биомониторинга. Причем наибольшую сложность при решении указанной задачи представляет внедрение инструментов учета процессов миграции и трансформации загрязняющих веществ в составляющих окружающей среды. При этом, исходя из того, что мониторинг окружающей среды целиком и полностью базируется на методологии отбора проб с

их последующим анализом, учет явлений миграции загрязняющих веществ должен проводиться на этапе расстановки пунктов пробоотбора, поскольку от точности проведения этапа расстановки пунктов пробоотбора напрямую зависит результат.

Одним из наиболее действенных инструментов учета явлений миграции загрязняющих веществ на сегодняшний день является математическое моделирование указанных процессов с использованием его результатов при расстановке пунктов пробоотбора. При этом, если механизмы миграции загрязняющих веществ в пределах атмосферного воздуха достаточно полно и детально изучены и описаны в виде различных математических моделей [6–10], то с миграцией загрязняющих веществ после их осаждения на земную поверхность дела обстоят немного сложнее. Основной проблемой в данном вопросе является необходимость привязки проводимого моделирования к цифровым моделям рельефа (далее – ЦМР) территории для получения точно определенных мест наиболее вероятного скопления загрязняющих веществ. Высокая точность и детализированность современных ЦМР приводит к наличию на них незначительных перепадов высот, которые значительно повышают объемы обрабатываемых данных. При этом в рамках биомониторинга данные участки перепадов высот не оказывают сколько-либо существенного влияния на общую картину миграции загрязняющих веществ и такими перепадами необходимо и разумно пренебречь, поскольку такие условия приводят к снижению оперативности проведения расчетов, а также увеличению объемов выходных данных.

Для решения указанной проблемы необходимо проведение процедуры обработки ЦМР перед проведением математического моделирования с целью исключения незначительных перепадов высот, которыми необходимо и разумно пренебречь для повышения оперативности проведения расчетов и снижения объема выходных данных. Другими словами, возникает задача разработки простого и действенного инструмента аппроксимации ЦМР территории.

Способ решения проблемного вопроса

Описание используемых методов и способов аппроксимации ЦМР. Проведенный анализ литературных источников [11–22] показывает, что среди существующих методов и способов аппроксимации наиболее популярными и широко применимыми являются линейная и кусочно-линейная аппроксимация. Основное отличие указанных методов заключается в том, что ли-

нейная аппроксимация предполагает представление поверхности с помощью линейных функций, т. е. для каждого участка поверхности строится линейная функция, которая представляет собой плоскость, максимально приближенную к заданным точкам на всем участке. Такой метод применим лишь в тех случаях, когда рельеф изменяется плавно и не имеет резких переходов. Однако исходя из того, что линейная модель не способна адекватно описать кривизну или различные формы поверхностей, на более сложных и неровных участках особенности рельефа не смогут быть описаны адекватно.

Данная проблема решается путем применения кусочно-линейной аппроксимации, которая предполагает разбивку сложного рельефа на более простые плоскости-треугольники с использованием методов триангуляции, каждая из которых аппроксимирует небольшой участок поверхности. Подобный подход позволяет получить более точное представление о рельефе, так как каждый треугольник может быть спроектирован с учетом локальных изменений высоты, и таким образом каждый участок будет аппроксимироваться с максимально возможной точностью для выбранного типа модели. Таким образом, метод кусочно-линейной аппроксимации наиболее предпочтителен для проведения аппроксимации цифровых моделей рельефа.

Проведенный анализ методов и способов триангуляции выявил два наиболее перспективных с точки зрения применимости к решаемой задаче метода триангуляции: триангуляция по методу ближайших соседей, а также триангуляция Делоне.

Триангуляция по методу ближайших соседей используется в случаях, когда необходимо построить триангуляцию для большого набора точек. Метод включает в себя последовательное соединение точек, которые являются ближайшими соседями друг к другу, что также позволяет создавать сетку треугольников для дальнейшего анализа. Этот метод обычно используется, когда необходимо быстро построить сетку для большого набора точек, которые могут быть неравномерно распределены по территории. Алгоритм начинается с выбора одной точки, а затем поочередно добавляет соединения с ближайшими соседями.

