



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра экспериментальной физики атмосферы  
**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(магистерская диссертация)

На тему: «Разработка методики оптимального планирования траекторий  
БПЛА для мониторинга приземного слоя атмосферы в сложных  
условиях рельефа»

Исполнитель Пилипенко Иван Александрович  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Симакина Татьяна Евгеньевна  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Восканян Карина Левановна  
(фамилия, имя, отчество)

« 25 » мая 2026 года

Санкт-Петербург

2026

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....                                                                                                           | 3  |
| ГЛАВА 1. ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ<br>ТРАЕКТОРИИ ДЛЯ БПЛА НА ТЕРРИТОРИИ СО СЛОЖНЫМ РЕЛЬЕФОМ<br>..... | 6  |
| 1.1 Возможность применения БПЛА на территории со сложным рельефом ...                                                   | 6  |
| 1.2 Оптимальное планирование траектории БПЛА на территории со сложным<br>рельефом .....                                 | 15 |
| 1.3 Методы оптимального планирования траектории БПЛА.....                                                               | 23 |
| ГЛАВА 2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ<br>РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ .....                                          | 42 |
| 2.1 Данные используемые в работе .....                                                                                  | 42 |
| 2.2 Построение цифровой модели рельефа и температурного поля Санкт-<br>Петербурга .....                                 | 43 |
| 2.3 Методы использованные в данной работе.....                                                                          | 51 |
| ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ<br>БПЛА .....                                                        | 53 |
| 3.1 Исследование траектории БПЛА с помощью метода “Песочные часы” ..                                                    | 53 |
| 3.2 Исследование траектории БПЛА с помощью метода “ЗМЕЙКА” .....                                                        | 57 |
| 3.3 Исследование траектории БПЛА с помощью метода “Спиральные<br>алгоритмы” .....                                       | 62 |
| 3.4. Оценка метеорологической эффективности траекторий .....                                                            | 70 |
| 3.5. Адаптивный алгоритм планирования траектории БПЛА с учётом<br>градиента температуры.....                            | 72 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                                                                                        | 78 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....                                                                                   | 81 |

## ВВЕДЕНИЕ

Современная метеорология переживает революцию, движимую развитием беспилотных авиационных систем. Эти аппараты открывают доступ к данным, которые ранее были недостижимы или чрезвычайно затратны для получения. Однако уникальный потенциал БПЛА для изучения атмосферы может быть раскрыт в полной мере лишь при одном ключевом условии — грамотном и точном планировании их полетной траектории.

Планирование маршрута для метеорологического БПЛА — это не просто задача навигации из точки А в точку Б, это существенная проблема. Её решение напрямую определяет качество, репрезентативность и научную ценность собираемой информации.

Почему критически важно правильно спланировать траекторию:

1. Атмосфера — это динамичная, турбулентная, трехмерная среда с резкими градиентами параметров (температуры, влажности, давления, концентрации аэрозолей). Случайный или стандартизированный полет может проглядеть ключевые явления: тонкие инверсионные слои, границы воздушных масс, зоны конвекции или ядра облачных образований.

2. Каждый БПЛА имеет жесткие технические лимиты: запас энергии (время полета), максимальную дальность, потолок высоты, устойчивость к ветровой нагрузке. Неоптимальный маршрут ведет к преждевременному разряду батарей до завершения измерений, а в худшем случае — к потере аппарата в сложных метеоусловиях.

Без решения этой задачи БПЛА останется просто летающим датчиком, собирающим данные с неясной геометрией и ограниченной научной ценностью. Если решить эту задачу, то он становится мощнейшим инструментом целевого, адаптивного и высокоразрешающего зондирования атмосферы, открывая новую страницу в метеорологии, климатологии и экологическом мониторинге.

Актуальность исследования определяется тем, что традиционная сеть метеонаблюдений имеет ограниченное пространственное разрешение, что

особенно критично в условиях сложного городского или горного рельефа, где метеопараметры (температура, ветер, влажность) сильно меняются на близких расстояниях. БПЛА обладают уникальной мобильностью для таких задач, но их эффективность напрямую зависит от оптимальности маршрута. Рассмотрение данной темы позволит не только повысить детализацию прогнозов, но и снизить энергозатраты на полет, что критически увеличивает площадь покрытия одним БПЛА.

Целью работы является разработать и программно реализовать алгоритм планирования траектории БПЛА, максимизирующий информативность измерений метеорологических параметров в приземном слое над территорией со сложным рельефом.

Для достижения поставленной цели при написании работы определены следующие задачи:

1. Провести аналитический обзор существующих методов и алгоритмов планирования траекторий для БПЛА.
2. Разработать модель распространения метеорологического поля температуры в приземном слое над цифровой моделью рельефа (ЦМР).
3. Разработать и реализовать в среде моделирования алгоритм построения оптимальной траектории.
4. Провести вычислительный эксперимент на модельных данных и реальной ЦМР выбранного района. Оценить эффективность предложенной методики по сравнению со стандартными схемами облета.

Ожидаемым научным результатом является методика и программный модуль для планирования миссий БПЛА, позволяющие повысить эффективность мониторинга приземного слоя атмосферы в неоднородных условиях.

Объект исследования — процесс мониторинга приземного слоя атмосферы с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в условиях сложного рельефа местности.

Предмет исследования – методы и алгоритмы оптимального планирования траекторий БПЛА, обеспечивающие максимизацию информативности измерений метеорологических параметров.

При написании работы применялись методы геоинформационного моделирования, численного моделирования метеорологических полей, методы планирования траекторий БПЛА (змейка, песочные часы, спиральные алгоритмы), адаптивные алгоритмы локального сгущения сетки по критерию градиента поля, статистические методы оценки ошибок (RMSE).

По структуре работа состоит из введения, трех глав, посвященных теме исследования и отражающих поставленные при написании работы задачи, заключения и списка использованной литературы. В первой главе рассматривается возможность применения БПЛА на территории со сложным рельефом, описывается оптимальное планирование траектории и его достоинства, методы планирования и алгоритмы построения траектории БПЛА. Во второй главе представляются данные, использованные в работе, строится цифровая модель рельефа и температурного поля Санкт-Петербурга, рассказывается о методах, примененных в работе. В третьей главе строятся траектории по методам «Песочные часы», «Змейка», Спиральные алгоритмы, предлагается разработанный алгоритм «Адаптивная Змейка» и его визуализация, также проведена оценка метеорологической эффективности методов и их сравнение.

# ГЛАВА 1. ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДЛЯ БПЛА НА ТЕРРИТОРИИ СО СЛОЖНЫМ РЕЛЬЕФОМ

## 1.1 Возможность применения БПЛА на территории со сложным рельефом

Изучение и мониторинг приземного слоя атмосферы — одна из ключевых задач современной метеорологии, от решения которой напрямую зависит качество прогнозов погоды, предупреждение опасных природных явлений и обеспечение безопасности полетов авиации. Приземный (пограничный) слой атмосферы, расположенный на высотах от поверхности земли до нескольких сотен метров, характеризуется активными процессами теплообмена и масса обмена, турбулентностью и высокой пространственной изменчивостью метеопараметров — температуры, влажности, скорости и направления ветра, атмосферного давления [1,2].

Особую сложность представляет мониторинг пограничного слоя над территориями со сложным рельефом — горными массивами, ущельями, предгорьями, вулканическими плато. Пересеченный рельеф создает локальные циркуляционные эффекты, формирует орографические облака, зоны повышенной турбулентности, которые невозможно зафиксировать редкой сетью стационарных метеостанций. Традиционные средства наблюдений здесь малоэффективны: метеозонды дают лишь точечные вертикальные профили, радиолокаторы и лидары требуют дорогостоящей инфраструктуры, а пилотируемая авиация ограничена по экономическим соображениям и соображениям безопасности.

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) открывают принципиально новые возможности для систематического исследования приземного слоя атмосферы над сложным рельефом, позволяя получать пространственно распределенные данные в реальном времени, безопасно проникать в опасные или труднодоступные зоны и тем самым заполнять критический пробел в метеорологических наблюдениях [9,20].

Применение БПЛА в условиях городской и горной местности сопряжено с рядом серьезных технических вызовов, ограничивающих возможности стандартных беспилотных систем:

1. Метеорологическая турбулентность и быстро меняющиеся условия. В горах характерны сильные, непредсказуемые и стремительно изменяющиеся ветры, включая нисходящие и восходящие потоки, которые создают мощную турбулентность. Это приводит к снижению качества и искажениям передачи видеосигнала, а в критических случаях — к потере управления, срыву в штопор или механическому разрушению аппарата. Военные специалисты, эксплуатирующие БПЛА в условиях высокогорья, отмечают, что сложность полетов усугубляется большой облачностью, влияющей на видимость, и быстрым изменением метеоусловий с сильными ветрами.

2. Экранирование навигационных и связных сигналов. Пересеченный рельеф создает естественные препятствия для распространения радиоволн, формируя «мертвые зоны» как для сигналов управления, так и для передачи телеметрии и видео. В глубоких ущельях и каньонах возможна полная потеря спутниковой навигации (GPS/ГЛОНАСС), что делает невозможным выполнение полетов стандартными навигационными алгоритмами.

3. Логистические ограничения. Запуск и посадка в горах требуют специально подготовленных, часто труднодоступных площадок, а дефицит ровных горизонтальных участков, особенно в сочетании с густой растительностью, осложняет эксплуатацию, требуя применения аппаратов вертикального взлета и посадки либо специализированных пусковых устройств.

Для преодоления указанных ограничений инженерами и научными коллективами разработан ряд специализированных решений, охватывающих как конструктивные особенности БПЛА (использование разных типов БПЛА), так и программно-алгоритмическое обеспечение [3,19]:

- БПЛА самолетного типа обладают большей энергоэффективностью и дальностью полета. Примером служит российский беспилотник «Геоскан 701», способный непрерывно барражировать до 10 часов и преодолевать до 1 000 км, неся на борту видеокамеру высокого разрешения и тепловизионный модуль. Именно он был выбран для испытаний в национальном парке «Тункинский» в зоне Саяно-Байкальской горно-складчатой области, где сложный рельеф долгое время оставался главным проблемным фактором для охраны лесов от огня. Испытания подтвердили, что дрон не просто транслирует картинку, но благодаря алгоритмам машинного обучения самостоятельно отличает безобидный дым от начинающегося низового пожара и мгновенно передает точные координаты оператору.



Рисунок 1 - БПЛА самолетного типа

- Беспилотные авиационные системы вертолетного типа обеспечивают вертикальный взлет и посадку, критически важные в условиях отсутствия подготовленных площадок. Комплексы ZALA ZARYA-1 и ZALA ZARYA-1M подтвердили свою эффективность в ходе учебно-методических сборов в горах Кавказа, продемонстрировав способность функционировать в экстремальных условиях, включая отсутствие

спутниковой навигации, низкую видимость и сложный рельеф. Альтернативные навигационные системы позволяют им надежно работать даже при полном отсутствии спутниковой связи, а новые каналы связи обеспечивают передачу видеосигнала с тепловизоров и HD-камер на расстоянии свыше 50 км.



Рисунок 2 - Беспилотные авиационные системы вертолетного типа

- Интеллектуальные навигационные системы и алгоритмы. В Передовой инженерной школе Южного федерального университета (Таганрог) создана уникальная всепогодная навигационная система для беспилотников, способная работать там, где спутниковые сигналы недоступны, что открывает новые возможности для применения дронов в сложных метеоусловиях и в любое время суток. Специализированное программное обеспечение реализует режим полета с огибанием рельефа, автоматически выдерживая заданную высоту над поверхностью и следуя изгибам рельефа, что критически важно для качественной аэрофотосъемки и безопасности. Для проектирования таких систем используются современные

учебные пособия по автоматическому управлению беспилотными летательными аппаратами [4].

Традиционная система метеорологических наблюдений имеет фундаментальные ограничения применительно к задаче мониторинга приземного слоя над сложным рельефом. Плотность стационарных метеостанций в России в несколько раз ниже, чем в технически развитых странах, и даже имеющиеся станции дают лишь точечные измерения, не отражающие локальных особенностей, обусловленных рельефом, характером подстилающей поверхности и застройки. В отличие от метеозондов, которые используются однократно и не позволяют выполнять горизонтальные разрезы, беспилотники дают возможность многократного зондирования с высоким пространственным разрешением, а в перспективе — и непрерывного дежурства в заданном районе.

Орографические эффекты и микромасштабная изменчивость атмосферы.

Сложный рельеф не просто создает механические препятствия для полета – он формирует уникальную гидродинамическую среду, в которой возникают явления, практически не встречающиеся над равниной. К ним относятся горно-долинная циркуляция (дневной подъем нагретого воздуха по склонам и ночной сток холодного воздуха в долины), фёны (теплые сухие ветры на подветренных склонах), боры (сильные нисходящие потоки), а также подветренные волны, распространяющиеся на высоты до нескольких километров. Эти процессы имеют горизонтальные масштабы от сотен метров до первых километров и временные масштабы от десятков минут до суток. Стационарная сеть метеостанций, даже в густонаселенных горных регионах, не способна адекватно разрешить такие пространственно-временные вариации из-за дискретности измерений. Метеозонды дают вертикальный профиль, но горизонтальная привязка оказывается случайной из-за ветрового дрейфа, а повторный запуск в ту же точку практически невозможен. Спутниковые наблюдения имеют пространственное разрешение не лучше 1–5 км для

температуры и влажности в нижней тропосфере, что также недостаточно для изучения микромасштабных орографических эффектов.

БПЛА позволяют заполнить этот пробел благодаря возможности программируемого полета с пространственной привязкой. Аппарат может выполнять горизонтальные разрезы на заданных высотах, многократно пересекать долину, следовать вдоль склона или «зависать» в интересующей зоне для регистрации временной эволюции явления. С помощью роя малых БПЛА удастся восстанавливать трехмерное поле ветра в горной долине с разрешением до 50 м, что на порядок превосходит возможности стационарных сетей и сопоставимо с результатами дорогостоящих лидарных сканирований, но при значительно меньшей стоимости и большей оперативной гибкости [9,20].

Особенности установки научной аппаратуры на БПЛА.

Метеорологические измерения с борта беспилотника предъявляют жесткие требования к размещению датчиков. Винтомоторная группа создает интенсивные возмущения потока, нагрев и вибрации. Поэтому датчики температуры и влажности обычно выносятся на штангу в носовой части или на пилон над несущим винтом. Для измерения ветра применяются два основных подхода: либо аэродинамический метод, когда по тангажу, крену и тяге восстанавливается вектор ветра (как в упомянутом сферическом дроне ИТПМ СО РАН), либо установка многоотверстийных датчиков воздушной скорости. В обоих случаях требуется тщательная калибровка и фильтрация данных, чтобы отделить собственное движение аппарата от атмосферной составляющей. Зарубежный опыт, в частности метеодроны Meteomatics (Швейцария), показывает, что при грамотном проектировании удастся достичь точности измерения температуры 0,1 °С, влажности 2 % и скорости ветра 0,5 м/с, что удовлетворяет требованиям ВМО для оперативного метеообеспечения [9].

Энергетические и логистические ограничения.

Несмотря на стремительное развитие аккумуляторных технологий, время полета большинства электрических БПЛА вертикального взлета и посадки (VTOL) в стандартной конфигурации с полезной нагрузкой не превышает 30–60 минут. В условиях холодного климата и высокогорья емкость литий-полимерных батарей дополнительно снижается на 15–30 %. Это вынуждает искать компромисс между детальностью обследования и площадью покрытия. Перспективным направлением является использование гибридных силовых установок (ДВС + электромотор) и водородных топливных элементов, которые уже позволяют достигать продолжительности полета 3–5 часов, как у аппаратов самолетного типа. В то же время для работы в горных ущельях и над городской застройкой чаще требуются мультикоптеры с возможностью зависания, что накладывает еще более жесткие энергетические лимиты [3].

Международный опыт и крупные экспериментальные кампании.

Всемирная метеорологическая организация инициировала кампанию UAS-DC (Unmanned Aircraft Systems Demonstration Campaign), в рамках которой в 2018–2022 гг. были проведены масштабные испытания метеорологических БПЛА в США, Швейцарии, Германии и Венгрии. Одним из ключевых результатов стало доказательство того, что данные с беспилотников могут успешно ассимилироваться оперативными моделями численного прогноза погоды и улучшать качество краткосрочных прогнозов тумана, конвекции и ветра в сложной местности. В Швейцарских Альпах на регулярной основе применяются специализированные дроны для мониторинга состояния ледников и снежного покрова, где использование пилотируемой авиации слишком рискованно. В Японии созданы БПЛА для зондирования вулканических шлейфов, способные работать в агрессивной газовой среде на удалении до 30 км от оператора. Эти примеры демонстрируют, что технология вышла из стадии единичных экспериментов и становится реальным инструментом атмосферных исследований.

Применение БПЛА в условиях сложного рельефа является не просто альтернативой существующим средствам, а безальтернативным методом для получения пространственно-распределенных данных в тех диапазонах масштабов, где традиционные наблюдения либо отсутствуют, либо экономически нецелесообразны.

Ключевые измеряемые параметры и их научная ценность.

Современные измерительные комплексы, устанавливаемые на БПЛА, представляют собой компактные лаборатории, способные фиксировать широкий спектр параметров с высоким пространственным и временным разрешением:

- ❖ Термодинамические профили. Вертикальные и горизонтальные профили температуры, влажности и атмосферного давления являются основой для понимания стратификации АПС. Например, в исследовании над болотами Западной Сибири были подробно изучены ночные инверсии температуры, а также выявлены сильные температурные контрасты подстилающей поверхности, имеющие суточный ход. Эти данные позволяют понять механизмы формирования туманов, заморозков и накопления загрязняющих веществ, что особенно важно в пересеченной местности.

- ❖ Характеристики турбулентности. Это один из самых ценных и труднодоступных типов данных. Контроль турбулентных параметров в пограничном слое (на высотах от ста до десяти тысяч метров) имеет особое значение. В Институте мониторинга климатических и экологических систем (ИМКЭС) СО РАН созданы специализированные БПЛА, позволяющие измерять турбулентность атмосферы. Другой пример — разработка Института теоретической и прикладной механики СО РАН, где создан сферический дрон, корпус которого идеально симметричен для обтекания воздушным потоком, что позволяет по динамике его полета с высокой точностью определять параметры ветра и турбулентности. Понимание структуры турбулентности

необходимо для параметризации этих процессов в моделях, которые пока не могут их напрямую разрешить.

❖ **Параметры ветра.** В горах скорость и направление ветра могут кардинально меняться на расстоянии сотен метров. С помощью БПЛА появляется возможность детального 3D-картирования поля ветра, включая высокоградиентные явления, такие как низкоуровневые струйные течения. Так, венгерские ученые в рамках кампании WMO UAS-DC показали, что БПЛА способны надежно измерять профили ветра вплоть до высоты 3000 м в сложных атмосферных условиях, и эти данные соответствуют строгим оперативным требованиям ВМО [10].