Принцип работы триангуляции Делоне заключается в том, что для каждого треугольника, образованного точками на плоскости, вписанная в него окружность не содержит других точек внутри. Это важное свойство называется критерием Делоне и помогает создавать «хорошие»

треугольники с большими углами (далеко от 0° и 180°), что минимизирует искажения сетки.

С точки зрения проведения триангуляции важными этапами проведения данного процесса является построение дополнительных точек для повышения точности модели, адаптации сетки под конкретные задачи и учета сложности рельефа, а также отсеивание лишних точек, которые могут быть избыточными и не вносить значительного вклада в процесс построения аппроксимированной модели. В рамках рассматриваемых способов триангуляции для решения задачи построения дополнительных точек рассмотрены метод линейной интерполяции и метод применения интерполяционного многочлена Лагранжа. Для решения задачи отсеивания лишних точек, в свою очередь, рассмотрен алгоритм на основе минимального расстояния, а также метод на основе угла поворота.

Разработка программы

Считывание и нормирование данных. Для удобства в рамках тестового объекта в качестве исходных данных выбран участок ЦМР местности, ограниченный по широте (значения от 56,01 до 56,05) и долготе (значения от 53,65 и 53,70) (рис. 1).

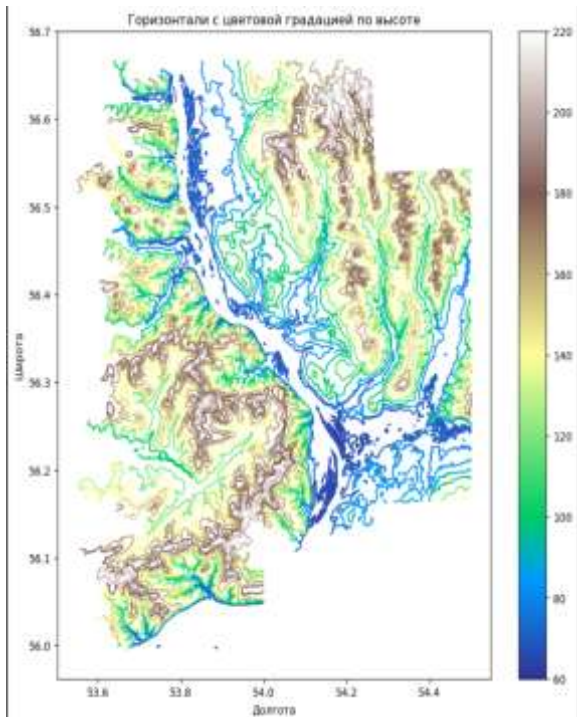


Рис. 1. Рассматриваемый участок ЦМР

Fig. 1. DEM site under consideration

Далее проведена нормировка указанных значений широты и долготы по формуле

$$\frac{x_i - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (1)$$

где x_i – значение широты и долготы в данной точке; $\min(x_i)$ – минимальное значение широты или долготы в заданной области; $\max(x_i)$ – максимальное значение широты или долготы в заданной области.

После нормировки производится выборка определенных линий уровня рельефа исходя из заданных требований, после чего цифровая модель рельефа приобретает следующий вид (рис. 2).

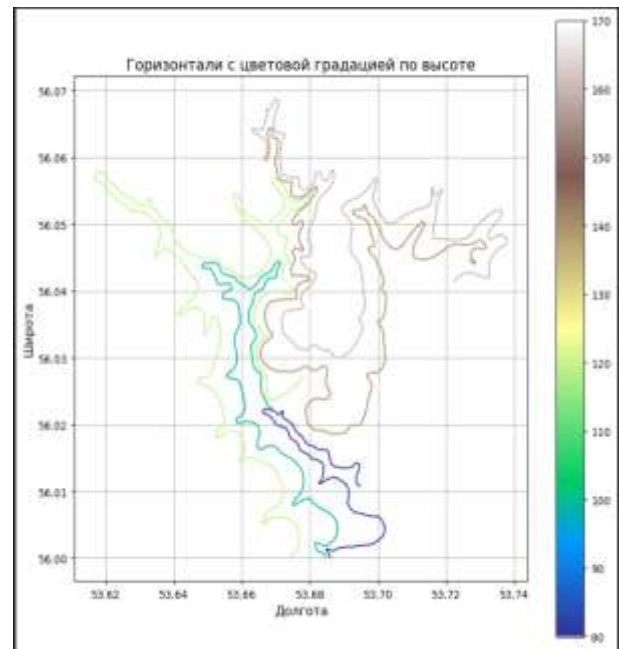


Рис. 2. Участок ЦМР после нормировки

Fig. 2. DEM site after normalization

Аппроксимация по методу ближайших соседей. Работа алгоритма построена следующим образом:

- 1) для всех линий уровня находится геометрический центр;
- 2) две точки с одной высоты объединяются в пару;
- 3) для указанных точек находится центр через евклидово расстояние;
- 4) для этого центра среди всех высот, меньше высоты этой пары, находится ближайшая точка через евклидово расстояние;
- 5) проверяется условие, образует ли вектор от центра нашей пары точек до ближайшей точки острый угол с вектором от геометрического центра данного уровня до текущей пары точек острый угол. Если нет – идет поиск следующей ближайшей точки.

По результатам работы алгоритма построен график поверхностей (рис. 3). Как видно из рис. 3, простой способ поиска ближайших соседей для данной задачи работает не совсем корректно, так как некоторые поверхности строятся как

бы «внутри» своей области высоты, а такого быть не должно.

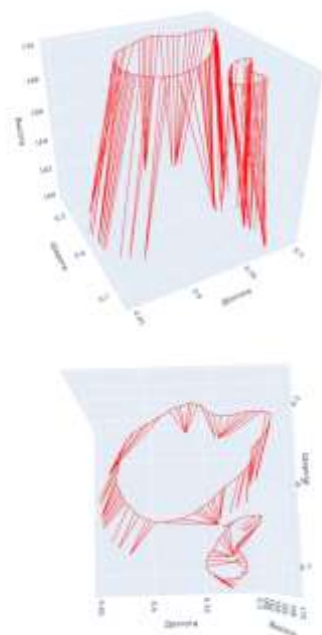


Рис. 3. Результаты аппроксимации по методу ближайших соседей

Fig. 3. Nearest neighbor approximation results

Аппроксимация с использованием триангуляции Делоне. Алгоритм работы триангуляции Делоне состоит из 4 шагов: начальная триангуляция (построение внешней оболочки), добавление новых точек, рекурсивная корректировка (проведение «ребра»), завершение работы.

Для создания начальной оболочки триангуляции использован метод задания супертреугольника, для построения которого вычисляются максимальные и минимальные значения каждой из координат точек и по полученному набору из трех точек строится треугольник, захватывающий максимальное количество точек и являющийся основой для дальнейшей работы. Далее в указанную основу добавляются новые точки, при этом после добавления каждой новой точки производится проверка соблюдения всеми треугольниками условий триангуляции Делоне и перераспределение точек путем добавления новых треугольников с применением принципа проведения «ребра». Таким образом достигается состояние, при котором новая точка интегрирована в существующее разбиение, и критерий Делоне для всех треугольников выполнен.

По результатам работы алгоритма построен график поверхностей (рис. 4). Исходя из рисунка можно сделать вывод, что он триангуляция Делоне, решает проблему построения поверхности «внутри» области высоты, и в целом график

работы данной триангуляции выглядит корректно.

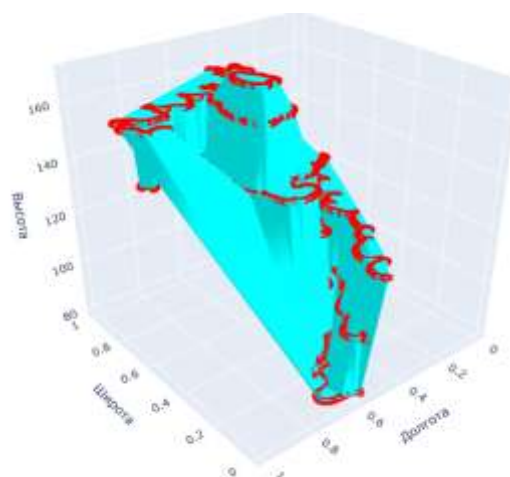


Рис. 4. Результаты аппроксимации с использованием триангуляции Делоне

Fig. 4. Approximation results using Delaunay triangulation

Сглаживание уровней высот. Для учета наличия на участке ЦМР речных массивов было принято решение установить для них уровень высоты, равный нулю. Однако с учетом того, что реки редко лежат на одном уровне и значение уровня высоты не может совпадать с другими уровнями высоты рельефа, был разработан алгоритм сглаживания линий уровня с применением метода линейной интерполяции. По результатам работы алгоритма построен график поверхностей (рис. 5).