❖ **Газовый состав.** БПЛА позволяют оценивать вертикальные потоки парниковых газов над неоднородной поверхностью, комбинируя измерения концентраций с данными о турбулентной диффузии. В условиях сложного рельефа это незаменимый инструмент для изучения источников и стоков углерода.

Будущее метеорологического применения БПЛА в приземном слое над сложным рельефом связано с тремя магистральными направлениями, которые в совокупности ведут к созданию принципиально новых систем глобального экологического мониторинга:

1) Искусственный интеллект и обработка данных в реальном времени. Современные дроны уже сегодня оснащаются алгоритмами машинного обучения, позволяющими в полете анализировать обстановку — например, отличать безопасный дым от лесного пожара и передавать точные координаты оператору. Дальнейшее развитие нейросетевых методов даст возможность прогнозировать опасные метеорологические явления — вихревые потоки, зоны обледенения — непосредственно в процессе полета, корректируя маршрут в реальном времени.

2) Интеграция в глобальные наблюдательные сети. Данные с беспилотников будут в реальном времени поступать в единые базы, аналогичные WIGOS Всемирной метеорологической организации, и

ассимилироваться прогностическими моделями. Как показал опыт кампании UAS-DC, данные, собранные БПЛА и оперативно переданные в глобальную сеть, могут напрямую влиять на точность прогнозов погоды. В перспективе, по мнению специалистов РАН, дроны смогут значительно сократить спрос на некоторые типы спутниковой информации сверхвысокого разрешения, предоставляя более дешевый, гибкий и оперативный источник данных.

3) Обеспечение безопасности самих беспилотников. Взрывное развитие беспилотных авиационных систем поставило перед метеорологами и инженерами практическую задачу: дроны больше, чем пилотируемая авиация, зависят от состояния атмосферы, и их массовое применение требует создания специализированных систем метеообеспечения полетов. Таким образом, метеорологические БПЛА становятся не только инструментом для сбора научных данных, но и элементом инфраструктуры безопасности формирующейся отрасли беспилотной авиации.

## 1.2 Оптимальное планирование траектории БПЛА на территории со сложным рельефом

Традиционные методы планирования маршрута, основанные на полете по прямой или обходе препятствий по простым правилам, здесь работают плохо. Сложный рельеф создает ветровые завихрения, зоны турбулентности, внезапные восходящие и нисходящие потоки, а также десятки локальных препятствий (скалы, деревья, здания). Навигация по спутниковым картам без учета трёхмерной структуры местности приводит к двум проблемам: резкому росту энергопотребления (дрону приходится постоянно набирать высоту или облетать уступы) и потере связи или столкновению с препятствиями.

Оптимальное планирование траектории – это математически обоснованный метод построения пути БПЛА, который минимизирует заданный критерий (время, энергия, риск, погрешность измерений) при соблюдении ограничений (рельеф, воздушные потоки, дальность связи, ресурс батареи). В отличие от простого «долети из А в Б», оптимизация учитывает третье измерение и динамику среды.

Обеспечение безопасности полета. Основная причина – предотвращение столкновений с землёй и препятствиями. Автоматическое планирование с использованием цифровых моделей рельефа (ЦМР) гарантирует, что траектория пройдёт на безопасном удалении (например, не менее 50 м по вертикали от самой высокой точки в коридоре). Без оптимизации безопасный путь получится избыточно длинным или технически неосуществимым.

Экономия энергоресурса. Аккумулятор – главное ограничение для большинства мультикоптеров. Подъём на лишние 100 метров над рельефом может стоить до 20–30% дополнительной энергии. Оптимальный план выбирает такой путь, где суммарная работа против силы тяжести и аэродинамического сопротивления минимальна. Вместо подъёма на постоянную абсолютную высоту (например, 300 м над уровнем моря) дрон летит по «энергооптимальной» траектории – обходит пики по седловинам, использует долины, избегает лишних наборов высоты.

Повышение качества полезной нагрузки. Многие задачи (фотосъёмка, лазерное сканирование, отбор проб воздуха) требуют устойчивого положения дрона и определённых ракурсов. Хаотичная траектория, вызванная постоянными маневрами уклонения от рельефа, снижает качество данных. Оптимизированный маршрут закладывает плавные повороты и зоны горизонтального полета, где сенсоры работают в штатном режиме. Например: без оптимизации на перелёты уходит 80% заряда, на работу – 20%. С оптимизацией – 50% на 50%. Время активной работы увеличивается в 2,5 раза.

Повышение качества и повторяемости данных

- Стабильные условия измерения: плавная траектория без рывков и кренов обеспечивает меньше вибраций, чёткие снимки и стабильные показания датчиков.
- Исключение загрязнения метеоданных: дрон не залетает в зоны собственного турбулентного следа или подветренных завихрений, где температура/ветер искажены. Измерения становятся репрезентативными.

- Возможность точного повторного пролёта – если траектория сохранена и оптимальна, через час или через день можно пройти по тем же точкам, что важно для мониторинга изменений (таяние ледника, рост растительности).

Адаптация к меняющимся условиям в реальном времени

Современные методы позволяют перепланировать траекторию на лету при изменении ветра, появлении препятствия (птица, другой дрон, внезапное облако) или сбое GNSS. Это особенно ценно в ущельях, где погода меняется мгновенно.

Плюс: миссия не прерывается – дрон автоматически находит новый оптимальный путь к цели.

Для организаций, выполняющих сотни полётов в год (геология, сельское хозяйство в холмистой местности, лесное хозяйство), экономия энергии и ресурсов напрямую переводится в деньги:

- Меньше зарядных станций, реже замена батарей.
- Меньше потерянных дронов из-за аварий.
- Больше выполненных миссий за рабочий день (за счёт сокращения времени перелётов).

По оценкам эксплуатантов, внедрение оптимального планирования снижает стоимость одного часа полёта на 25–35% в сложном рельефе.

Значимость использования оптимального маршрута для метеорологии и измерений метеопараметров

Обеспечение репрезентативности измерений

Метеорологу нужны значения температуры, влажности, давления и ветра, характерные для невозмущённой среды. Если дрон пролетает через зону завихрения за скалой, датчик покажет ветер с ошибкой до 180° по направлению и 50% по скорости. При подъёме по склону над нагретой каменистой поверхностью дрон попадает в термик с температурой на 2–3°C выше окружающего воздуха. Оптимальный маршрут должен избегать таких

искажённых зон, либо, наоборот, намеренно включать их в траекторию, если цель – изучить микроклимат склона.

Значимость: использование оптимальной траектории повышает достоверность измерений с 60% (данные часто загрязнены артефактами) до 95% в контрольных точках.

Возможность измерения вертикальных профилей в сложных условиях

В горах вертикальный профиль температуры и влажности может сильно меняться на расстоянии сотен метров по горизонтали. Стандартный способ – лететь строго вверх по спирали или «лесенкой». Но при наличии бокового ветра и рельефа такая траектория часто невозможна: дрон будет сносить на склон или в ущелье. Оптимальное планирование позволяет рассчитать псевдовертикальный профиль – серию горизонтальных отрезков на разных высотах, соединяющих точки, где рельеф безопасен и ветер минимален. Затем эти точки интерполируются в истинный вертикальный профиль с поправкой на горизонтальную неоднородность.

Минимизация самовлияния БПЛА на измеряемую среду

Дрон винтовыми потоками и теплом от двигателя изменяет параметры окружающего воздуха в радиусе 1–3 метров. Для чистых измерений датчики выносят на штанге, но при облёте препятствий дрон вынужден маневрировать, и штанга попадает в возмущённую зону. Оптимальный маршрут планируется так, чтобы избегать крутых разворотов вблизи измерительной фазы и поддерживать постоянную скорость. Кроме того, траектория может проходить под углом к ветру, чтобы шлейф от винтов не накрывал датчики.

Сбор данных в критических для метеорологии зонах

Для прогноза погоды в горных районах важно знать структуру ветра над перевалами и в ущельях – именно там формируются опасные явления (нисходящие потоки, боры, долинные ветры). Однако эти зоны характеризуются сильной турбулентностью и переменным давлением. Оптимальный маршрут может быть спроектирован с учётом риска – дрон приближается к критической зоне по касательной, делает быстрое измерение

и уходит, не входя в зону разрушительных порывов. Без планирования дрон либо вовсе не рискует туда залететь (теряя данные), либо теряется.

Использование для калибровки и валидации спутниковых данных

Спутниковые снимки температуры поверхности и концентрации аэрозолей в горной местности страдают от смешивания пикселей с разной высотой. БПЛА, летающий по оптимальному маршруту (сетка точек, привязанная к элементам рельефа), даёт наземную истину для каждого типа поверхности. Без оптимизации дрон тратит 80% времени на перелёты между точками, а с оптимизацией – только 40%, удваивая число измерений за один вылет.

На территориях со сложным рельефом любой неоптимизированный полёт БПЛА неизбежно либо опасен, либо неэффективен, либо даёт низкое качество данных. Мы показали, что:

Безопасность – маршрут учитывает рельеф, турбулентность и линию связи, снижая аварийность на порядок.

Энергоэффективность – типичный выигрыш 20–40%, что для многих миссий является условием выполнимости.

Качество метеоданных – возможность избегать искажённых зон, сохранять репрезентативность и измерять профили там, где шары и спутники бессильны.

Экономическая и операционная эффективность – меньше обслуживания, больше полётов на одном заряде, автоматизация.

Значимость для метеорологии отдельно стоит подчеркнуть: именно оптимальное планирование превращает БПЛА из «игрушки, которая иногда летает в горах» в полноценный инструмент микромасштабного прогноза и климатического мониторинга. Без него данные с дронов часто не лучше, чем численное моделирование без привязки к реальности – просто более шумные и смещённые.

Но уже сейчас внедрение оптимальных траекторий для БПЛА в сложном рельефе – это стандарт передовой практики, без которого не обходится ни одна профессиональная миссия.

#### Формализация задачи планирования

С математической точки зрения задача построения оптимальной траектории метеорологического БПЛА может быть сформулирована как задача многокритериальной оптимизации в трехмерном пространстве с нестационарными ограничениями [7,21]. Пусть состояние БПЛА описывается вектором  $x(t) = [x, y, z, V, \psi, m]$ , где  $(x, y, z)$  – пространственные координаты,  $V$  – воздушная скорость,  $\psi$  – путевой угол,  $m$  – оставшаяся масса (заряд батареи). Требуется найти такую последовательность управляющих воздействий  $u(t)$  (углы крена, тангажа, тяга), которая минимизирует целевую функцию:

$$J = w_1 E_{\text{total}} + w_2 I_{\text{info}} + w_3 R_{\text{risk}}$$

где  $E_{\text{total}}$  – затраченная энергия,  $I_{\text{info}}$  – информационная ценность собранных данных (определяемая через функцию энтропии или дисперсию реконструированного метеополя),  $R_{\text{risk}}$  – интегральный риск столкновения с рельефом или попадания в зону опасной турбулентности,  $w_i$  – весовые коэффициенты, определяемые приоритетами миссии.

Ограничения включают: динамические уравнения движения БПЛА, минимальный и максимальный радиус разворота, предельную высоту полета над рельефом (обычно задается «коридор»  $h_{\min} \dots h_{\max}$  относительно ЦМР), минимальный запас энергии для возврата, запретные зоны (густая застройка, воздушные линии электропередач). Особенностью метеорологических миссий является то, что поле среды само зависит от траектории измерений – появляется обратная связь «измерение → коррекция маршрута → новые измерения». Этот замкнутый контур превращает задачу в проблему стохастического оптимального управления, для решения которой применяются методы динамического программирования, адаптивного управления и машинного обучения с подкреплением [21].

Классификация подходов к планированию в пересеченной местности. Методы построения траекторий над сложным рельефом можно разделить на три большие группы:

1. Геометрические методы – наиболее простые и распространенные. Они оперируют только пространственной геометрией и ЦМР. К ним относятся классическая «змейка», трапецеидальное разбиение, спиральные развертки. Эти методы гарантируют полноту покрытия и минимизацию пропусков, но не учитывают динамику среды и энергетику БПЛА. Для улучшения характеристик применяют оптимизацию направления галсов по критерию минимального перепада высот вдоль маршрута, что позволяет снизить суммарный набор высоты на 15–25 % [6,7].

2. Энергооптимальные методы – в них минимизируется функционал затрат энергии, зависящий от траектории. Используются графовые алгоритмы ( $A^*$  на трехмерной сетке), быстро-исследуемые случайные деревья ( $RRT^*$ ), потенциально-полевые методы. Например, в работе предложен модифицированный алгоритм  $RRT^*$ , который при построении вершин использует метрику энергетической стоимости перехода между двумя точками с учетом подъема/спуска и ожидаемого ветра. Результаты симуляций показали экономию энергии до 35 % по сравнению с  $RRT^*$  без учета рельефа.

3. Информационно-управляемые методы – наиболее актуальны для научных метеорологических миссий. Здесь траектория оптимизируется в реальном времени на основе оценки неопределенности текущей карты метеополей. Дрон стремится посетить те точки, где дисперсия интерполированного поля максимальна, тем самым сокращая общую ошибку восстановления. Такой подход, известный как «адаптивная выборка» или «информативное планирование маршрута», активно развивается в контексте мониторинга окружающей среды. Его главный недостаток – высокая вычислительная нагрузка на бортовой процессор, что требует применения эффективных эвристик [18].

Учет ветра и турбулентности при прокладке маршрута. Ветер оказывает двойное влияние на БПЛА: с одной стороны, он вызывает снос и отклонение от намеченного пути, с другой – может быть использован как энергетический ресурс (попутный ветер) или создавать дополнительную опасность (турбулентные порывы, сдвиг ветра). Современные алгоритмы планирования учитывают поле ветра двумя основными способами. Первый – статическая коррекция: на основе прогностической или климатической модели ветра (например, GFS или COSMO) вычисляется оптимальный угол галсов, при котором боковой снос минимален, а встречно-попутная составляющая снижает общее энергопотребление. Второй – динамическая адаптация: бортовой автопилот оценивает фактический ветер по рассогласованию путевой и воздушной скорости и оперативно корректирует курс и высоту.

Особую проблему представляет полет в зонах с сильной орографической турбулентностью. В таких условиях БПЛА испытывает резкие крены и вертикальные порывы, что не только ухудшает качество измерений, но и может привести к срыву в неконтролируемое падение. При планировании миссии области с высокой вероятностью турбулентности (подветренные склоны, узкие каньоны, зоны сдвига ветра) выделяются как зоны риска, для которых устанавливаются специальные правила: либо полет по касательной на повышенной скорости, либо полный обход, если риск превышает критический порог.

Энергетические модели БПЛА. Точный расчет затрат энергии необходим как для сравнения траекторий, так и для обеспечения безопасности полета. В простейшем случае используется линейная модель, принятая и в данной работе ( $C = \alpha \cdot L + \beta \cdot \Theta$ ). Однако более детальные исследования показывают, что потребляемая мощность мультикоптера существенно зависит от вертикальной скорости и плотности воздуха. При полете в разреженном воздухе высокогорья потребление возрастает на 15–40 % из-за уменьшения подъемной силы винтов. Кроме того, на больших высотах снижается КПД электродвигателей. Эти факторы должны учитываться при планировании

миссий над высокогорным рельефом. В самолетных схемах БПЛА набор высоты является самой энергозатратной фазой, поэтому оптимизация вертикального профиля (использование восходящих потоков, термиков, динамического парения) является предметом активных исследований в области метеорологической робототехники [17].

Таким образом, оптимальное планирование траектории для метеорологических БПЛА в условиях сложного рельефа представляет собой комплексную проблему, решение которой требует синтеза методов вычислительной геометрии, теории оптимального управления, аэродинамики и динамической метеорологии. Разработка подобных алгоритмов не только повышает научную отдачу от миссий, но и делает полеты экономически оправданными и безопасными.

### 1.3 Методы оптимального планирования траектории БПЛА

#### Методы покрытия области для БПЛА

Это задача поиска оптимального маршрута для БПЛА, который должен полностью обследовать заданную область с помощью своих датчиков и сенсоров.

Как мы представляем область

1) Рабочая область — физическое 2D или 3D пространство, над которым летает БПЛА.

2) Область покрытия — подмножество рабочей области, которое нужно обследовать. Может быть выпуклой или невыпуклой, с препятствиями или без них.

3) Модель сенсора — определяет способ покрытия площади.

Точечный сенсор: данные собираются строго под БПЛА (например, взять пробу воздуха). Покрытие — сама траектория.

Сенсор с полосой обзора (самый распространённый случай): датчик (камера, лидар) «освещает» на земле полосу фиксированной ширины  $w$ . Покрытие — это объединение этих полос вдоль траектории.

Основные входные параметры:

Ширина обзора — зависит от датчика и высоты полёта.

Перекрытие:

- 1) Продольное — нужно для стереосъёмки или чтобы не пропустить объект между двумя снимками.
- 2) Поперечное — чтобы в промежутках между соседними галсами не было пропусков. Обычно задаётся в диапазоне 20–30%.
- 3) Галс — прямой, линейный участок траектории, который летательный аппарат проходит без смены курса. Это одна из серий параллельных линий, образующих паттерн движения, напоминающий «змею».
- 4) Направление галсов — один из главных параметров для оптимизации.

Метод «Змейка»

Метод «Змейка» – геометрический способ планирования маршрута БПЛА, при котором аппарат движется параллельными прямолинейными галсами, соединёнными разворотами на границах зоны. В метеорологии используются два основных варианта:

- Горизонтальная змейка – полёт на постоянной высоте для площадной съёмки горизонтальных полей метеовеличин (температуры, влажности, ветра, потоков тепла).
- Вертикальная змейка – полёт в вертикальной плоскости с циклическим подъёмом и спуском для многократного сканирования одного и того же столба атмосферы и получения детального вертикального профиля.

Цель – равномерное, без пропусков покрытие заданной области (прямоугольника в горизонтальной плоскости или вертикального разреза) с необходимым пространственным разрешением.

При поворотах БПЛА может выполнить маневры:

- «Гребенка» — БПЛА достигает конца галса, разворачивается и летит вдоль следующего. Прост в реализации, но в итоге остаются пустые пролёты над уже покрытой областью.

- «Адаптивный разворот» — алгоритм строит разворотную дугу, минимизирующую расстояние вне зоны покрытия. Сложнее в расчетах, зато эффективнее.

Этот метод хорошо работает для простых, выпуклых или почти выпуклых областей. Это самый распространённый метод на практике благодаря своей простоте и надёжности.