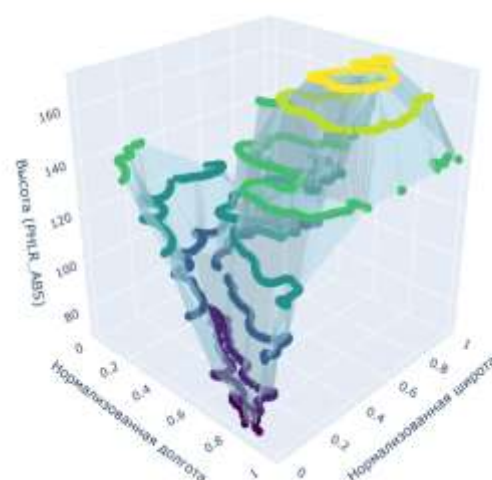


Рис. 5. Результаты аппроксимации с применением алгоритма сглаживания линий уровня

Fig. 5. Approximation results using the level line smoothing algorithm

Удаление лишних точек. Отсеивание лишних точек, которые являются избыточными и не вносят значительного вклада в процесс построения аппроксимированной модели, производится по следующему алгоритму:

1) исходный набор точек группируется по высоте;

2) для каждой группы точек вычисляется расстояние между точками;

3) производится проверка каждой группы точек путем сравнения расстояния между точками с пороговым значением и исключения точек, расстояние между которыми меньше порогового;

4) отредуцированные точки объединяются в новую группу.

По результатам работы алгоритма аппроксимированная модель принимает следующий вид (рис. 6).

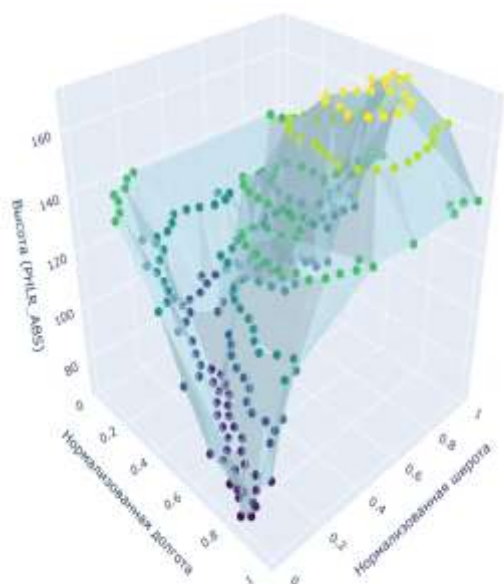


Рис. 6. Результаты аппроксимации с применением алгоритма удаления лишних точек

Fig. 6. Approximation results using an algorithm for removing unnecessary points

Завершение работы программы. Заключительным этапом работы программы является запись коэффициентов для построения плоскости в файл.

Общий вид уравнения плоскости имеет вид:

$$A_x + B_y + C_z + D = 0. \quad (2)$$

Был составлен алгоритм, позволяющий посчитать коэффициенты уравнения плоскости по трем точкам (вершинам треугольника), и записать их в файл в качестве выходных данных (таблица).

Пример записи коэффициентов Example of recording coefficients

A	B	C	D
-2,24273	-1,63239	0,025821	-2,09734
-0,04302	8,984561	0,000721	-9,04886
...
-0,1816	-0,47818	-0,00154	0,25689

Разработка графического интерфейса

Графический интерфейс разработанной программы представлен на рис. 7. Изображенное на рис. 7 окно открывается при запуске программы.