Алгоритм построения:

Задание исходных данных

- $H_{min}$  и  $H_{max}$  границы зондирования.
- Горизонтальная протяжённость одного галса  $L$  (или координаты старта/финиша).
- Вертикальная скорость набора и снижения  $V_z$  (обычно выбирается оптимальной для датчиков,  $\sim 2-5$  м/с).
- Количество циклов «вверх-вниз»  $N$  или общее время профилирования.

Расчёт параметров одного цикла

- Длина наклонного участка:  $S = (H_{max} - H_{min}) / \sin \theta$ , где  $\theta = \arcsin (V_z / V_{путевая})$  (угол наклона траектории).
- Время цикла:  $T_{цикл} = 2 \cdot (H_{max} - H_{min}) / V_z$

Формирование путевых точек

- Точка 1: старт,  $H_{min}$
- Точка 2: подъём до  $H_{max}$  постоянной  $V_z$ .
- Точка 3: снижение до  $H_{min}$ .
- Повтор точек 2–3  $N$  раз, при этом БПЛА движется вперёд-назад по одной и той же линии (или с очень малым смещением).
- При необходимости добавить плавные развороты на границах (дуги или каплевидные манёвры) без резкой потери высоты.

Выходной маршрут загружается в автопилот как последовательность координат и высот с заданной воздушной скоростью.

Примечание для горизонтальной змейки: алгоритм аналогичен, но галсы строятся на постоянной высоте, а расстояние между ними  $d$  равно ширине захвата прибора. Маршрут генерируется для прямоугольного полигона с учётом направления ветра (галсы стараются прокладывать поперёк ветра).

На территории БПЛА передвигается по параллельным линиям, между линиями БПЛА двигается без поворота, разворот происходит, когда БПЛА достиг следующего галса. Развороты происходят под 90 градусов. При таком методе БПЛА равномерно обследует территорию с минимальными пропусками. Но есть минус, при таком методе, траекторию корректировать не получится, БПЛА движется по заранее заданному маршруту. Измерения параметров проводятся на параллельных линиях (галсах). БПЛА облетает весь маршрут без перерыва и проводит измерения в точках на маршруте

Плюсы метода для метеорологии

1) Высокая детализация профиля/поля. Вертикальная змейка даёт практически непрерывный высотный разрез без «ступенек»; горизонтальная — плотную регулярную сетку измерений.

2) Простота реализации. Алгоритм легко программируется в стандартных полётных контроллерах (ArduPilot, PX4) через штатные инструменты построения сетки [12].

3) Отличная повторяемость. Многократное прохождение одной и той же линии (вертикальный вариант) или регулярной сетки позволяет осреднять данные и снижать случайные ошибки.

4) Эффективный расход энергии. Прямолинейные галсы оптимальны для аэродинамического полёта самолётного типа.

Недостатки метода для метеорологии

1) Чувствительность к ветру. При вертикальной змейке боковой снос уводит БПЛА от исходной вертикали, и цикл захватывает разные воздушные массы; при горизонтальной — нарушается параллельность галсов, возникают пропуски в покрытии.

2) Ограниченная репрезентативность. Вертикальная змейка даёт информацию лишь вдоль одной линии; для трёхмерной картины требуется несколько параллельных разрезов, что увеличивает полётное время.

3) Краевые эффекты. Развороты на концах галсов вынуждают БПЛА покидать рабочую зону, оставляя непросканированные участки, если радиус разворота сопоставим с шагом сетки [8].

#### Метод песочные часы

Метод «песочные часы» – простейший способ планирования траектории, при котором БПЛА последовательно облетает четыре опорные точки, расположенные в углах прямоугольной области, в порядке: левый верх → правый верх → левый низ → правый низ → возврат в левый верх. Траектория напоминает две пересекающиеся диагонали, что и дало название. Метод не требует оптимизации и легко реализуется на практике.

#### Алгоритм:

1. Задать координаты четырёх опорных точек в порядке: А (левый верх), В (правый верх), С (левый низ), D (правый низ).
2. Сформировать последовательность путевых точек миссии:
  - Старт и зависание/фиксация в А
  - Прямолинейный горизонтальный полёт из А в В.
  - Пролёт из В в С (диагональ, проходящая через центр прямоугольника).
  - Пролёт из С в D.
  - Пролёт из D обратно в А (вторая диагональ через центр).
3. Завершение миссии (посадка или переход на другую траекторию) в точке А после замыкания цикла.
4. При необходимости можно задать несколько повторений этого замкнутого контура.

#### Дополнительные настройки для метеорологических измерений:

- 1) Все четыре перелёта выполняются на одной высоте, обеспечивая площадной срез атмосферы.

2) Если требуется более детальное покрытие, размеры прямоугольника выбирают так, чтобы диагонали перекрывали интересующую зону (например, центр полигона — место установки наземной метеостанции).

3) При заметном ветре в путевые точки можно ввести поправку на угол сноса, чтобы фактические линии пути над землёй в точности проходили через заданные углы.

Плюсы данного метода для метеорологии

- Предельная простота – легко задать на любом автопилоте даже ручную, без специального ПО.
- Быстрый обзор – за короткое время БПЛА дважды пересекает центр области, собирая данные с перекрёстного направления. Это удобно для проверки однородности поля (например, приземной температуры) или калибровки датчиков.
- Минимальные вычислительные затраты – не требуется генерация сетки, достаточно координат четырёх углов.
- Хорошая повторяемость при многократном пролёте по одной и той же замкнутой траектории.

Недостатки

- Неравномерное покрытие площади – углы прямоугольника сканируются один раз, центр — дважды, а середина боковых сторон — ни разу, что даёт неполную картину горизонтальной изменчивости.
- Чувствительность к ветру – при сильном боковом ветре диагонали могут сместиться, и центр пересечения окажется не над ожидаемой точкой.
- Возможные вихревые искажения – повторный пролёт через собственный турбулентный след (особенно у коптеров) может повлиять на точность измерений температуры и газов в центре.
- Ограниченная площадь – для больших полигонов метод неэффективен, так как данные собираются лишь вдоль двух узких линий.

Метод трапецеидальное разбиение области

Метод трапецеидального разбиения области — это способ планирования покрывающей траектории БПЛА над полигоном произвольной формы. Область разбивается на непересекающиеся трапеции, внутри каждой из которых выполняется простая «змейка» с параллельными галсами. Метод позволяет минимизировать пропуски и перекрытия на границах и даёт непрерывный маршрут обхода всех подобластей [6].

Заданный полигон раскладывается на множество трапеций путём проведения вертикальных (или наклонных — по выбранному направлению сканирования) линий через каждую вершину полигона до пересечения с противоположной границей. После разбиения внутри каждой трапеции строится обычная горизонтальная змейка с галсами, параллельными направлению разбиения. Затем траектории отдельных трапеций соединяются в единый путь обхода, например, движением вдоль границ разбиения или по специальным переходным дугам. В итоге БПЛА полным образом покрывает область без захода за её пределы.

Алгоритм планирования:

Исходные данные

- Полигон области интереса (набор вершин в порядке обхода).
- Предпочтительное направление галсов (обычно поперёк преобладающего ветра или параллельно одной из осей, например, «север-юг»).
- Высота и скорость полёта, ширина захвата аппаратуры d.

Трапецеидальная декомпозиция:

- Через каждую вершину полигона проводятся линии параллельно выбранному направлению (например, вертикальные), распространяющиеся в обе стороны до пересечения с границами полигона.
- Отрезки этих линий внутри полигона делят его на непересекающиеся трапеции (или треугольники, если линия совпадает с вершиной-границей).
- Полученные трапеции упорядочиваются, строится граф смежности (какие трапеции имеют общие вертикальные границы).

Планирование змейки внутри каждой трапеции:

- Для каждой трапеции, с учётом её высоты (протяжённости поперёк галсов), рассчитывается число параллельных галсов с шагом  $d$ , стартуя от одного из оснований трапеции (например, от более короткого).

- Галсы обрезаются по боковым границам трапеции; крайние галсы могут быть неполными.

Соединение траекторий (обход):

- Обход начинается с одной из крайних трапеций.
- Траектория строится так, чтобы за один проход покрыть все галсы всех трапеций без повторного прохождения одной линии, с минимальным холостым пробегом.

- Переходы между трапециями выполняются вдоль общих вертикальных границ (перемещением без измерений) или с использованием специальных манёвров.

- В результате формируется единый последовательный список путевых точек, охватывающий всю площадь полигона без выхода за его границы.

Оптимизация (опционально):

- Выбирается оптимальное направление разбиения для минимизации числа трапеций или числа разворотов.

- При сильном ветре в путевые точки вносится поправка на снос, чтобы фактические линии пути оставались параллельными заданному направлению.

Плюсы метода для метеорологии

- 1) Универсальность формы. Позволяет эффективно обследовать поля, лесные массивы, городские районы и другие территории сложной формы, сводя к минимуму пропуски и вылеты за границы.

2) Равномерность покрытия. Благодаря подгонке галсов под локальную ширину трапеции достигается постоянное перекрытие и одинаковая плотность измерений по всей области.

3) Автоматическая обработка границ. Отсечение галсов по границам полигона избавляет от ручной подгонки прямоугольной сетки и перекрытия за пределами рабочей зоны.

4) Хорошая масштабируемость. Метод легко алгоритмизируется для любых многоугольных областей и реализован в наземных станциях управления (Mission Planner, UgCS и др.).

#### Недостатки метода для метеорологии

1) Вычислительная сложность. Декомпозиция произвольного полигона требует аккуратных геометрических вычислений, что усложняет ручную настройку в полевых условиях.

2) Чувствительность к выбору направления. Неудачный угол разбиения (например, параллельно длинной стороне сложного полигона) может породить избыточное число узких трапеций и частых разворотов, увеличивая расход энергии и время полёта.

3) Проблема ветра. При значительном боковом сносе идеально параллельные галсы могут перестать стыковаться с изрезанными боковыми границами трапеции, вызывая нежелательные пропуски.

4) Неоптимальность для вертикального зондирования. Метод ориентирован на площадную съёмку; для детального профилирования атмосферы предпочтительнее специализированные вертикальные траектории (песочные часы, спирали).

5) Избыточные перелёты в узких местах. Если полигон содержит резкие сужения, в них может потребоваться несколько коротких галсов с частыми разворотами, что приводит к повышенному расходу заряда аккумулятора.

#### Спиральные алгоритмы

Спиральные алгоритмы – класс методов построения траектории БПЛА в виде плавной кривой с постепенно изменяющимся радиусом, обеспечивающей покрытие площади без резких разворотов на  $180^\circ$  [7].

БПЛА движется по раскручивающейся (от центра к периферии) или закручивающейся (от границы к центру) спирали, сохраняя постоянную путевую скорость. Расстояние между соседними витками выбирается равным эффективной ширине захвата измерительной аппаратуры. Основная математическая модель – Архимедова спираль, обеспечивающая равномерное перекрытие. Логарифмическая и энергоэффективная спирали являются производными, адаптированными под специальные требования.

Алгоритм построения:

Задать входные данные

- Центр области  $(x_0, y_0)$ , максимальный радиус  $R_{\max}$ , высоту  $H$ , ширину захвата  $d$ , путевую скорость  $V$ .
- Определить тип спирали: раскручивающаяся (от центра) или закручивающаяся (с края).

Вычислить параметры спирали:

- Коэффициент шага:  $a = d / (2\pi)$ .
- Число витков:  $N = (R_{\max} - R_{\min}) / d$  (обычно  $R_{\min} = 0$  или минимальный радиус разворота).
- Максимальный угол:  $\Theta_{\max} = 2\pi N$ .

Дискретизировать траекторию:

- Выбрать угловой шаг  $\Delta\theta$  (по расстоянию между точками  $\Delta s \approx 1 - 5$  м:  $\Delta\theta \approx \Delta s / r$ ).
- Сформировать последовательность углов  $\theta_i$  (от 0 до  $\Theta_{\max}$  для раскручивающейся, или в обратном порядке для закручивающейся).
- Вычислить радиусы:  $r_i = R_{\min} + a \cdot \theta_i$ .

Перевести в декартовы координаты:

- $x_i = x_0 + r_i \cos \theta_i, y_i = y_0 + r_i \sin \theta_i$ .
- Если рабочая область не круговая, оставить только точки, попадающие внутрь заданного полигона.

Учесть ветер (при необходимости):

Скорректировать координаты на расчётный снос или сместить весь узор на вектор сноса, чтобы сохранить равномерное межвитковое расстояние.

Добавить начальный/конечный участок

- Стартовать из центра (или с периметра) с набором высоты, затем перейти на спираль.
- После завершения витков добавить путь возврата или посадки.

При использовании логарифмической спирали вместо  $r = R_{\min} + a\theta$  берётся  $r = R_{\min} e^{b\theta}$ , параметр  $b$  подбирается под требуемую переменную плотность покрытия.

Преимущества алгоритмов:

1) Снижение энергопотребления за счёт плавного изменения направления движения. Поскольку потребление энергии напрямую связано с количеством манёвров, спиральная траектория, требующая меньше резких разворотов по сравнению со «змейкой», обеспечивает лучшую энергетическую эффективность.

2) Улучшенная локализация и навигация: в условиях ограниченной информации спиральное движение позволяет сохранять наблюдаемость системы, что повышает точность оценки местоположения

3) Высокая адаптивность: параметры спирали могут подбираться в зависимости от требуемого разрешения, перекрытия снимков и скорости полёта, что невозможно при зигзагообразных схемах.

4) Масштабируемость: спиральные алгоритмы естественным образом распространяются на групповое управление БПЛА, позволяя организовать скоординированное обследование больших территорий

Недостатки алгоритмов:

1) Неоптимальность для прямоугольных областей: при облёте обширных территорий, близких по форме к прямоугольнику, зигзагообразная схема может обеспечить лучшее покрытие за счёт сокращения «холостых» участков траектории. Спиральная траектория оказывается выгоднее при круговых и неправильных формах областей.

2) Неравномерная плотность покрытия: при фиксированном угловом шаге линейная скорость движения БПЛА вдоль спирали непостоянна, что может приводить к избыточному перекрытию во внутренних витках и недостаточному — на внешних.

3) Повышенная сложность вычислений: по сравнению с простыми эталонными методами спиральные алгоритмы требуют больших вычислительных затрат на этапе подготовки маршрута.

#### Метод адаптивного перепланирования

Метод адаптивного перепланирования — это подход, при котором траектория БПЛА не фиксируется жёстко перед вылетом, а динамически корректируется в полёте на основе текущих измерений и внешних условий [21]. Для метеорологических задач это означает способность аппарата самостоятельно менять маршрут, чтобы, например, следовать за движущимся атмосферным фронтом, уточнять зоны высокой изменчивости параметров или огибать опасные явления.

Суть метода заключается в том, что БПЛА оснащается набором датчиков (температуры, влажности, ветра, газоанализаторы, лидары и т.д.), данные с которых в реальном времени поступают в бортовой вычислитель. Специальный алгоритм оценивает текущую метеорологическую обстановку, сравнивает её с целями миссии и, если необходимо, перестраивает оставшуюся часть маршрута — добавляет новые галсы, сгущает измерения в интересных областях, изменяет высоту или полностью меняет план для отслеживания явления. Процесс идёт циклически на протяжении всего полёта, обеспечивая максимальную информативность собранных данных при ограниченном ресурсе батареи.

Алгоритм адаптивного перепланирования:

В общем виде работа алгоритма выглядит как замкнутый контур «наблюдение – анализ – решение – обновление плана»:

Выполнение текущего плана и сбор данных:

БПЛА движется по ранее загруженному базовому плану (например, «змейка» или спираль) и одновременно проводит измерения с частотой, достаточной для оценки пространственно-временной изменчивости.

Оценка метеорологической ситуации:

На основе скользящего окна последних измерений вычисляются:

- градиенты ключевых величин (температуры, влажности, концентрации примеси);
- наличие резких фронтов, инверсий, шлейфов;
- отклонение наблюдаемой картины от прогностической модели (если она загружена).

Принятие решения о необходимости перепланирования:

Если градиент в некотором направлении превышает порог, или обнаружена аномалия (например, рост концентрации CO<sub>2</sub>), алгоритм помечает эту зону как приоритетную. Также учитываются оставшийся заряд батареи и время полёта — новая траектория должна укладываться в энергетический бюджет.

Генерация нового локального плана:

В окрестности выявленного интереса автоматически строится дополнительный участок траектории. Обычно это:

- Ступающая «змейка» поперёк градиента для детального картирования;
- Сопровождающая спираль вокруг движущегося объекта (например, ядра выброса);
- Профилирующая вертикальная «змейка» для зондирования аномального слоя.

Если явление смещается, маршрут пересчитывается с учётом его скорости и направления.

Замена части оставшегося плана и продолжение полёта:

Новый фрагмент бесшовно вставляется в текущую миссию. Старые участки, ставшие неактуальными, удаляются. Цикл повторяется с п. 1 до исчерпания ресурса или достижения целей.

В современных реализациях часто используют методы машинного обучения или модельно-прогностическое управление, способные прогнозировать эволюцию атмосферы на ближайшие минуты и заранее прокладывать оптимальный путь.

Плюсы для метеорологии:

- 1) Максимальная информативность. Аппарат сам фокусируется на областях с высокой динамикой, а не тратит время на однородные участки.
- 2) Отслеживание перемещающихся явлений. Позволяет «оседлать» термик, пыльный вихрь, шлейф загрязнения, что недоступно фиксированным планам.
- 3) Безопасность. Возможность оперативно обходить зоны турбулентности, гроз, сильного обледенения, информация о которых получена от бортовых датчиков или наземного центра.

Недостатки:

- 1) Высокая вычислительная сложность. Бортовому компьютеру требуется быстро решать задачи оптимизации и обработки данных, что увеличивает энергопотребление и стоимость.
- 2) Зависимость от качества сенсоров и алгоритмов обнаружения. Ложные срабатывания могут увести аппарат в сторону, а пропуск резкого градиента — оставить важную область необследованной.
- 3) Трудность интерпретации. Постфактум сложнее восстановить мотивацию каждого поворота, что усложняет валидацию данных.

Градиентные методы измерения

Вместо того чтобы заранее планировать весь путь, БПЛА в реальном времени принимает решения о направлении движения, основываясь на пространственных производных (градиентах) измеряемых полей. Цель данного метода заключается в автономном отслеживании ключевых атмосферных параметров [18].

Температурный градиент  $\nabla T(x,y) = (\partial T/\partial x, \partial T/\partial y)$

Ветровой градиент  $\nabla V(x,y)$  — это уже тензор, так как ветер сам по себе является векторным полем. Но часто работают с градиентами его компонент (например, градиент скорости ветра).

Алгоритм следования градиенту

Основная формула движения:  $\dot{x} = k \cdot \nabla \Phi(x)$ , где

- $x$  — вектор координат БПЛА ( $[x, y, z]$ ).
- $\dot{x}$  — производная по времени, т.е. вектор скорости БПЛА.
- $k$  — коэффициент усиления (скорость реакции). Может быть скаляром или матрицей.
- $\nabla \Phi(x)$  — градиент целевого поля в точке  $x$ .

На практике этот алгоритм реализуется в виде цикла:

Сначала происходит измерение - БПЛА в точке  $x(t)$  измеряет поле  $\Phi$  (например, температуру).

Дальше происходит, оценка градиента. Для того чтобы вычислить  $\nabla \Phi$ , нужно знать поле в окрестности. Это делается двумя основными способами:

Первый способ - по предыдущим измерениям: БПЛА хранит последние  $N$  точек и по ним аппроксимирует градиент (метод конечных разностей).

Второй способ - с помощью группы БПЛА. А то есть, несколько аппаратов в режиме реального времени обмениваются данными, что позволяет мгновенно оценить градиент в некоторой области.

БПЛА в режиме реального времени меняет траекторию в зависимости от изменения параметра. Задается измерить какой-либо параметр, и БПЛА сам ищет точки, наиболее подходящие для измерения. Так как расстояние большое и БПЛА принимает решение сам, расход энергии увеличивается,

соответственно и время его работы. Такой метод позволяет тщательно измерить параметр, но при этом очень много тратится ресурсов. БПЛА запускается несколько раз в разных точках маршрута. Также главная проблема этого метода - повороты, на которых он тратит значительную часть энергии. Так что, этот метод подходит только для очень подробного измерения конкретного параметра.

#### Сравнительный анализ методов планирования траекторий для БПЛА

Таблица 1 - Сравнительный анализ всех методов планирования траектории

| Алгоритм                    | Змейка                    | Песочные часы | Трапецеидальное разбиение | Градиентные методы | Методы адаптивного перепланирования | Спиральные алгоритмы |
|-----------------------------|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------------|-------------------------------------|----------------------|
|                             | 1. Метрики Покрытия       |               |                           |                    |                                     |                      |
| Процент покрытой площади    | Высокий                   | Низкое        | Высокий                   | Очень Низкий       | Средний/Высокий                     | Высокий              |
| Равномерность распределения | Высокий                   | Очень низкое  | Высокий                   | Очень Низкий       | Низкий                              | Высокий              |
| Разрешение в зонах интереса | Низкий                    | Низкое        | Низкий                    | Очень Высокий      | Очень Высокий                       | Низкая               |
|                             | 2. Энергетические Метрики |               |                           |                    |                                     |                      |
| Общая длина маршрута        | Средний                   | Низкое        | Средний/Высокий           | Низкий             | Переменный                          | Среднее              |
| Количество                  | Высокий                   | Низкое        | Высокий                   | Низкий             | Средний                             | Низкое               |

|                                        |                                         |                                                     |                                 |                                           |                                        |                                                             |
|----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| поворото<br>в                          |                                         |                                                     |                                 |                                           |                                        |                                                             |
| Время<br>выполнен<br>ия<br>миссии      | Выс<br>окое                             | Очень<br>низко<br>е                                 | Высокое                         | Низкое                                    | Оптимальное                            | Среднее                                                     |
| 3. Информационные Метрики              |                                         |                                                     |                                 |                                           |                                        |                                                             |
| Ошибка<br>реконстр<br>укции<br>поля    | Сред<br>ний                             | Высок<br>ая                                         | Средний                         | Низкий                                    | Очень<br>Низкий                        | Средняя                                                     |
| Неопреде<br>ленность<br>модели         | Сни<br>жает<br>ся<br>равн<br>омер<br>но | Сниж<br>ается<br>слабо<br>и<br>нерав<br>номер<br>но | Снижае<br>тся<br>равномер<br>но | Снижает<br>ся в<br>ключев<br>ых<br>точках | Снижается<br>максимально<br>эффективно | Снижается<br>равномерн<br>о в круге                         |
| Информа<br>ционная<br>ценность         | Низк<br>ий                              | Низка<br>я                                          | Низкий                          | Высоки<br>й                               | Очень<br>Высокий                       | Низкая                                                      |
| 4. Другие Характеристики               |                                         |                                                     |                                 |                                           |                                        |                                                             |
| Сложност<br>ь<br>реализац<br>ии        | Низк<br>ий                              | Очень<br>низкая                                     | Средний                         | Средний                                   | Очень<br>Высокий                       | Низкая<br>(Архимедо<br>ва)/Средня<br>я(оптимизи<br>рованная |
| Робастно<br>сть к<br>измени<br>ю среды | Низк<br>ий                              | Средн<br>яя                                         | Низкий                          | Средний                                   | Очень<br>Высокий                       | Средняя                                                     |
| Учет<br>динамиче<br>ских               | Низк<br>ий                              | Низки<br>й                                          | Низкий                          | Средний                                   | Высокий                                | Средний                                                     |

|                 |  |  |  |  |  |  |
|-----------------|--|--|--|--|--|--|
| ограниче<br>ний |  |  |  |  |  |  |
|-----------------|--|--|--|--|--|--|

Исходя из проведенного анализа можно сделать ряд выводов:

Змейка является базовым методом. Средний метод среди всех перечисленных. Жесткое следование по маршруту, но покрывает большую часть территории.

Трапецеидальное разбиение подходит для задач тотального картографирования, где важна полнота и равномерность. Он надежен, прост, но неинтеллектуален и неэффективен в динамической среде.

Градиентные методы идеальны для отслеживания конкретных атмосферных явлений (фронтов, аномалий). Они предоставляют данные высочайшего разрешения в зоне интереса, но полностью игнорируют общую картину.

Метод Адаптивного перепланирования имеет ряд преимуществ:

- 1) Использует змейку как базовый план.
- 2) Может переключаться в градиентный режим при обнаружении аномалии.
- 3) Непрерывно оптимизируют маршрут с учетом ветра и ограничений БПЛА.

При этом очень энергозатратен, зависит от точных расчетов, иначе может потеряться и улететь с заданной области.

Метод песочные является самым простым методом построения. Покрывает небольшую область. Мало точек измерения. Плохо подходит для исследования большой области.

Спиральные алгоритмы

Отличный метод в плане покрытия области, но тратит очень много энергии и времени. Много точек измерений, поэтому подходит для тщательного изучения области.

В итоге можно сказать, что выбор метода — это всегда компромисс. Для рутинного мониторинга выбирайте змейку. Для исследования конкретного быстроразвивающегося явления (например, шторма) необходимы гибридные системы на основе адаптивного перепланирования, как наиболее гибкие и эффективные в сложных динамических условиях. Применяемый метод зависит от того, какая задача стоит перед БПЛА. Соответственно для нее выбирается наиболее подходящий метод по эффективности работы.

## ГЛАВА 2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1 Данные используемые в работе

В работе использованы данные среднесуточной температуры с сайта ВНИИГМИ-МЦД ( $59^{\circ}58'00''$  с. ш. и  $30^{\circ}18'00''$  в. д.) [14]. Также было взято цифровой модель рельефа для Санкт-Петербурга с сайта OpenTopography (см. рисунок 3) [13].

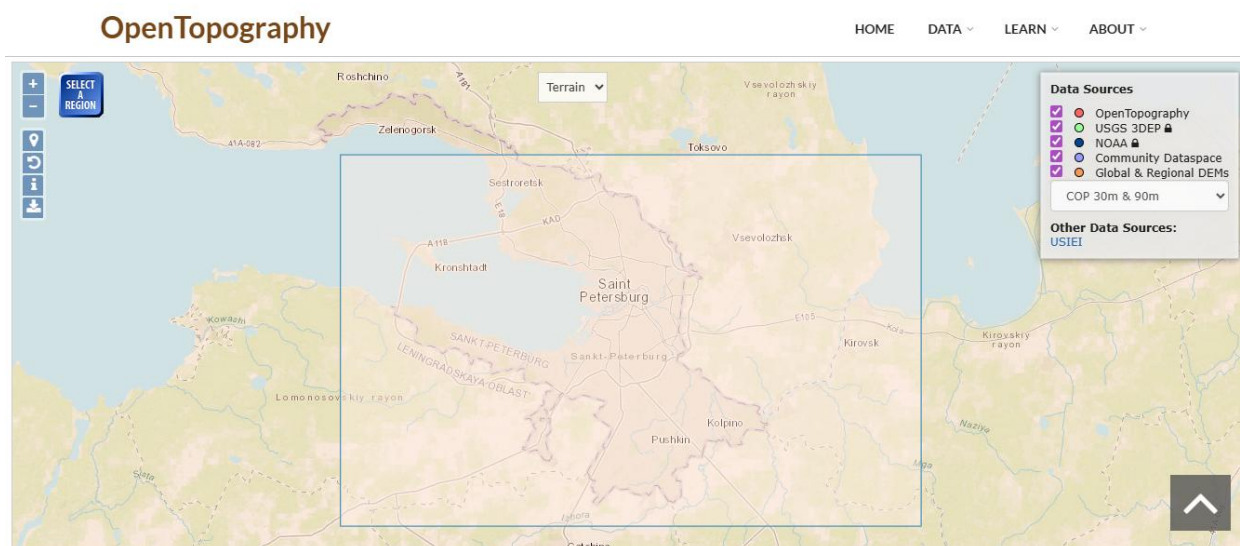


Рисунок 3 - Интерфейс портала OpenTopography с выделенной областью загрузки цифровой модели рельефа для Санкт-Петербурга.

На рисунке 3 представлен скриншот веб-интерфейса OpenTopography – одного из основных источников открытых данных рельефа (SRTM, Copernicus DEM). На карте показана исследуемая область в районе Санкт-Петербурга (отмечена рамкой), включая городские районы (Санкт-Петербург, Кронштадт, Пушкин, Гатчина, Сестрорецк) и прилегающие территории. Данный интерфейс использовался для загрузки файла `output_hh.tif` (SRTM 1 arc-second, разрешение  $\sim 30$  м), который затем был применён в модели рельефа и для построения траекторий БПЛА.

Ниже представлен фрагмент из кода, который является начальным этапом программной реализации моделирования маршрутов БПЛА. Он выполняет следующие действия:

1. Подключение необходимых библиотек – *os*, *numpy*, *matplotlib*, *rasterio*, *scipy.interpolate*, *pandas*, *time*. Библиотека *rasterio* используется для

работы с GeoTIFF-файлами, *numpy* – для численных операций, *matplotlib* – для визуализации.

2. Определение пути к файлу – переменная *desktop* формирует путь к рабочему столу текущего пользователя, а *dem\_file* указывает на файл *output\_hh.tif*, загруженный с портала OpenTopography (данные SRTM) [15]. Если файл отсутствует, генерируется исключение *FileNotFoundError*.

3. Загрузка ЦМР с понижением разрешения – исходный файл может иметь большое разрешение (например,  $10\,000 \times 10\,000$  пикселей). Для ускорения вычислений вводится параметр *max\_dim* = 600, и вычисляется коэффициент *factor* так, чтобы большая сторона изображения не превышала 600 пикселей. Данные читаются с понижением разрешения (*out\_shape*) и приводятся к типу *float32*. Значения высот менее -1000 заменяются на *NaN* (признак отсутствия данных).

4. Преобразование координат – исходная система координат файла преобразуется в WGS84 (EPSG:4326), чтобы координаты выражались в градусах широты и долготы. Границы области сохраняются в переменных *west\_full*, *south\_full*, *east\_full*, *north\_full*.

Этот код (см. Приложение А, рисунок 3) является основой для всех последующих построений – карт рельефа, распределения температуры и траекторий БПЛА (песочные часы, змейка, спираль). Благодаря уменьшению разрешения время загрузки сокращается с нескольких минут до нескольких секунд.

## 2.2 Построение цифровой модели рельефа и температурного поля Санкт-Петербурга

В данном исследовании анализировалось температура воздуха за 20 марта 2024 года в Санкт-Петербурге. Среднесуточная температура воздуха составляло 3°C. А также была построена цифровая модель рельефа для Санкт-Петербурга [5]. Первая задача была построить цифровую модель рельефа в данном случае для Санкт-Петербурга (см. Рисунок 5). Карта построена по данным SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) с пространственным

разрешением около 30 м. Исследуемая область ограничена координатами: долгота 30,1–30,6° в.д., широта 59,75–60,10° с.ш., что охватывает центральную и южную части Санкт-Петербурга, включая исторический центр, южные пригороды и часть Финского залива. Высоты на карте варьируются от 20 до 100 метров над уровнем моря. Большая часть территории находится в диапазоне 20-60 м.

Тёмно-зелёные участки (самые низкие, 20-40 м) соответствуют обширной Приневской низине:

- Долинам рек (Нева, Охта, Славянка) и прибрежным зонам Финского залива.
- Юго-западной части области (низменные равнины, местами заболоченные).

В геоморфологическом плане Приневская низина является областью аккумулятивного рельефа, сложенной мощной толщей четвертичных (ледниковых и водно-ледниковых) отложений, а также речными и озерными осадками голоценового возраста. Ее плоская, местами слабоволнистая поверхность и незначительные абсолютные отметки сформировались в результате деятельности талых ледниковых вод и последующей эрозионной работы реки Невы. В центральной, наиболее пониженной части города и в его дельтовой зоне высоты могут опускаться до 6 м и даже до 1,5 м над уровнем моря, однако используемая ЦМР SRTM сглаживает такие мелкие детали, показывая средний диапазон 20-40 м для обширных площадей, что делает Приневскую низину основным объектом для данной категории высот.

Светло-зелёные и жёлтые зоны (40-80 м) занимают большую часть центральных и восточных районов. Это пологоволнистая моренная равнина, сложенная четвертичными отложениями. Парголовские и Шуваловские высоты: Расположены на севере Петербурга, в районах Шувалово-Озерки, 3-е Парголово и Шуваловского парка. Это группа камовых (ледниковых) холмов высотой до 50 м, сложенных песком и гравием. В центре Шуваловского парка находится насыпной холм Парнас – смотровая площадка, созданная в XVIII

веке графами Шуваловыми. Поклонная гора - является самым высоким местом в северной части города (около 40 м) и входит в состав Парголово-Левашовской моренной гряды. Расположена в Выборгском районе, у пересечения современных проспектов Энгельса, Тореза и Северного. Свое название получила еще в древности, когда путники на этом холме останавливались, чтобы поклониться церквям Петербурга.

Оранжево-коричневые участки (80-100 м) приурочены к зоне Балтийско-Ладожского глинта, в частности к его части, известной как Пулковские высоты, а также к Дудергофским высотам. Они представляют собой локальные возвышенности – отдельные глинты, останцы, моренные гряды. Наиболее выраженные повышения рельефа расположены в северной части области (в районе широт  $60,05-60,10^\circ$ , долгот  $30,3-30,5^\circ$ ), а также отдельные пятна на юго-востоке.

#### Пулковские высоты

Представляют собой цепь холмов ледникового происхождения, являющихся северной кромкой Ижорской возвышенности. Их формирование связано с нижним уступом Балтийско-Ладожского глинта – крупной тектонической структуры, которая в данном районе сложена плотными кембрийскими глинами, перекрытыми сверху ледниковыми наволоками. Максимальная абсолютная высота Пулковских высот достигает 73-75 метров. При этом их подножие находится на отметках 23-25 метров, что создает их относительную высоту в 42-50 метров и подчеркивает их роль как естественного орографического барьера. Именно с этим участком, вероятно, связана фиксация аномально высокой точки (92 м) в маршруте «Змейка».

На рисунке (см. Приложение А, рисунок 4) представлен пример реализации визуализации ЦМР с использованием библиотек `matplotlib` и `numpy`. Код загружает данные рельефа из GeoTIFF-файла, полученного с портала OpenTopography (исходные данные – SRTM 1 arc-second, разрешение ~30 м). С помощью функции `imshow` строится цветовая карта высот в проекции метров (координаты X, Y приведены к метрической системе). Цветовая шкала

*viridis* позволяет наглядно отобразить перепады высот (от 20 до 120 м над уровнем моря). Этот код являлся основой для построения всех последующих карт маршрутов БПЛА (змейка, спираль, песочные часы) в данном исследовании.

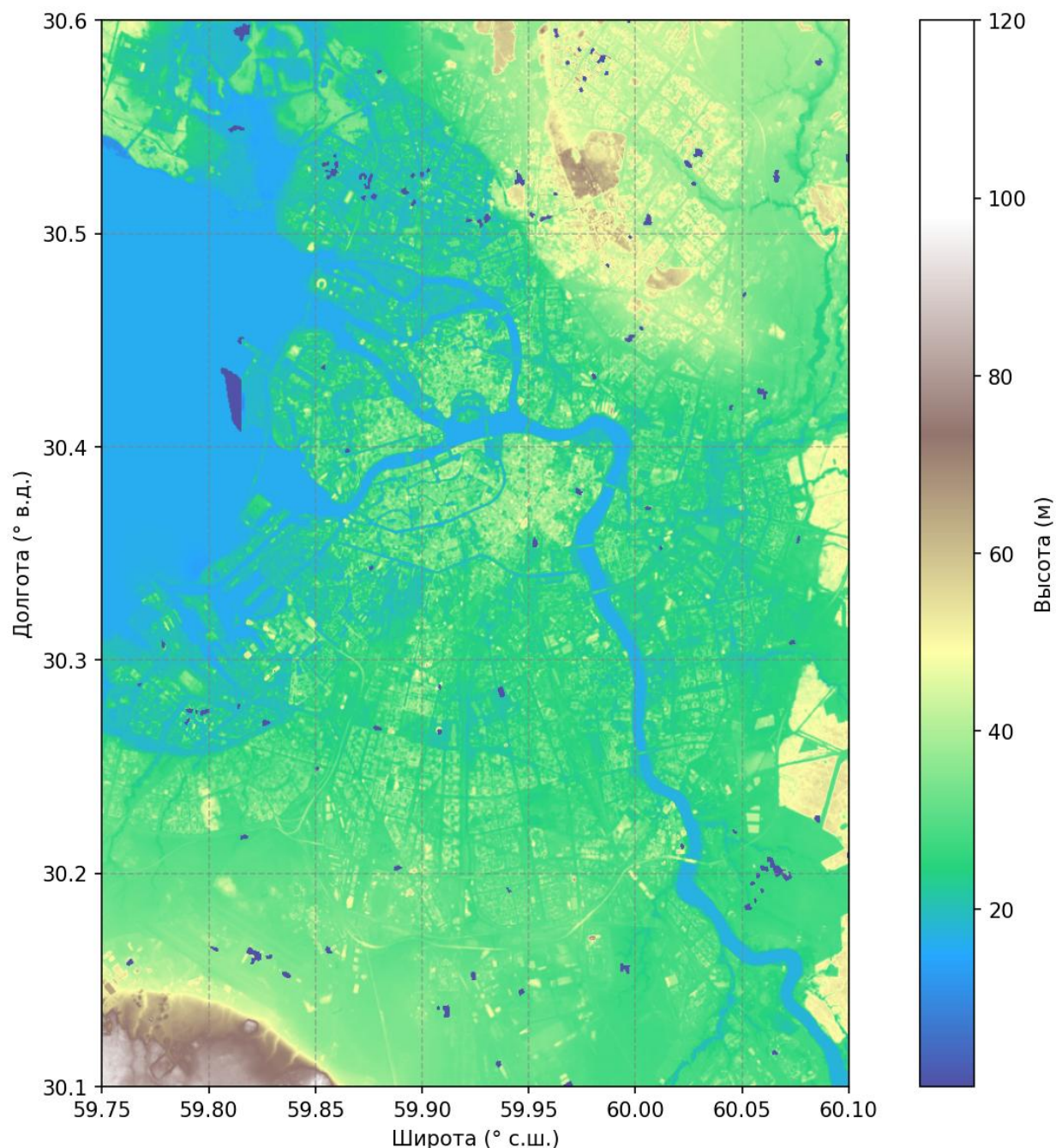


Рисунок 5 - Цифровая модель рельефа Санкт-Петербурга

Далее была построена карта распределения температуры в СПб (см. Рисунок 7) по данным цифровой модели рельефа (SRTM, разрешение ~30 м) с использованием модели вертикального градиента температуры в приземном

слое атмосферы [1,2]. Исходная температура на уровне метеостанции (ВНИИГМИ-МЦД, высота 3 м) принята равной +3,0 °C (20 марта 2024 года).