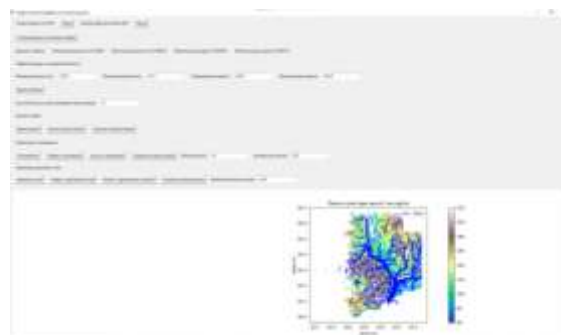


Рис. 7. Общий вид графического интерфейса программы

Fig. 7. General view of the graphical interface of the program

Для начала использования программы через кнопки «Обзор» указываются пути до файлов, содержащих информацию о рельефе. После этого путем нажатия на кнопку «Считать данные и построить график» производится считывание и нормирование данных.

После считывания данных значения в строке «Данные из файла» изменяются на настоящие границы координат из файла, на их основе заполняются границы исследуемой области. Подтверждение данных границ производится путем нажатия кнопку «Задать границы».

После задания границ задается «Количество высот» – количество верхних уровней высоты, которые будут использоваться для триангуляции, этот параметр общий для всех методов триангуляции.

После этого путем нажатия на кнопку «Триангуляция» запускается расчет. По результатам расчета программа отображает график полученных результатов аппроксимации в виде аппроксимированной модели рельефа.

Выводы и заключение

Основная цель исследования заключалась в разработке действенного инструмента для аппроксимации цифровых моделей рельефа территории, задачей которого является исключение

незначительных перепадов рельефа территории при проведении моделирования процессов горизонтальной миграции загрязняющих веществ на территории химически опасных объектов. При этом критически важным является не только создание наглядной визуализации процесса аппроксимации, но и обеспечение необходимого уровня точности при анализе мест возможного скопления загрязняющих веществ, что в моделировании миграции загрязняющих веществ имеет большое значение.

В ходе исследования рассмотрены два наиболее распространенных метода аппроксимации цифровых моделей рельефа территории: метод ближайших соседей, а также триангуляция Делоне. Опытным путем установлено, что погрешности в результате работы метода ближайших соседей значительно снизили точность аппроксимации рельефа и привели к ошибочным результатам при построении 3D-графика. Проблема заключалась в том, что метод не учитывал важнейшие геометрические особенности данных и не обеспечивал должной точности для формирования корректной модели.

Метод триангуляции Делоне оказался наиболее подходящим для достижения цели, так как он позволяет корректно и эффективно разделять пространство на треугольники. Использование триангуляции Делоне позволило создать точную 3D-модель местности, что в свою очередь обеспечило более качественное определение уровней высот.

В результате дальнейшего исследования был разработан программный продукт, основной задачей которого является аппроксимация цифровых моделей рельефа территории на основе указанного ранее метода. Программный продукт включает в себя следующие алгоритмы:

- 1) считывания и нормирования данных;
- 2) аппроксимации с использованием метода триангуляция Делоне;
- 3) сглаживания уровней высот;
- 4) удаления лишних точек.

Кроме того, разработан простой, удобный и интуитивно понятный графический интерфейс, позволяющий пользователю, не обладающему достаточным уровнем знаний в данной области, проводить процедуру аппроксимации цифровых моделей рельефа без существенных затруднений.

Разработанный в ходе исследования программный продукт позволяет оперативно и с достаточно высоким уровнем точности производить процесс аппроксимации цифровых моделей рельефа территории с целью дальнейше-

го применения получаемых моделей для моделирования миграции загрязняющих веществ на территории химически опасных объектов. Решение указанного вопроса позволяет исключить места незначительного скопления загрязняющих веществ при выполнении операций расстановки точек пробоотбора в системы экологического мониторинга химически опасных объектов, что приводит к повышению оперативности и достоверности результатов его проведения.