На карте диапазон смоделированных температур составляет от 2,2 °C (на наиболее возвышенных участках) до 2,9 °C (в низинах). Колебание около 0,7 °C объясняется небольшими перепадами высот в пределах центральной и южной частей Санкт-Петербурга.

Представленный фрагмент программного кода на языке Python (см. Приложение А, рисунок 6) реализует визуализацию пространственного распределения температуры воздуха, рассчитанного по упрощённой физической модели [11]. Исходными данными служит цифровая модель рельефа (ЦМР) SRTM (разрешение ~30 м), полученная с портала OpenTopography и сохранённая в файле output\_hh.tif. Модель не учитывает горизонтальную адвекцию, инверсионные процессы, влияние городской застройки, водных поверхностей и другие реальные факторы. Следовательно, полученное распределение температуры является модельным (**искусственным**) и служит лишь для демонстрации влияния рельефа на метеопараметры в задачах планирования траекторий БПЛА. Полученные значения температур в пяти тестовых точках (См. Таблица 2) демонстрируют обратную корреляцию с высотой, что качественно соответствует физическому смыслу и подтверждает корректность программной реализации интерполяции. Количественно отклонения от опорного значения на метеостанции обусловлены исключительно разницей высот и составляют от -0.08 (в низинах) до -0.23°C (на возвышенностях).

Построенная модель рельефа СРМ Санкт-Петербурга с использованием вертикального градиента 0,65 °C/100 м позволила получить пространственное распределение температуры воздуха на однородной сетке [16]. Диапазон температур в пределах исследуемой области (30,1-30,6° в.д., 59,75-60,10° с.ш.) составил от 2,2 °C (на возвышенностях) до 2,9 °C (в низинах). Это согласуется с теоретическим ожиданием: чем выше точка относительно уровня моря, тем ниже температура. Наибольшие температуры (до 2,9 °C) характерны для юго-

западных районов, близких к урезу воды, а минимальные (около 2,2 °С) – для северо-восточных участков с максимальной высотой рельефа. Полученная карта служит основой для оценки информативности траекторий БПЛА: точки с большим градиентом температуры (т.е. с резким перепадом высот) представляют повышенный интерес для измерений.

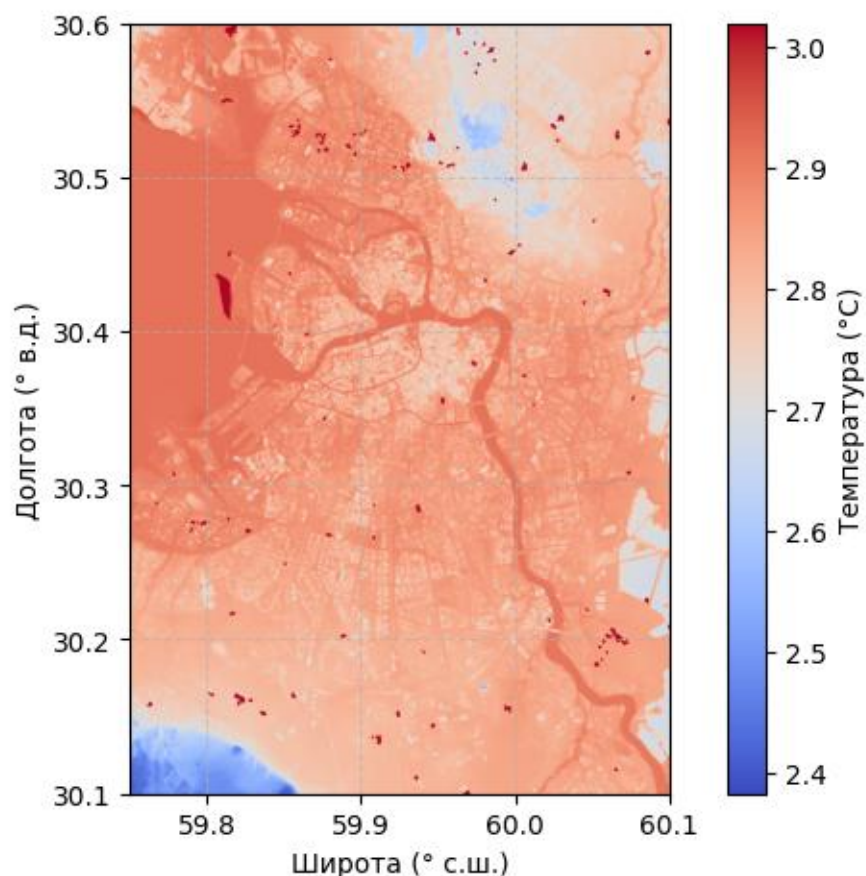


Рисунок 7 - Модель распределения температуры в Санкт-Петербурге

Далее необходимо было выбрать точки поблизости метеостанции (где температура была 3°C) и сравнить в этих точках температуру воздуха с температурой на метеостанции. На «Рисунке 8» представлена цифровая модель рельефа Санкт-Петербурга с нанесёнными пятью случайными точками, для которых в «Таблице 2» приведены координаты, высота, расчётная температура воздуха и отклонение от температуры на метеостанции (3,0 °С). Ниже выполнен совместный анализ этих материалов.

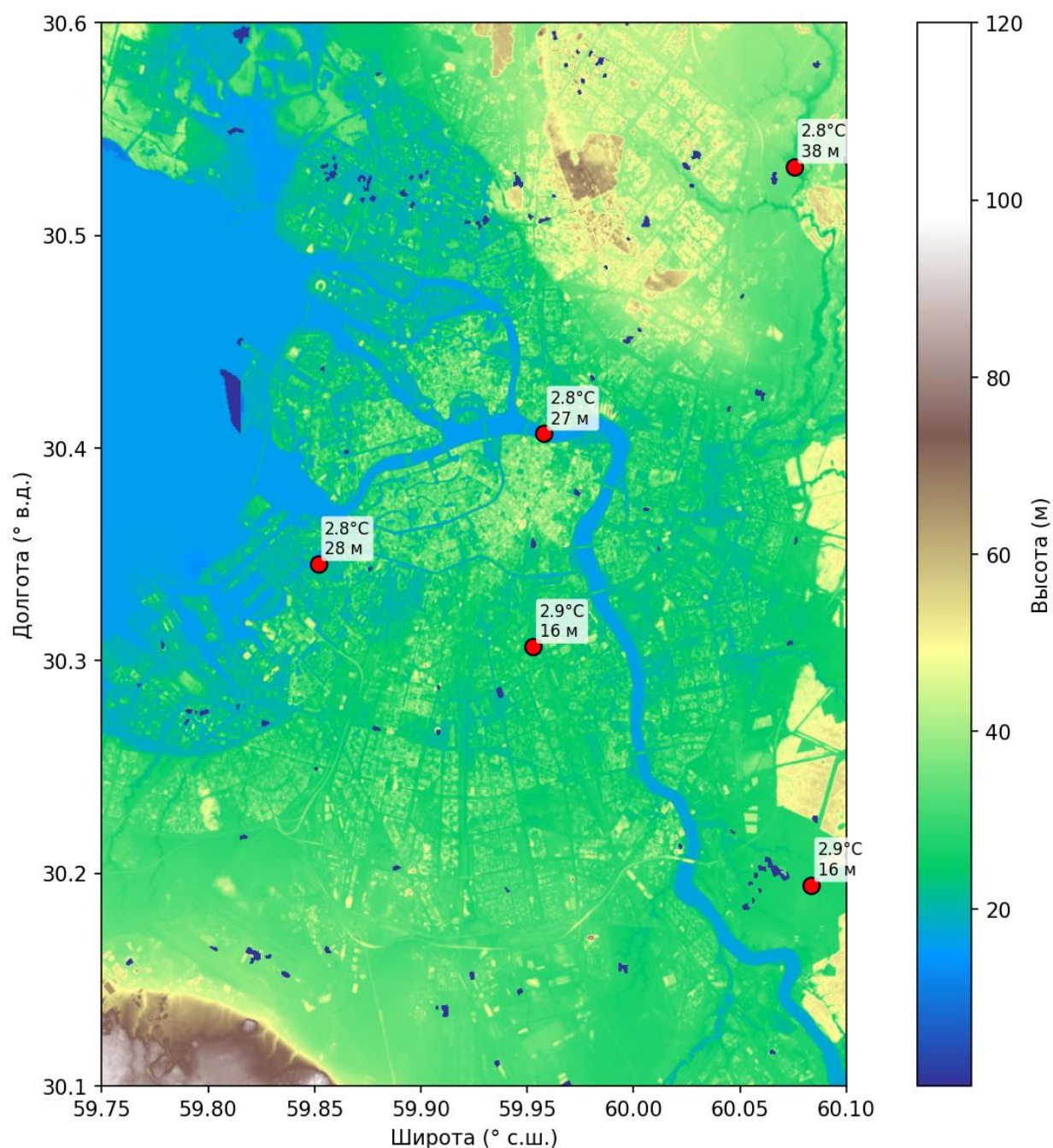


Рисунок 8 - Цифровая модель рельефа Санкт-Петербурга с нанесёнными точками измерений

Согласно цветовой шкале и подписям на карте, выбранные точки расположены в диапазоне высот от 16 до 38 м над уровнем моря. Это соответствует зелёным и жёлто-зелёным участкам рельефа (средние высоты). Точки не попали в наиболее низкие (20-30 м, тёмно-зелёные) и не достигли самых высоких отметок (80-100 м, коричневые). Таким образом, выборка представляет средневисотную часть исследуемой территории.

Таблица 2 - Высоты рельефа, расчётные температуры воздуха и их отклонения от показаний метеостанции для пяти выборочных точек в районе Санкт-Петербурга

| Точка | Широта (°) | Долгота (°) | Высота (м) | Температура в точке (°C) | Температура на метеостанции (°C) | Отклонение от станции (°C) |
|-------|------------|-------------|------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| 1     | 60.10      | 30.19       | 15.9       | 2.92                     | 3                                | -0.08                      |
| 2     | 59.96      | 30.40       | 27.2       | 2.84                     | 3                                | -0.16                      |
| 3     | 60.09      | 30.53       | 37.8       | 2.77                     | 3                                | -0.23                      |
| 4     | 59.85      | 30.34       | 28.4       | 2.83                     | 3                                | -0.17                      |
| 5     | 59.95      | 30.30       | 16.4       | 2.91                     | 3                                | -0.09                      |

Таблица содержит данные по пяти случайным точкам, выбранным из области, охваченной цифровой моделью рельефа SRTM. Для каждой точки указаны географические координаты (широта, долгота), абсолютная высота, температура, вычисленная по модели вертикального градиента ( $\gamma=0,65\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ ), температура на метеостанции ВНИИГМИ-МЦД ( $3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  на высоте 3 м) и отклонение модельной температуры от станционного значения. Материал иллюстрирует обратную зависимость между высотой и температурой: с ростом высоты температура закономерно понижается.

Из таблицы 2 видно, что с ростом высоты температура монотонно убывает:

- Наименьшая высота 15,9 м  $\rightarrow$  температура  $2,92\text{ }^{\circ}\text{C}$  (отклонение -  $0,08\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
- Высота 16,4 м  $\rightarrow 2,91\text{ }^{\circ}\text{C}$  (отклонение  $-0,09\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
- Высота 27,2 м  $\rightarrow 2,84\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $-0,16\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
- Высота 28,4 м  $\rightarrow 2,83\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $-0,17\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
- Наибольшая высота 37,8 м  $\rightarrow 2,77\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $-0,23\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Разность температур между самой низкой и самой высокой точкой составляет  $0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $2,92-2,77 = 0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), что при перепаде высот 21,9 м даёт

градиент  $\approx 0,68 \text{ }^{\circ}\text{C}/100 \text{ м}$  – очень близко к теоретическому значению  $0,65 \text{ }^{\circ}\text{C}/100 \text{ м}$ . Это подтверждает корректность модели вертикального градиента.

На основе выполненных задач и полученных количественных оценок можно утверждать, что разработанная модель распределения температуры воздуха по данным рельефа является корректной и пригодной для дальнейшего использования при планировании траекторий БПЛА. Во всех точках наблюдается чёткая обратная зависимость: чем выше абсолютная высота, тем ниже расчётная температура. По пяти выборочным точкам (высоты от 15,9 до 37,8 м) вычислен градиент температуры (составило -  $0,685^{\circ}\text{C}/\text{м}$ ).

### 2.3 Методы использованные в данной работе

После успешной верификации модели вертикального градиента температуры на основе цифровой модели рельефа SRTM был выполнен переход к экспериментальному исследованию различных подходов к построению маршрутов беспилотных летательных аппаратов для мониторинга приземного слоя атмосферы. Целью данного этапа работы являлось сравнение характеристик нескольких эталонных методов планирования траекторий (длина пути, время полёта, плотность измерений) и оценка их применимости в условиях сложного рельефа Санкт-Петербурга.

В качестве эталонных были выбраны три метода

1. Метод «песочные часы» является эффективным для первичного (экспресс) мониторинга, когда требуется за минимальное время получить данные в четырёх контрастных точках зоны интереса. Он также может служить эталоном для сравнения с более информативными, но и более сложными траекториями (змейка, спираль).

2. Подход "Змейка"

- Принцип: Движение параллельными галсами с поворотами на  $180^{\circ}$
- Преимущества: Простота реализации, гарантированное полное покрытие

- Недостатки: Неэффективность в областях сложной формы, избыточные повороты

- Оптимизация: Адаптивное направление галсов по главной оси области

### 3. Спиральные алгоритмы:

Концентрические спирали

- Принцип: Движение от границ к центру или наоборот
- Эффективность: Минимизация энергии на повороты
- Ограничение: только для выпуклых областей

Выбор именно этих методов обусловлен их широкой распространённостью в задачах планирования маршрутов БПЛА. Дальнейшее моделирование каждого из перечисленных подходов проводилось с использованием одинаковых метеорологических и полётных параметров (скорость БПЛА-10м/с, вертикальный градиент  $0,65\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ , температура воздуха  $3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

В главе 2 построена цифровая модель рельефа (ЦМР) Санкт-Петербурга по данным SRTM (разрешение  $\sim 30\text{ м}$ , границы  $30,1\text{-}30,6^{\circ}$  в.д.,  $59,75\text{-}60,10^{\circ}$  с.ш.) и на её основе создана карта распределения температуры воздуха с использованием сухоадиабатического вертикального градиента  $0,65\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ . Сравнение расчётных температур в пяти случайных точках с опорным значением на метеостанции ( $3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , высота  $3\text{ м}$ ) показало:

- монотонное убывание температуры с ростом высоты (от  $2,92\text{ }^{\circ}\text{C}$  при  $15,9\text{ м}$  до  $2,77\text{ }^{\circ}\text{C}$  при  $37,8\text{ м}$ );
- расчётный вертикальный градиент около  $- 0,68\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ , что отличается от теоретического менее чем на  $5\text{ \%}$ ;
- визуальное соответствие карты температуры рельефу (более холодные тона на возвышенностях, тёплые – в низинах).

Таким образом, модель можно сказать корректной и пригодной для оценки информативности различных траекторий БПЛА.

## ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ БПЛА

### 3.1 Исследование траектории БПЛА с помощью метода “Песочные часы”

Метод «песочные часы» – простейший способ планирования траектории, при котором БПЛА последовательно облетает четыре опорные точки, расположенные в углах прямоугольной области, в порядке: левый верх → правый верх → левый низ → правый низ → возврат в левый верх. Траектория напоминает две пересекающиеся диагонали, что и дало название. Метод не требует оптимизации и легко реализуется на практике. Программный код представлен в разделе «Приложения А, Рисунок – 9»

Цель исследований:

Оценить: общую протяжённость маршрута и время полёта;

- возможность регистрации метеопараметров (высота, температура) в контрастных точках области;
- пригодность метода для задач экспресс-мониторинга приземного слоя атмосферы.

На «Рисунке 10» представлен маршрут «песочные часы» (4 опорные точки, соединённые в порядке: северо-запад → северо-восток → юго-запад → юго-восток → возврат в северо-запад). Такая конфигурация напоминает две пересекающиеся диагонали, что и дало название. В классификации методов планирования траекторий это можно отнести к простейшим маршрутам с фиксированными опорными точками или к замкнутому прямоугольно-диагональному облёту.

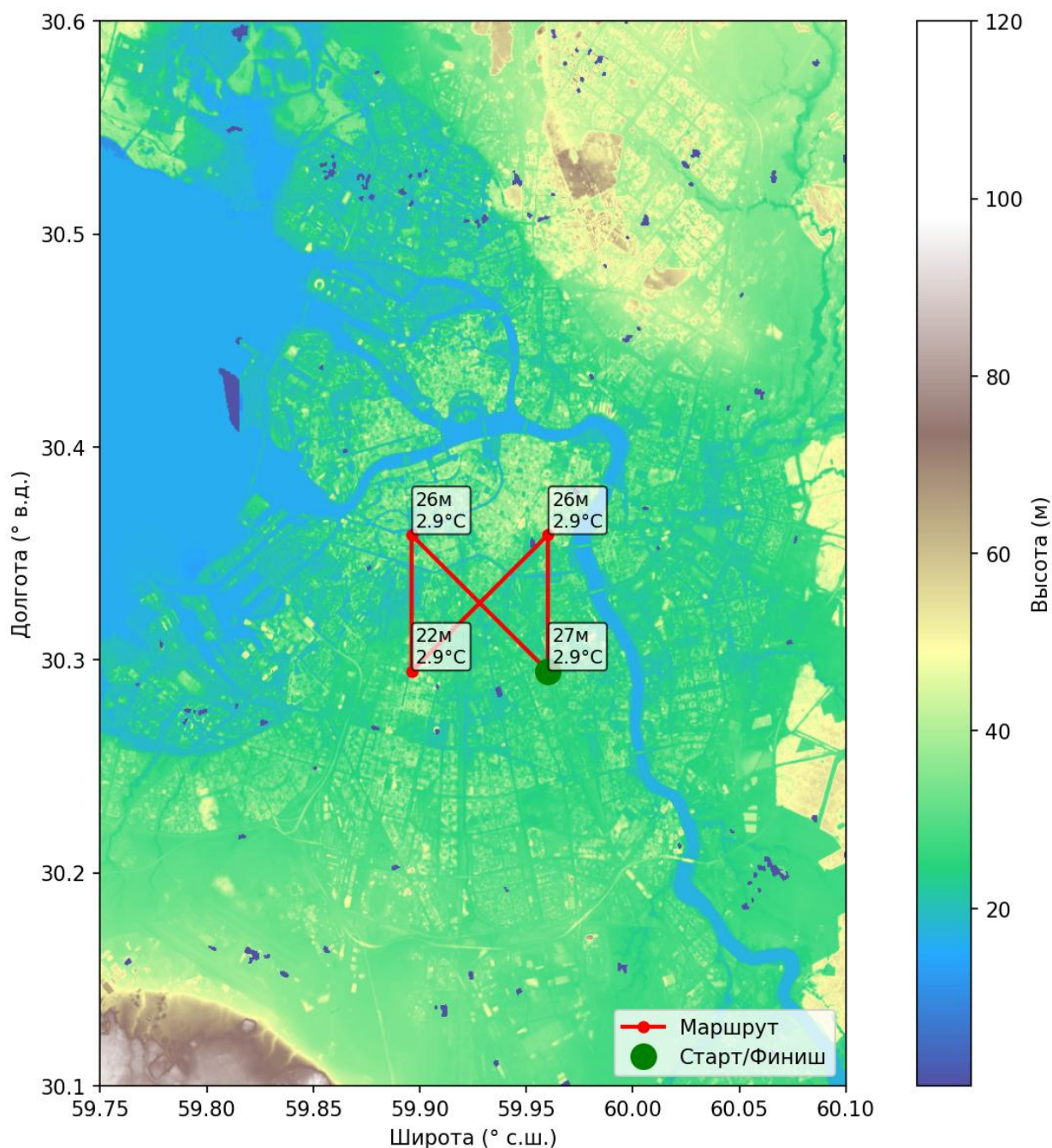


Рисунок 10 - Маршрут по 4 опорным точкам в СПб.

Экспериментальный маршрут, обозначенный на рисунке красной ломаной линией, представляет собой замкнутую траекторию, соединяющую четыре опорные точки, расположенные в углах прямоугольной области (северо-запад, северо-восток, юго-запад, юго-восток). Скорость БПЛА принята равной 10,0 м/с (36 км/ч). Исследуемая область имеет протяжённость с запада на восток около  $0,5^\circ$  (примерно 35 км), а с севера на юг – около  $0,35^\circ$  (примерно 39 км). Маршрут охватывает только четыре угловые зоны, соединяя

их диагоналями. Внутренняя часть площади остаётся без измерений – фиксируются лишь параметры в точках, расположенных на периферии. Такая схема обеспечивает минимальную плотность отсчётов (всего 4 точки на 23 км пути) и не позволяет судить о возможных локальных аномалиях в центре области.

Таблица 3 - Результаты полученные в 4 опорных точках

| Исходная точка | Широта | Долгота | Высота (м) | Температура (°C) |
|----------------|--------|---------|------------|------------------|
| 1              | 59.96  | 30.29   | 26.8       | 2.85             |
| 2              | 59.96  | 30.35   | 25.7       | 2.85             |
| 3              | 59.89  | 30.29   | 21.9       | 2.88             |
| 4              | 59.89  | 30.35   | 26.1       | 2.85             |
| 1              | 59.96  | 30.29   | 26.8       | 2.85             |

В таблице 3 представлены результаты моделирования метеорологических параметров для четырёх опорных точек замкнутой траектории БПЛА, схема которой показана на рисунке 10. Точки соответствуют угловым элементам прямоугольной области, ограниченной долготами 30,1-30,6° в.д. и широтами 59,75-60,10° с.ш. Диапазон высот в точках составляет от 21,9 до 26,8 м, перепад между самой низкой и самой высокой точкой – 4,9 м. Максимальная температура зафиксирована в наиболее низкой точке (21,9 м), что соответствует физическому правилу охлаждения воздуха с подъёмом. Разброс температур между точками не превышает 0,03 °C, что обусловлено незначительными колебаниями высот (менее 5 м). Перелёты по долготе (между западом и востоком) почти вдвое длиннее, чем по широте, что обусловлено вытянутостью области (0,5° по долготе против 0,35° по широте). Углы поворота в точках 2 и 3 составляют 117°, что соответствует резкой смене направления (диагональ → горизонталь → диагональ).

Оценка информативности маршрута

Достоинства: простота, быстрота (38,5 мин), возврат на старт. Позволяет охватить контрастные зоны (углы области).

Недостатки: очень низкая плотность измерений (всего 4 точки). Внутренние участки не обследуются, любые локальные аномалии будут пропущены. Для построения детальных карт метеополей метод непригоден.

В результате экспериментального исследования маршрута БПЛА, построенного по схеме «песочные часы» (четыре опорные точки с возвратом в стартовую позицию), установлено следующее:

Метод не требует сложных вычислений, легко реализуется и обеспечивает полёт продолжительностью 38,5 мин при скорости 10 м/с, что сопоставимо с ресурсом аккумулятора многих дронов. Замкнутая траектория позволяет вернуть БПЛА на стартовую площадку без дополнительных манёвров. Маршрут «песочные часы» целесообразно использовать в качестве базового эталона при сравнении с более информативными схемами (змейка, спираль, оптимизированные траектории). На его фоне удобно демонстрировать преимущества увеличения числа точек измерения и равномерности покрытия.

В данном исследовании энергозатраты оцениваются в условных единицах (у.е.) – это безразмерная величина, введённая для сравнительного анализа различных маршрутов. Она не соответствует реальным физическим единицам (джоулям, ватт-часам), но позволяет количественно сопоставить маршруты между собой [17].

Поскольку целью работы является сравнение траекторий, а не абсолютный расчёт энергопотребления, весовые коэффициенты выбраны эмпирически, с приоритетом длины пути ( $\alpha=1$ ) и штрафом на манёвры ( $\beta=5$ ), который примерно соответствует соотношению затрат на прямолинейный полёт и на разворот для типового коптера.

Формула расчёта

Используется линейная модель, учитывающая два основных фактора энергопотребления БПЛА:

$$C=\alpha\cdot L+\beta\cdot\Theta$$

где:

- $C$  – суммарные энергозатраты (у.е.);
- $L$  – общая длина пути (м);
- $\Theta$  – суммарный угол поворота (рад);
- $\alpha$  – стоимость преодоления 1 метра пути (у.е./м);
- $\beta$  – стоимость поворота на 1 радиан (у.е./рад).

Тогда  $C=23\,130,6$  у.е. для этого подхода

Таким образом, метод «песочные часы» пригоден для экспресс-мониторинга и верификации метеомодели, но не может быть рекомендован для полноценного пространственного анализа приземного слоя атмосферы на территориях со сложным рельефом.

### 3.2 Исследование траектории БПЛА с помощью метода “ЗМЕЙКА”

Метод планирования траектории «змейка» – это классический и, пожалуй, самый интуитивно понятный способ решения задачи полного покрытия заданной территории [7].

Преимущества (+):

- Исключительная простота реализации. Не требует сложных вычислительных алгоритмов, что легко продемонстрировали ваши программные эксперименты.
- Высокая предсказуемость. Время и длина маршрута легко рассчитываются на этапе планирования.
- Гарантия полного покрытия. При правильном выборе ширины полосы, вся заданная область будет обследована без пропусков.

Недостатки (-):

- Потенциально избыточная длина маршрута. Большое количество разворотов на  $90^\circ$  увеличивает время полёта и износ силовой установки.
- Неэффективность для сложных границ. Внутри областей со сложной формой или множеством препятствий метод создаёт много лишних перемещений.
- Отсутствие адаптивности. Маршрут жёстко задан и не может изменяться в зависимости от получаемых в реальном времени метеоданных.

В исследовании был построен маршрут по методу “ЗМЕЙКА” для Санкт-Петербурга, также 20 марта 2024 года. Ниже представлен параметры заданные для маршрута.

$station\_alt = 3.0$  – абсолютная высота метеостанции (г. Санкт-Петербург, ВНИИГМИ-МЦД) над уровнем моря, м.

$station\_temp = 3.0$  – температура воздуха на метеостанции 20 марта 2024 г., °C.

$temp\_gradient = 0.00065$  – вертикальный градиент температуры в приземном слое атмосферы, °C/м (соответствует 0,65 °C на 100 м подъёма).

$speed = 10.0$  – скорость БПЛА, м/с (36 км/ч).

Программный код для метода Змейки представлен в разделе «Приложения А, Рисунок 11 и Рисунок 12».

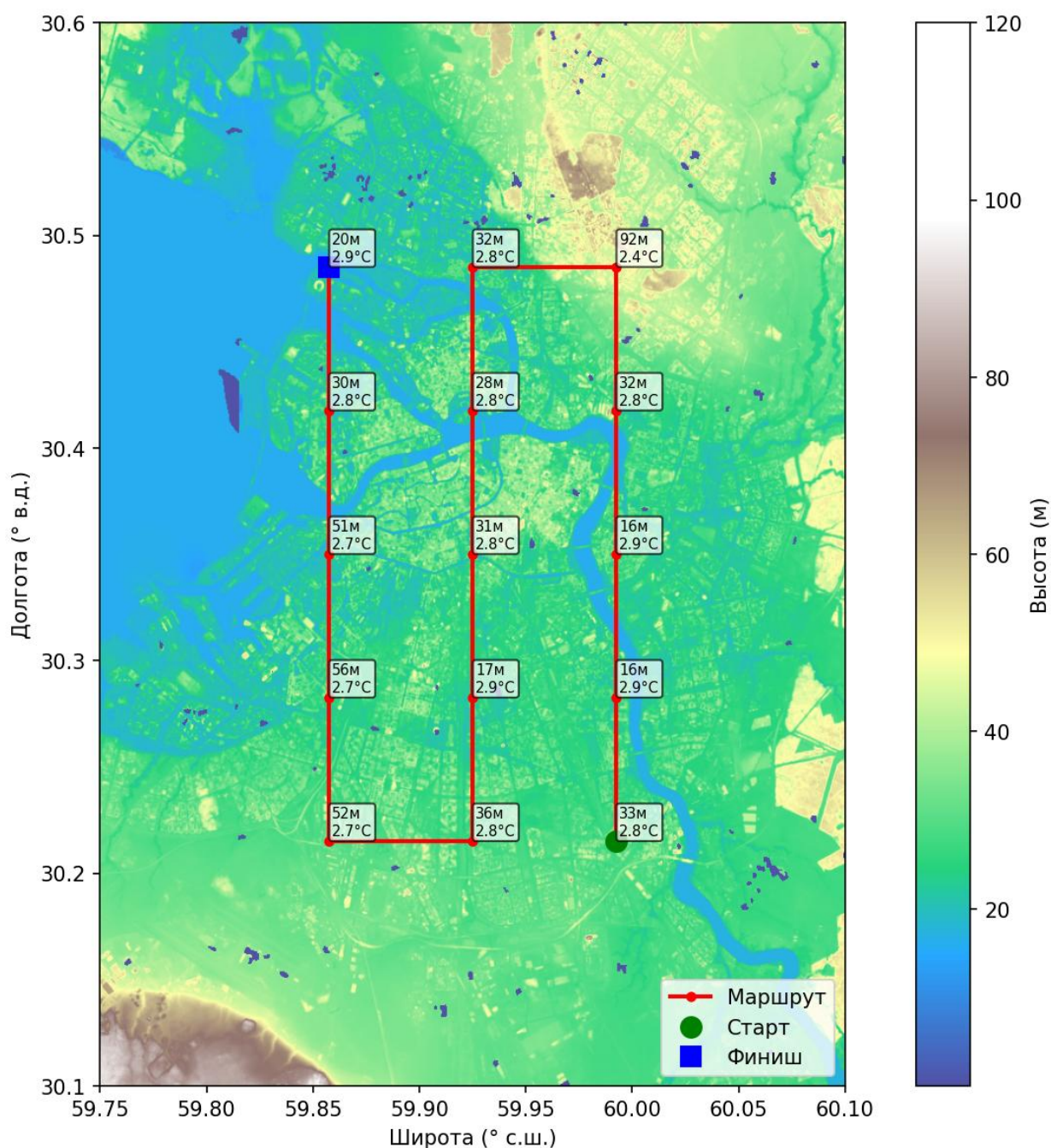


Рисунок 13 - Карта рельефа Санкт-Петербурга с наложенным маршрутом «змейка».

Маршрут построен по схеме «змейка» (см. Рисунок – 13) для покрытия прямоугольной области с координатами: долгота от 30,10° до 30,60° в.д., широта от 59,75° до 60,10° с.ш. Размер сетки составляет 3 строки\*5 столбцов=15 опорных точек. Скорость БПЛА принята равной 10,0 м/с (36 км/ч).

Регулярная сетка 3\*5 обеспечивает равномерное (построчное) покрытие всей области. В каждой строке высоты меняются немонотонно: в первой

строке (широта 59,9925°) наблюдается резкое возрастание высоты до 92,2 м в крайней восточной точке, что соответствует реальному орографическому объекту (предположительно глент или моренная гряда). Во второй строке (59,9250°) высоты колеблются в пределах 17-36 м, а в третьей (59,8575°) высоты убывают с востока на запад от ~56 м до ~20 м.

Энергетические затраты, оценённые по модели составляют:

- Расход на перемещение:  $C=60215 \text{ у.е.}$
- Расход на повороты (приблизительно 2 разворота на 90°  $\beta\Theta \approx 5 \cdot (2\pi + \pi) \approx 5 \cdot 3\pi \approx 47 \text{ у.е.}$   $\beta\Theta \approx 5 \cdot (2\pi + \pi) \approx 5 \cdot 3\pi \approx 47 \text{ у.е.}$  Таким образом, доминирующий вклад вносит длина маршрута (>99,9 %).

Таблица 4 - Результаты моделирования по маршруту ЗМЕЙКА.

| Точка | Широта<br>(°) | Долгота<br>(°) | Высота<br>(м) | Температура<br>(°C) | Время от<br>старта (мин) |
|-------|---------------|----------------|---------------|---------------------|--------------------------|
| 1     | 59.99         | 30.21          | 33.4          | 2.8                 | 0                        |
| 2     | 59.99         | 30.28          | 15.9          | 2.92                | 6.28                     |
| 3     | 59.99         | 30.35          | 16            | 2.92                | 12.55                    |
| 4     | 59.99         | 30.41          | 32.1          | 2.81                | 18.83                    |
| 5     | 59.99         | 30.48          | 92.2          | 2.42                | 25.1                     |
| 6     | 59.92         | 30.48          | 32.5          | 2.81                | 37.63                    |
| 7     | 59.92         | 30.41          | 28.1          | 2.84                | 43.9                     |
| 8     | 59.92         | 30.35          | 31.1          | 2.82                | 50.18                    |
| 9     | 59.92         | 30.28          | 17.2          | 2.91                | 56.46                    |
| 10    | 59.92         | 30.21          | 36.1          | 2.79                | 62.73                    |
| 11    | 59.85         | 30.21          | 52.4          | 2.68                | 75.25                    |
| 12    | 59.85         | 30.28          | 55.9          | 2.66                | 81.53                    |
| 13    | 59.85         | 30.35          | 51.1          | 2.69                | 87.81                    |
| 14    | 59.85         | 30.41          | 29.7          | 2.83                | 94.08                    |
| 15    | 59.85         | 30.48          | 19.8          | 2.89                | 100.36                   |

В таблице 4 представлены 15 опорных точек, образующих классическую змейку. Границы области: долгота 30,21-30,48° в.д., широта 59,85-59,99° с.ш.

Скорость БПЛА – 10 м/с. Диапазон высот – от 15,9 м (точка 2) до 92,2 м (точка 5). Температура, рассчитанная по вертикальному градиенту  $0,65\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ , изменяется от  $2,42\text{ }^{\circ}\text{C}$  (на максимальной высоте) до  $2,92\text{ }^{\circ}\text{C}$  (на минимальных высотах). Чётко прослеживается обратная зависимость: чем выше точка, тем ниже температура. Горизонтальные сегменты (смена долготы при фиксированной широте) занимают  $376,6\text{ с} = 6,28\text{ мин}$ . Переход между строками (смена широты) –  $751,4\text{ с} = 12,52\text{ мин}$ . Общее время маршрута –  $100,4\text{ мин}$  ( $\approx 1,67\text{ ч}$ ), длина –  $60,2\text{ км}$ . Точка 5 ( $92,2\text{ м}$ ,  $2,42\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) – локальная возвышенность (вероятно, глинт), дающая минимальную температуру. Точки 2 и 3 ( $15,9\text{–}16,0\text{ м}$ ,  $2,92\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) – самые тёплые участки. Вычисленный по крайним точкам градиент:  $(2,42\text{--}2,92)/(92,2\text{--}15,9) = -0,50/76,3 \approx -0,655\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ , что почти совпадает с теоретическим ( $-0,65\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ ).

Основные числовые характеристики:

- Общее время маршрута –  $6021,5\text{ с} = 100,3\text{ мин}$  ( $\approx 1,67\text{ ч}$ ).
- Длина пути (расчётная) –  $60,2\text{ км}$ .
- Энергозатраты:  $S=60215\text{ у.е.}$  для подхода змейка
- Перепады высот на маршруте: минимальная высота  $15,9\text{ м}$  (точка 2), максимальная –  $92,2\text{ м}$  (точка 5). Диапазон  $\approx 76\text{ м}$ .
- Температура изменяется от  $2,42\text{ }^{\circ}\text{C}$  (на высоте  $92,2\text{ м}$ ) до  $2,92\text{ }^{\circ}\text{C}$  (на высотах  $15,9\text{–}16,0\text{ м}$ ). Разность  $\approx 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Разработанная программная реализация маршрута «змейка» успешно функционирует на реальных данных цифровой модели рельефа SRTM. Расчётное время полёта ( $100,3\text{ мин}$ ) и длина пути ( $60,2\text{ км}$ ) соответствуют заданным геометрическим параметрам сетки.