Библиографические ссылки

1. Сравнительный анализ эффективности методов биоиндикации при мониторинговых исследованиях состояния окружающей среды в Санкт-Петербурге / М. Г. Опекунова, А. Р. Никулина, И. В. Смешко, В. С. Кириченко // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2023. № 2. С. 331–356.
2. Оценка экологического состояния озерных экосистем урботерриторий по показателям зообентоса (на примере г. Казани) / А. И. Галеева, Э. Г. Набеева, Н. М. Мингазова, И. Р. Гильманшин // МНИЖ. 2023. № 10 (136). С. 2.
3. Дрозденко Т. В., Александрова С. М., Антал Т. К. Фитопланктон и экологическое состояние чудскопсковского озера // Экосистемы. 2023. № 34. С. 36–43.
4. Распределение тяжелых металлов и их миграция в системе почва – растение на примере парка Н. Островского города Ростова-на-Дону / Н. В. Сальник, В. А. Иволгина, С. Н. Горбов, Д. А. Козырев // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2023. № 4 (220). С. 126–136.
5. Янников И. М., Галиакбаров Р. А., Исаков В. Г. Методология прогнозирования и моделирования миграции загрязняющих веществ в системе комплексного экологического мониторинга химически опасных объектов // Экология промышленного производства. 2023. № 2. С. 39–43.
6. Ковалева И. В., Суслин В. В. Влияние атмосферных осадков и поверхностного стока на показатели фитопланктона в северной части Черного моря // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2023. № 4. С. 28–39.
7. Метеоиндикация состояния рудных районов / В. В. Кульнев, А. Н. Кизеев, Д. С. Борисова, Д. В. Бурова, В. П. Чащин, А. Н. Никанов // Проблемы региональной экологии. 2023. № 1. С. 87–97.
8. Влияние аномалий температуры и осадков на потоки диоксида углерода во внетропических лесах северного полушария / Е. М. Сатосина, Д. Ю. Гущина, М. А. Тарасова, И. В. Железнова, Е. Р. Емельянова, Р. Р. Гибадуллин, А. М. Осипов, А. В. Ольчев // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2024. № 2. С. 19–30.
9. Методика моделирования условий внешней среды / А. В. Игнатов, В. В. Русин, В. В. Сасалина, А. В. Добряков, А. Р. Санникова, С. И. Стреляев, О. А. Евланова // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. № 1. С. 193–202.

10. *Припачкин Д. А., Будыка А. К.* Влияние параметров аэрозольных частиц на их вымывание из атмосферы дождевыми каплями // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2020. Т. 56, № 2. С. 203–209.

11. *Алюков С. В.* Аппроксимация кусочно-линейных и обобщенных функций. – 1-е изд. – Новосибирск : НИЦ ИНФРА-М, 2024. 149 с.

12. *Букунов С. В., Букунова О. В.* Разработка приложений с графическим пользовательским интерфейсом на языке Python. 1-е. Санкт-Петербург : Лань, 2023. 83 с.

13. *Скворцов А. В.* Триангуляция Делоне и ее применение. 1-е изд. Томск : Изд-во Томского университета, 2002. 130 с.

14. *Скворцов А. В., Мирза Н. С.* Алгоритмы построения и анализа триангуляции. 1-е изд. Томск : Изд-во Томского университета, 2006. 170 с.

15. *Хелман Д.* Стандартная библиотека Python 3: справочник с примерами. 2-е изд. Санкт-Петербург : Диалектика, 2020. 1378 с.

16. *Бурый А. С., Усцелемов В. Н.* Развитие систем поддержки принятия решений на основе прецедентов в распределенных информационных структурах // *Правовая информатика*. 2024. № 1. С. 88–95.

17. *Игнатьев Н. А., Турсунмуратов Д. Х.* Цензурирование обучающих выборок с использованием регуляризации отношений связанности объектов классов // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2024. № 2. С. 322–329.

18. *Бобовкин А. А., Вершенник Е. В., Стародубцев П. Ю.* Методика идентификации элементов динамично изменяющихся объектов // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2023. № 5. С. 171–181.

19. *Коньков В. В., Замчалов А. Б., Жабицкий М. Г.* Программно-аппаратный комплекс получения фотоизображений на основе технологии Pot и анализ точности различных алгоритмов цифровой генерации 3D-моделей на основе принципа фотограмметрии // *International Journal of Open Information Technologies*. 2023. № 8. С. 32–51.

20. *Воробьев А. В., Воробьева Г. Р.* Геоинформационная система динамической пространственной кластеризации распределенных источников данных // *Вестн. Том. гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика*. 2023. № 64. С. 61–73.

21. Совершенствование методики прогноза последствий подработки территорий угольными шахтами на основе цифровых моделей / В. Б. Скаженик, Н. Н. Грищенко, Ф. М. Голубев, Л. А. Иванова // *РАНИМИ*. 2024. № 3 (41). С. 35–48.

22. *Андропова В. С., Гутак Я. М.* Разработка методики исследований техногенных рельефов в местах открытых горных работ // *Региональные геосистемы*. 2023. № 4. С. 530–538.

References

1. Opekunova M.G., Nikulina A.R., Smeshko I.V., Kirichenko V.S. [Comparative analysis of the effectiveness of bioindication methods in monitoring environment al studies in St.Petersburg]. *Bulletin of St. Petersburg State University.EarthSciences*. 2023. No. 2. Pp. 331-356 (in Russ.).

2. Galeeva A.I., Nabeeva E.G., Mingazova N.M., Gilmanshin I.R. [Assessment of the ecological state of lake ecosystems of urban territories by indicators of zoobenthos (on the example of Kazan)]. *MNIZH*. 2023. No. 10. P. 2 (in Russ.).

3. Drozdenko T.V., Alexandrova S.M., Antal T.K. [Phytoplankton and the ecological state of Lake Peipsi-Pskov] *Ecosystems*. 2023. No. 34. Pp. 36-43.

4. Salnik N.V., Ivolgina V.A., Gorbov S.N., Kozyrev D.A. [Distribution of heavy metals and their migration in the soil–plant system using the example of N.V. Park. Ostrovskycity of Rostov-on-Don]. *Izvestiya vuzov. The North Caucasu sregion. Series: NaturalSciences*. 2023. No. 4. Pp. 126-136 (in Russ.).

5. Yannikov I.M., Galiakberov R.A., Isakov V.G. [Methodology of forecasting and modeling the migration of pollutants in the system of integrated environmental monitoring of chemically hazardous facilities]. *Ecology of industrial production*. 2023. No. 2. Pp. 39-43 (in Russ.).

6. Kovaleva I.V., Suslin V.V. [Influence of atmospheric precipitation and surface run of fon phytoplankton indicators in the northern part of the Black Sea]. *Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography*. 2023. No. 4. Pp. 28-39 (in Russ.).

7. Kulnev V.V., Kizeev A.N., Borisova D.S., Burova D.V., Chashchin V.P., Nikanov A.N. [Meteorological indication of the state of oreregions]. *Problems of regional ecology*. 2023. No. 1. Pp. 87-97 (in Russ.).

8. Satosina E.M., Guschina D.Y., Tarasova M.A., Zheleznova I.V., Yemelyanova E.R., Gibadullin R.R., Osipov A.M., Olchev A.V. [Influence of temperature and precipitation anomalies on carbon dioxide fluxes in extratropical forests of the northern hemisphere]. *Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography*. 2024. No. 2. Pp. 19-30 (in Russ.).

9. Ignatov A.V., Rusin V.V., Sasalina V.V., Dobryakov A.V., Sannikova A.R., Strelyaev S.I., Evlanova O.A. [Methodology of modeling environmental conditions]. *News of TuSU. Technical sciences*. 2023. No. 1. Pp. 193-202 (in Russ.).

10. Pripachkin D.A., Budyka A.K. [Influence of aerosol particl eparameters on their leaching from the atmosphere by raindrops]. *News of the Russian Academy of Sciences. Physics of the atmosphere and ocean*. 2020. Vol. 56, no. 2. Pp. 203-209 (in Russ.).

11. Alyukov S.V. [Approximation of piecewise linear and generalized functions]. *Novosibirsk: SICINFRA-M*, 2024. 149 p. (in Russ.).

12. Bukunov S.V., Bukunova O.V. *Development of applications with a graphical user in terface in Python*. St. Petersburg : Lan, 2023. 83 p. (in Russ.).

13. Skvortsov A.V. [Delaunay triangulation and its application]. *Tomsk: Tomsk University Press*, 2002. 130 p. (in Russ.).

14. Skvortsov A.V., Mirza N.S. [Algorithms for constructing and analyzing triangulation]. *Tomsk: Tomsk University Press*, 2006. 170 p. (in Russ.).

15. Helman D. *The Python 3 Standard Library: a reference book with examples*. St. Petersburg : Dialektika Computer Publishing House, 2020. 1378 p. (in Russ.).

16. Buriy A.S., Usselemov V.N. [Development of decision support systems based on precedents in distributed information structures]. *Legal Informatics*. 2024. No. 1. Pp. 88-95 (in Russ.).