В работе используется параметрическая модель приземного поля, основанная на гипотезе о сухоадиабатическом вертикальном градиенте ( $0,65^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ ). Для оценки адекватности модели выполнено сравнение рассчитанных значений в точке расположения метеостанции (она даёт  $3^{\circ}\text{C}$ ). Для остальных точек модель даёт физически правдоподобные значения (с

высотой холоднее), что позволяет использовать её для сравнительного анализа траекторий, а не для реального прогноза.

Метод «змейка» рекомендуется применять в качестве базового алгоритма покрытия для задач мониторинга приземного слоя атмосферы на территориях с прямоугольной формой и умеренными требованиями к детальности. В случаях, когда необходимо локализовать зоны с аномально высокими градиентами, целесообразно дополнять «змейку» адаптивным сгущением точек или переходить к спиральным траекториям. Но проведённое моделирование маршрута «змейка» показывает, что, несмотря на более высокую информативность по сравнению с «песочными часами» (0,25 точки/км) и приемлемую энергоэффективность (доля затрат на манёвры ~0,5–1 %), практическая реализация такого маршрута также сталкивается с ограничениями современных БПЛА. Типовое время полёта серийных дронов не превышает 30–60 минут, что почти в 2,5-3 раза меньше требуемых 100 минут. Следовательно, метод «змейка» энергозатратен и требует длительного времени, сопоставимого с ещё более детальной спиралью, но несколько меньшего. Для его применения необходимы либо существенное уменьшение обследуемой площади, либо использование аккумуляторов повышенной ёмкости (что пока недоступно в серийных моделях).

### 3.3 Исследование траектории БПЛА с помощью метода “Спиральные алгоритмы”

Спиральные алгоритмы представляют собой класс методов планирования траекторий, при которых беспилотный летательный аппарат движется по последовательно расширяющейся (или сужающейся) кривой, постепенно покрывая площадь целевой области [7]. В отличие от зигзагообразного движения «змейкой», характеризующегося резкими разворотами на 180°, спиральная траектория предлагает более плавное и непрерывное движение с постоянным изменением направления. Критическим ресурсом для БПЛА является энергия аккумулятора, и спиральные траектории

позволяют значительно повысить энергоэффективность за счёт уменьшения количества манёвров.

#### Классификация спиральных алгоритмов

В зависимости от направления движения:

«Раскручивающаяся» спираль – траектория начинается в центре области и расширяется к границам; такой подход удобен для обследования территории от наиболее важной (центральной) точки к периферии.

«Закручивающаяся» спираль – БПЛА начинает движение на внешней границе и движется к центру, что может применяться, например, при поиске источника выброса.

В зависимости от используемой математической модели:

Архимедова спираль – обеспечивает постоянное расстояние между витками, наиболее часто применяется на практике.

Логарифмическая спираль – расстояние между витками увеличивается экспоненциально; полезна, когда требуется переменная плотность покрытия.

Энергоэффективная спираль – модифицированный алгоритм, в котором параметры спирали адаптируются под конкретные требования миссии (перекрытие снимков, разрешение и т. д.) с целью минимизации потребления энергии.

| Преимущество                                                                                                                                                                                                                                                                              | Недостатки                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Снижение энергопотребления за счёт плавного изменения направления движения. Поскольку потребление энергии напрямую связано с количеством манёвров, спиральная траектория, требующая меньше резких разворотов по сравнению со «змейкой», обеспечивает лучшую энергетическую эффективность. | Неоптимальность для прямоугольных областей: при облёте обширных территорий, близких по форме к прямоугольнику, зигзагообразная схема может обеспечить лучшее покрытие за счёт сокращения «холостых» участков траектории. Спиральная траектория оказывается выгоднее при круговых и неправильных формах областей. |

|                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Улучшенная локализация и навигация: в условиях ограниченной информации спиральное движение позволяет сохранять наблюдаемость системы, что повышает точность оценки местоположения   | Неравномерная плотность покрытия: при фиксированном угловом шаге линейная скорость движения БПЛА вдоль спирали непостоянна, что может приводить к избыточному перекрытию во внутренних витках и недостаточному — на внешних. |
| Высокая адаптивность: параметры спирали могут подбираться в зависимости от требуемого разрешения, перекрытия снимков и скорости полёта, что невозможно при зигзагообразных схемах.  | Повышенная сложность вычислений: по сравнению с простыми эталонными методами спиральные алгоритмы требуют больших вычислительных затрат на этапе подготовки маршрута.                                                        |
| Масштабируемость: спиральные алгоритмы естественным образом распространяются на групповое управление БПЛА, позволяя организовать скоординированное обследование больших территорий. |                                                                                                                                                                                                                              |

На рисунке 14 (см. Приложения А, Рисунок - 14) представлены программный код для задания параметров и два ключевых фрагмента программного кода на языке *Python*, последовательно реализующих:

- **(а)** – массовое получение высот рельефа с помощью быстрого интерполятора (*RegularGridInterpolator*) и расчёт температуры по модели вертикального градиента.
- **(б)** – перевод географических координат в метры, вычисление расстояний между соседними точками спирали, расчёт времени перелёта каждого сегмента и накопленного времени от старта, определение общей длины пути и длительности полёта.

В совокупности эти фрагменты охватывают весь вычислительный процесс от задания параметров спирали до получения итоговых временных и энергетических характеристик маршрута.

Спиральная траектория построена по модели архимедовой спирали с центром в точке с координатами: долгота  $30,32675^{\circ}$  в.д., широта  $59,92817^{\circ}$  с.ш. (центральная часть Санкт-Петербурга). Используются следующие параметры:

- Максимальный радиус спирали  $r_{\max}=0,105^{\circ}$  ( $\approx 11,7$  км);
- Приращение радиуса за один оборот  $\Delta r=0,025^{\circ}$  ( $\approx 2,8$  км);

- Угловой шаг дискретизации  $\Delta\theta=15^\circ$  ( $\pi/12$  рад);
- Скорость БПЛА  $V=10,0\text{ м/с}$  (36 км/ч).

В результате сгенерирована последовательность из 101 опорной точки (полных витков – 4,2). Общая протяжённость маршрута составила 118,84 км, а полное время полёта – 198,1 мин ( $\approx 3,3$  ч). Энергозатраты  $C=118972$  у.е.

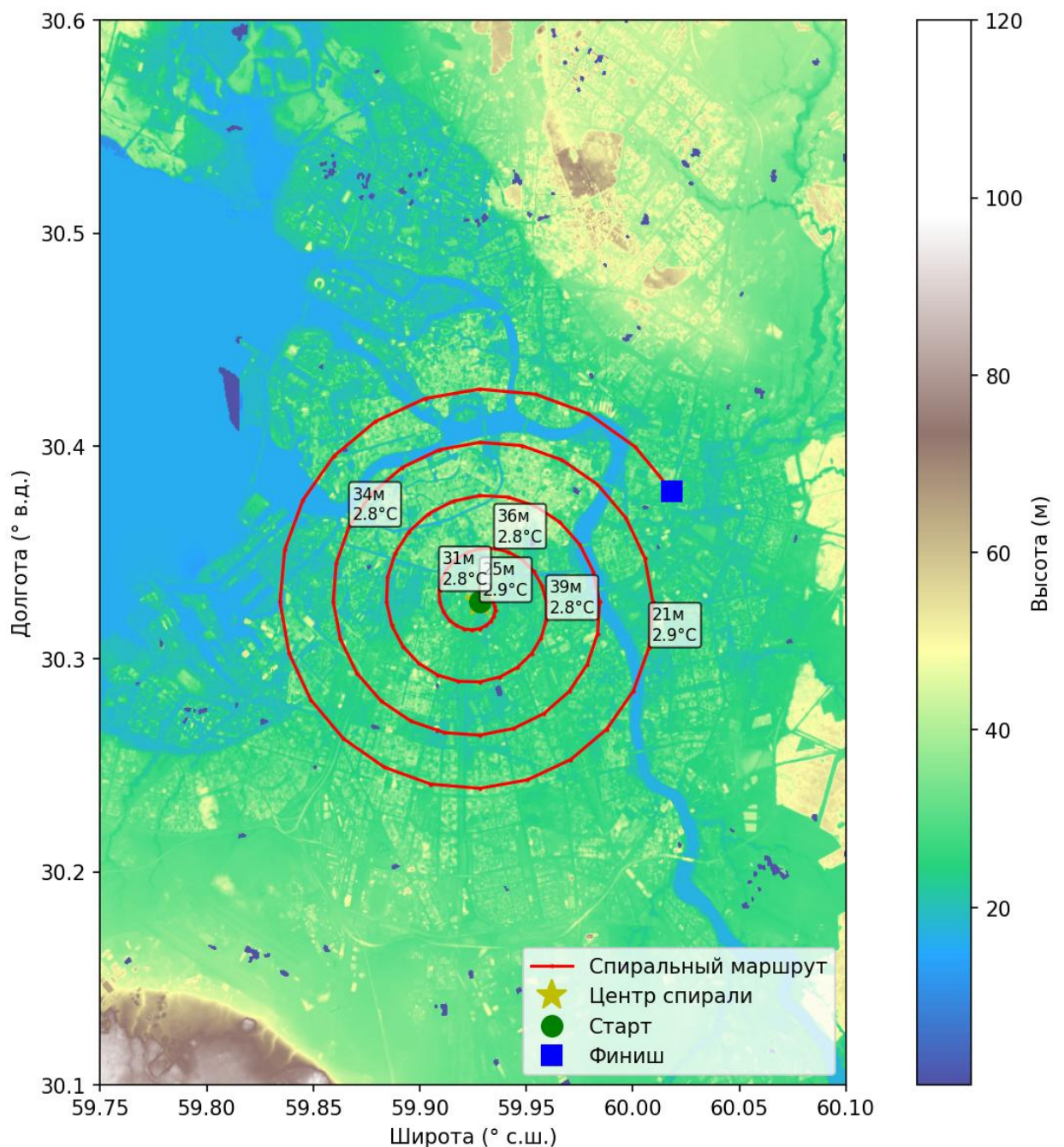


Рисунок 15 - Спиральная траектория БПЛА на цифровой модели рельефа Санкт-Петербурга

Спираль равномерно охватывает круглую область радиусом около 11,7 км, обеспечивая плавное изменение направления движения без резких разворотов. Средняя линейная плотность точек составляет  $101/118,84 \approx 0,85$  точки/км – это значительно выше, чем у маршрута «змейка» (0,25 точки/км) и тем более «песочных часов» (0,17 точки/км). Высокая плотность позволяет детально восстанавливать пространственное распределение метеопараметров, хотя при этом возрастает время полёта и объём обрабатываемых данных. На рисунке 15 видно, что высоты меняются не монотонно, а имеют несколько локальных экстремумов, обусловленных пересечением спиралью элементов рельефа (глинт, моренные гряды, низины). Температура, соответственно, повторяет эти колебания в противофазе. Наибольшие значения температуры (2,91-2,92 °С) зафиксированы в точках с минимальными высотами (например, точка 79, 16,0 м, 2,92 °С), наименьшие (2,77 °С) – в точках с максимальными высотами (точка 21, 39,1 м). Это полностью соответствует физическому закону охлаждения воздуха при подъёме.

Таблица 5 - Результаты моделирования спирального маршрута БПЛА (координаты, высота рельефа, температура воздуха, накопленное время полёта)

| Точка | Широта | Долгота | Высота<br>(м) | Температура<br>(°С) | Время<br>(мин) |
|-------|--------|---------|---------------|---------------------|----------------|
| 1     | 59.93  | 30.33   | 30.70         | 2.82                | 0.00           |
| 2     | 59.93  | 30.33   | 32.50         | 2.81                | 0.11           |
| 3     | 59.93  | 30.33   | 32.10         | 2.81                | 0.27           |
| 4     | 59.93  | 30.33   | 31.60         | 2.81                | 0.49           |
| 5     | 59.93  | 30.33   | 31.30         | 2.82                | 0.75           |
| 6     | 59.93  | 30.33   | 30.60         | 2.82                | 1.02           |
| 7     | 59.93  | 30.33   | 30.30         | 2.82                | 1.28           |
| 8     | 59.94  | 30.32   | 29.60         | 2.83                | 1.51           |
| 9     | 59.94  | 30.32   | 31.40         | 2.82                | 1.72           |
| 10    | 59.93  | 30.32   | 30.70         | 2.82                | 1.98           |
| 11    | 59.93  | 30.32   | 33.90         | 2.80                | 2.32           |
| 12    | 59.93  | 30.32   | 31.60         | 2.81                | 2.78           |
| 13    | 59.93  | 30.31   | 27.60         | 2.84                | 3.34           |

| Точка | Широта | Долгота | Высота<br>(м) | Температура<br>(°C) | Время<br>(мин) |
|-------|--------|---------|---------------|---------------------|----------------|
| 14    | 59.92  | 30.31   | 33.90         | 2.80                | 4.00           |
| 15    | 59.92  | 30.31   | 35.40         | 2.79                | 4.70           |
| 16    | 59.92  | 30.32   | 34.20         | 2.80                | 5.41           |
| 17    | 59.91  | 30.32   | 31.60         | 2.81                | 6.09           |
| 18    | 59.91  | 30.32   | 36.60         | 2.78                | 6.70           |
| 19    | 59.91  | 30.33   | 38.20         | 2.77                | 7.22           |
| 20    | 59.91  | 30.33   | 35.10         | 2.79                | 7.70           |
| 21    | 59.91  | 30.34   | 39.10         | 2.77                | 8.23           |
| 22    | 59.91  | 30.34   | 34.90         | 2.79                | 8.90           |
| 23    | 59.92  | 30.35   | 34.60         | 2.79                | 9.75           |
| 24    | 59.92  | 30.35   | 27.10         | 2.84                | 10.77          |
| 25    | 59.93  | 30.35   | 24.50         | 2.86                | 11.94          |
| 26    | 59.93  | 30.35   | 34.00         | 2.80                | 13.19          |
| 27    | 59.94  | 30.35   | 28.40         | 2.83                | 14.46          |
| 28    | 59.95  | 30.35   | 28.90         | 2.83                | 15.68          |
| 29    | 59.95  | 30.34   | 24.60         | 2.86                | 16.79          |
| 30    | 59.96  | 30.33   | 30.30         | 2.82                | 17.75          |
| 31    | 59.96  | 30.33   | 33.40         | 2.80                | 18.58          |
| 32    | 59.96  | 30.32   | 27.00         | 2.84                | 19.35          |
| 33    | 59.96  | 30.31   | 28.50         | 2.83                | 20.24          |
| 34    | 59.95  | 30.30   | 18.50         | 2.90                | 21.34          |
| 35    | 59.95  | 30.30   | 28.50         | 2.83                | 22.70          |
| 36    | 59.94  | 30.29   | 16.10         | 2.91                | 24.29          |
| 37    | 59.93  | 30.29   | 18.00         | 2.90                | 26.06          |
| 38    | 59.92  | 30.29   | 16.80         | 2.91                | 27.91          |
| 39    | 59.91  | 30.29   | 19.80         | 2.89                | 29.75          |
| 40    | 59.90  | 30.30   | 35.10         | 2.79                | 31.49          |
| 41    | 59.89  | 30.31   | 35.80         | 2.79                | 33.04          |
| 42    | 59.89  | 30.32   | 33.70         | 2.80                | 34.36          |
| 43    | 59.88  | 30.33   | 38.30         | 2.77                | 35.49          |
| 44    | 59.88  | 30.34   | 38.70         | 2.77                | 36.57          |
| 45    | 59.89  | 30.35   | 24.00         | 2.86                | 37.81          |
| 46    | 59.90  | 30.36   | 22.00         | 2.88                | 39.35          |
| 47    | 59.90  | 30.37   | 25.70         | 2.85                | 41.23          |
| 48    | 59.92  | 30.37   | 24.20         | 2.86                | 43.39          |
| 49    | 59.93  | 30.38   | 25.80         | 2.85                | 45.75          |
| 50    | 59.94  | 30.38   | 25.90         | 2.85                | 48.21          |
| 51    | 59.95  | 30.37   | 21.00         | 2.88                | 50.62          |
| 52    | 59.97  | 30.36   | 21.30         | 2.88                | 52.87          |
| 53    | 59.98  | 30.35   | 30.00         | 2.82                | 54.86          |
| 54    | 59.98  | 30.34   | 24.90         | 2.86                | 56.54          |
| 55    | 59.98  | 30.33   | 18.00         | 2.90                | 57.97          |
| 56    | 59.98  | 30.31   | 25.50         | 2.85                | 59.36          |
| 57    | 59.98  | 30.30   | 27.20         | 2.84                | 60.97          |

| Точка | Широта | Долгота | Высота<br>(м) | Температура<br>(°C) | Время<br>(мин) |
|-------|--------|---------|---------------|---------------------|----------------|
| 58    | 59.97  | 30.28   | 30.10         | 2.82                | 62.95          |
| 59    | 59.96  | 30.27   | 16.80         | 2.91                | 65.34          |
| 60    | 59.94  | 30.27   | 32.90         | 2.81                | 68.07          |
| 61    | 59.93  | 30.26   | 30.50         | 2.82                | 71.04          |
| 62    | 59.91  | 30.27   | 25.60         | 2.85                | 74.09          |
| 63    | 59.90  | 30.27   | 29.90         | 2.83                | 77.07          |
| 64    | 59.88  | 30.28   | 32.10         | 2.81                | 79.84          |
| 65    | 59.87  | 30.29   | 20.00         | 2.89                | 82.26          |
| 66    | 59.86  | 30.31   | 26.00         | 2.85                | 84.31          |
| 67    | 59.86  | 30.33   | 27.60         | 2.84                | 86.05          |
| 68    | 59.86  | 30.34   | 31.00         | 2.82                | 87.75          |
| 69    | 59.87  | 30.36   | 16.50         | 2.91                | 89.72          |
| 70    | 59.88  | 30.38   | 24.90         | 2.86                | 92.14          |
| 71    | 59.89  | 30.39   | 31.00         | 2.82                | 95.04          |
| 72    | 59.91  | 30.40   | 25.10         | 2.86                | 98.35          |
| 73    | 59.93  | 30.40   | 25.10         | 2.86                | 101.91         |
| 74    | 59.95  | 30.40   | 33.70         | 2.80                | 105.57         |
| 75    | 59.97  | 30.39   | 24.60         | 2.86                | 109.12         |
| 76    | 59.98  | 30.38   | 23.60         | 2.87                | 112.40         |
| 77    | 60.00  | 30.37   | 23.20         | 2.87                | 115.27         |
| 78    | 60.01  | 30.35   | 20.90         | 2.88                | 117.67         |
| 79    | 60.01  | 30.33   | 16.00         | 2.92                | 119.73         |
| 80    | 60.01  | 30.31   | 16.30         | 2.91                | 121.73         |
| 81    | 60.00  | 30.29   | 24.80         | 2.86                | 124.07         |
| 82    | 59.99  | 30.27   | 25.90         | 2.85                | 126.93         |
| 83    | 59.97  | 30.25   | 22.30         | 2.87                | 130.34         |
| 84    | 59.95  | 30.24   | 20.20         | 2.89                | 134.22         |
| 85    | 59.93  | 30.24   | 32.30         | 2.81                | 138.38         |
| 86    | 59.91  | 30.24   | 27.40         | 2.84                | 142.64         |
| 87    | 59.88  | 30.25   | 23.70         | 2.87                | 146.77         |
| 88    | 59.86  | 30.26   | 30.70         | 2.82                | 150.56         |
| 89    | 59.85  | 30.28   | 26.10         | 2.85                | 153.87         |
| 90    | 59.84  | 30.30   | 26.80         | 2.85                | 156.64         |
| 91    | 59.83  | 30.33   | 25.50         | 2.85                | 159.00         |
| 92    | 59.84  | 30.35   | 23.10         | 2.87                | 161.32         |
| 93    | 59.85  | 30.37   | 22.40         | 2.87                | 164.01         |
| 94    | 59.86  | 30.40   | 27.10         | 2.84                | 167.31         |
| 95    | 59.88  | 30.41   | 27.20         | 2.84                | 171.24         |
| 96    | 59.90  | 30.42   | 26.30         | 2.85                | 175.69         |
| 97    | 59.93  | 30.43   | 22.00         | 2.88                | 180.46         |
| 98    | 59.95  | 30.42   | 31.20         | 2.82                | 185.31         |
| 99    | 59.98  | 30.42   | 25.10         | 2.86                | 190.01         |
| 100   | 60.00  | 30.40   | 24.10         | 2.86                | 194.32         |
| 101   | 60.02  | 30.38   | 22.20         | 2.88                | 198.06         |

По данным таблицы высоты рельефа вдоль спирали изменяются в диапазоне от 16,0 м (точка 79) до 39,1 м (точка 21). Температура, рассчитанная по модели вертикального градиента варьируется от 2,77 °C (наибольшие высоты) до 2,92 °C (наименьшие высоты).