17. Ignatiev N.A., Tursunmurotov D.H. [Censor ship of training sample using regularization of related nessrelations of objects of classes]. *Scientific and Technical Bulletin of InformationTechnologies, Mechanics and Optics*. 2024. No. 2. Pp. 322-329 (in Russ.).

18. Bobovkin A.A., Vershennik E.V., Starodubtsev P.Yu. [Method of identification of elements of dynamically changing objects]. *Izvestiya TulsU. Technical sciences*. 2023. No. 5. Pp. 171-181 (in Russ.).

19. Konkov V.V., Zamchalov A.B., Zhabitsky M.G. [Software and hardware complex for obtaining photographic images based on IIoT technology and accuracy analysis of various algorithms for digital generation of 3Dmodels

based on the principle of photogrammetry]. *International Journal of Open Information Technologies*. 2023. No. 8. Pp. 32-51 (in Russ.).

20. Vorobyov A.V., Vorobyova G.R. [Geoinformation system of dynamics patialclustering of distributed data sources]. *Vestn. Volume of the State University. Management, computer engineering and computer science*. 2023. No. 64. Pp. 61-73 (in Russ.).

21. Skazhenik V.B., Grishenkov N.N., Golubev F.M., Ivanova L.A. [Improving the methodology for predicting the consequences of mining territories by coalminesbased on digitalmodels]. *RANIMI*. 2024. No. 3. Pp. 35-48 (in Russ.).

22. Andropova V.S., Gutak Ya.M. [Development of research methods for technogenic reliefsinopen-pit mining sites]. *Regional Geosystems*. 2023. No. 4. Pp. 530-538 (in Russ.).

* * *

Solving the Problem of Approximating Digital Terrain Models for Modeling the Ways of Horizontal Migration of Pollutants

R. A. Galiakberov, 1st class engineeek, CJSC «Izhevsk Petroleum Research Center»

K. I. Dizendorf, Candidate of Physico-mathematical Sciences, Docent of the Department of Applied mathematics and information technology, KalashnikovIzhevsk State Technical University, KalashnikovIzhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

I. R. Podlesnyh, KalashnikovIzhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

The article is devoted to the development of a software product for the approximation of digital terrain models for the purposes of environmental monitoring of chemically hazardous facilities. The article analyzes the current situation in the field of environmental monitoring of chemically hazardous facilities, identifies a problematic issue, which is the need to improve the efficiency of environmental monitoring systems using tools for modeling the migration of pollutants. Modeling of the migration of pollutants is carried out on digital models of the terrain of the territory, which creates certain difficulties in the form of a high degree of detail, which leads to the appearance of small areas of local accumulation of pollutants in the territory, which, due to the size of the territory under consideration, can be neglected. Thus, before using digital terrain models to simulate the migration of pollutants, their primary processing becomes mandatory in order to eliminate minor elevation differences and distortion of modeling results. To solve the identified problematic issue, a software product developed by the authors is proposed, aimed at approximating digital terrain models. The authors consider various approaches, methods and methods of performing approximation, identify the most promising from the point of view of the issue under consideration, and consider the need to develop additional modules and algorithms to improve the accuracy and clarity of the output data. The article provides a detailed description of the work of the software product as a whole and individual modules, provides algorithms and results (output data) of their work, and describes the graphical interface. During the analysis of the results of the software product, its high efficiency was revealed as part of the task of approximating digital terrain models, and conclusions were drawn about the possibility of its use in modeling the migration of pollutants during the improvement of the environmental monitoring system for chemically hazardous facilities.

Keywords: Environmental monitoring, digital relief models, Delaunay triangulation, nearest neighbor method.

Получено: 12.05.25

Образец цитирования

Галиакберов Р. А., Дизендорф К. И., Подлесных И. Р. Решение задачи аппроксимации цифровых моделей рельефа территории для моделирования путей горизонтальной миграции загрязняющих веществ // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2025. Т. 23, № 3. С. 4–11. DOI: 10.22213/2410-9304-2025-3-4-11.

For Citation

Galiakberov R.A., Dizendorf K.I., Podlesnyh I.R. [Solving the problem of approximating digital terrain models for modeling the ways of horizontal migration of pollutants]. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 4-11 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2025-3-4-11.