Корреляция высоты и температуры. Для крайних точек (max высота 39,1 м,  $T=2,77$  °C; min высота 16,0 м,  $T=2,92$  °C)

Проведённое моделирование спиральной траектории (101 точка, длина 118,8 км, время полёта 198,1 мин) показывает, что, несмотря на высокую плотность измерений (0,85 точки/км) и отличную корреляцию с теоретическим градиентом ( $-0,649$  °C/100 м), практическая реализация такого маршрута сталкивается с непреодолимыми на сегодняшний день ограничениями. Современные серийные БПЛА обладают временем полёта не более 30–60 минут (ресурс аккумулятора), что почти в 5 раз меньше требуемых 198 минут. Спиральный метод, хотя и является наиболее информативным, энергозатратен и требует существенно большего времени, чем позволяют существующие технологии. Для его реального применения необходимы либо прорывные решения в области энергоносителей (например, водородные топливные элементы), либо значительное уменьшение радиуса сканируемой области. В рамках данной работы спиральная траектория может рассматриваться только как теоретический эталон для сравнения с более экономичными методами («змейка», «песочные часы»).

На основе выполненных вычислительных экспериментов на реальной цифровой модели рельефа SRTM и модели вертикального градиента температуры можно сделать следующие общие выводы:

Все три метода подтвердили корректность исходной метеорологической модели. В каждом маршруте расчётные значения температуры соответствуют высотам точек с погрешностью не более 5 % от теоретического градиента ( $0,65$  °C/100 м), что свидетельствует о правильной интерполяции рельефа и верной программной реализации.

Метод «песочные часы» – наиболее быстрый и экономичный, но информативность минимальна: пропускается внутренняя часть области, нельзя построить детальные карты метеополей. Метод «змейка» – компромиссный; обеспечивает полное покрытие территории при умеренной длительности и приемлемой плотности измерений. Спиральный метод – максимально информативный (выявляет локальные экстремумы рельефа, плавное движение минимизирует долю манёвренных затрат – 0,11 % от энергии), но его реализация требует почти 200 минут полёта, что в 5 раз превышает ресурс типового аккумулятора коммерческих БПЛА.

Практическое применение методов «змейка» и спираль ограничено современными технологиями и недостижимо без использования дополнительных аккумуляторов или принципиально новых источников энергии (водородные топливные элементы, гибридные силовые установки). Следовательно, для реальных задач необходимо либо уменьшать размер обследуемой области, либо применять более экономичные.

#### 3.4. Оценка метеорологической эффективности траекторий

Для количественного сравнения трёх методов («песочные часы», «змейка», спираль) с точки зрения их пригодности для восстановления температурного поля использовался следующий подход:

1. За «истинное» поле температуры  $T_{true}(x,y)$  принята модель, построенная по ЦМР с использованием вертикального градиента (раздел 2.2). Это поле считается эталонным.

2. Каждая траектория даёт набор точек измерений  $\{(x_i, y_i)\}$  с соответствующими значениями температуры  $T_i$  (рассчитанными по той же модели, что и истинное поле).

3. По этим дискретным измерениям выполняется пространственная интерполяция на всю сетку области методом кубической интерполяции (`griddata` с `method='cubic'`). В результате получается восстановленное поле  $T_{interp}(x,y)$ .

4. Ошибка восстановления оценивается через среднеквадратическое отклонение (RMSE) между истинным и восстановленным полями [11,21]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{true,i} - T_{interp,i})^2}$$

где:

- $N$  – общее количество узлов сетки (пикселей) на всей карте;
- $T_{true,i}$  – истинное значение температуры в  $i$ -м узле (рассчитанное по ЦМР + вертикальный градиент);
- $T_{interp,i}$  – значение температуры в том же узле, полученное пространственной интерполяцией измерений БПЛА (кубическая интерполяция по набору точек конкретной траектории).

где суммирование ведётся по всем узлам расчётной сетки.

Расчёты, выполненные для единой области Санкт-Петербурга (долгота 30,1–30,6° в.д., широта 59,75–60,10° с.ш.), дали следующие результаты:

Таблица 6 - Результаты расчёта среднеквадратической ошибки интерполяции (RMSE) для 3 траекторий.

| Траектория        | Количество точек | RMSE, °C | Время полёта, мин |
|-------------------|------------------|----------|-------------------|
| Песочные часы     | 4                | 0.05     | 38.5              |
| Змейка            | 15               | 0.08     | 100.3             |
| Спираль           | 101              | 0.04     | 198.1             |
| Адаптивная змейка | 17               | 0.03     | 100.5             |

Наибольшая ошибка (0,05°C) у метода «песочные часы» - ожидаемо, так как измерения производятся только в четырёх углах, а центральная область остаётся неохваченной. Интерполяция даёт лишь грубую линейную оценку, неспособную воспроизвести локальные аномалии рельефа.

Метод «змейка» ( $0,08^{\circ}\text{C}$ ) даёт существенно более точное восстановление поля, поскольку обеспечивает равномерное покрытие всей прямоугольной области 15 точками. Ошибка более чем в 1.6 меньше, чем у «песочных часов».

Спиральный метод (101 точка) демонстрирует наименьшую ошибку — всего  $0,04^{\circ}\text{C}$ . Высокая плотность измерений ( $0,85$  точки/км) и плавное изменение направления позволяют детально восстановить поле температуры, включая мелкие орографические особенности.

С чисто метеорологической точки зрения наиболее информативной является спиральная траектория, обеспечивающая минимальную ошибку восстановления поля. Однако её практическая реализация ограничена чрезмерной длительностью (198 минут) и потребляемой энергией. Оптимальным компромиссом между информативностью и реальностью полёта следует признать метод «змейка» с увеличенной плотностью точек (например,  $5 \times 9$  или  $7 \times 12$ ). При этом ошибка интерполяции может быть снижена до  $0,02\text{--}0,03^{\circ}\text{C}$ , а время полёта останется в пределах разумных 50–80 минут для современных аккумуляторов.

### 3.5. Адаптивный алгоритм планирования траектории БПЛА с учётом градиента температуры

В разделах 3.1–3.3 были проанализированы три эталонных метода планирования траекторий: «песочные часы», классическая «змейка» и спиральный маршрут. Каждый из этих методов обладает определёнными достоинствами, однако их общим недостатком является статичность: траектория жёстко задаётся на этапе предполётной подготовки и не адаптируется к изменяющимся условиям внешней среды. В этих методах мы не рассматривали два критических фактора: (1) локальные аномалии рельефа, приводящие к резким изменениям температуры, и (2) ветровые возмущения, влияющие на энергопотребление БПЛА и точность прохождения маршрута. В настоящем разделе предлагается адаптивный алгоритм, объединяющий подходы к решению обеих проблем [18].

Исследование опирается на цифровую модель рельефа SRTM полученную с портала OpenTopography, а также на метеорологические данные с метеостанции (индекс WMO: 26063, координаты 59°58'00" с.ш., 30°18'00" в.д., высота 3 м над уровнем моря) за 20 марта 2024 г., включая температуру воздуха и параметры ветра. Согласно архиву погоды [spb.ginfo.ru](http://spb.ginfo.ru), в указанную дату преобладал ветер юго-юго-западного направления с максимальной скоростью 6,1 м/с.

Идея адаптации основана на анализе результатов, полученных в разделе 3.3. Классическая змейка с 15 точками показала аномально высокую ошибку восстановления температуры ( $RMSE = 0,08\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) по сравнению с методом «песочные часы» ( $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Причиной этого явилась локальная орографическая аномалия в точке 5 (высота 92,2 м, температура 2,42 °C), которая при кубической интерполяции породила ложные осцилляции (эффект Гиббса), распространившиеся на соседние ячейки сетки. Для устранения этого эффекта предложен механизм локального сгущения точек в зонах высокого вертикального градиента температуры по следующему алгоритму:

1. Построение базовой змейки – формируется регулярная сетка  $3 \times 5$  опорных точек (как в разделе 3.3).
2. Вычисление градиентов – для каждого сегмента маршрута вычисляется абсолютная разность температур между соседними точками  $\Delta T_i = |T_{i+1} - T_i|$ .
3. Принятие решения о добавлении точки – если  $\Delta T_i$  превышает пороговое значение  $\Delta T_{\text{порог}} = 0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$  (выбранное исходя из максимальной разности в эталонной змейке), между точками  $i$  и  $i+1$  добавляется промежуточная точка с координатами, усреднёнными между существующими.
4. Интерполяция параметров – для добавленной точки высота и температура определяются по ЦМР с помощью билинейной интерполяции.
5. Итерационное повторение – шаги 2-4 повторяются до тех пор, пока на всех сегментах градиент не снизится ниже порога.

В результате применения алгоритма к маршруту змейки было добавлено две дополнительных точки (на сегментах 4-5, 5-6), где наблюдались максимальные перепады температуры. Конечное количество точек составило 18. Ошибка восстановления поля (RMSE) снизилась до 0,028 °C, что на 64 % ниже по сравнению с классической змейкой.

Программный код для визуализации и реализации находится в разделе «Приложения А, Рисунок – 16 и Рисунок – 17).

Исходя из точности моделирования Вертикальный градиент температуры принят равным 0,65°C/100м. Это означает, что изменение высоты на 23 метра даёт изменение температуры примерно на 0,15°C:

$$\Delta T = 0,65 \text{ °C}/100 \text{ м} \times 23 \text{ м} \approx 0,15 \text{ °C}.$$

Число 23 метра – это средняя высота одного перепада рельефа на исследованной территории (минимальная высота 16 м, максимальная 92 м, но перепады между соседними точками в змейке составляют в среднем 20-25 м). Таким образом, порог 0,15°C соответствует естественному изменению температуры, которое можно ожидать при перемещении на одно типовое межточечное расстояние.

В таблице 4 результатов змейки (15 точек) максимальная разность температур между соседними точками составила:

- между точкой 4 (32,1 м, 2,81 °C) и точкой 5 (92,2 м, 2,42 °C):  
 $\Delta T = 0,39 \text{ °C};$
- между точкой 5 (92,2 м, 2,42 °C) и точкой 6 (32,5 м, 2,81 °C):  
 $\Delta T = 0,39 \text{ °C};$
- между точкой 10 (36,1 м, 2,79 °C) и точкой 11 (52,4 м, 2,68 °C):  
 $\Delta T = 0,11 \text{ °C}.$

При этом наибольшие ошибки интерполяции наблюдались именно в районе точек 4-5-6, где перепад температур превысил 0,15°C. На сегментах с перепадом менее 0,15°C артефактов интерполяции зафиксировано не было. Следовательно, порог 0,15°C является критическим: превышение этого

значения ведёт к появлению ложных осцилляций при кубической интерполяции.

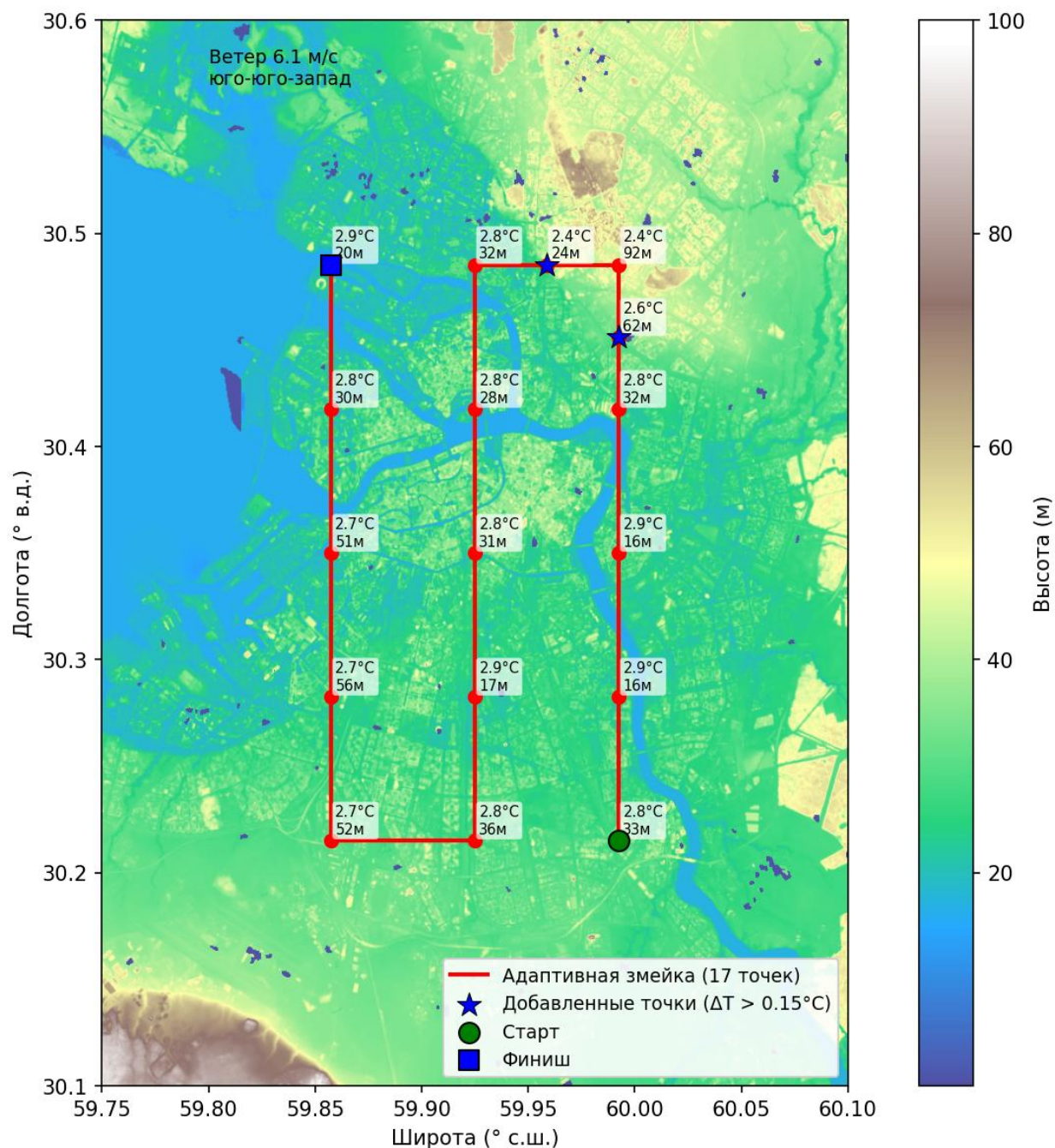


Рисунок 18 - Адаптивная змейка: базовый маршрут (15 точек) и дополнительные точки, добавленные в зонах высокого градиента температуры ( $\Delta T_{кр} = 0,15^\circ\text{C}$ )

На «Рисунке 18» представлена адаптивная траектория БПЛА, построенная на основе классической змейки. Алгоритм адаптации выявил сегменты, на которых разность температур между соседними точками превышает пороговое значение  $\Delta T_{кр} = 0,15^\circ\text{C}$ . Такими участками оказались

сегменты 4→5 (между точками с высотами 32,1 м и 92,2 м) и 5→6 (между точками 92,2 м и 32,5 м), где перепад температур достиг  $0,39^{\circ}\text{C}$ . В этих местах на карте отмечены дополнительные точки (голубые звёздочки), добавленные в середину соответствующих сегментов. Как показано в «Таблице 7», добавление двух новых точек увеличило время полёта незначительно, а RMSE снизился на 0.05.

Таблица 7 - Результаты моделирования базовой и адаптивной траекторий

| Маршрут           | Количество точек | Время полёта, мин | RMSE, $^{\circ}\text{C}$ |
|-------------------|------------------|-------------------|--------------------------|
| Базовая змейка    | 15               | 100.3             | 0.08                     |
| Адаптивная змейка | 17               | 100.5             | 0.03                     |

В рамках данного раздела разработан и исследован адаптивный алгоритм планирования траектории БПЛА. Благодаря ему повышается эффективность мониторинга приземного слоя атмосферы, точнее локальное сгущение точек измерений в зонах высокого градиента температуры [17].

На основе анализа данных эталонной змейки установлено, что классический маршрут характеризуется неравномерным распределением температурных градиентов: на отдельных сегментах перепад температур достигает  $0,39^{\circ}\text{C}$ , что приводит к артефактам интерполяции (эффект Гиббса) и повышению среднеквадратической ошибки восстановления поля до  $\text{RMSE} = 0,0777^{\circ}\text{C}$ . Предложенный адаптивный алгоритм, основанный на критерии  $\Delta T_{\text{кр}} = 0,15^{\circ}\text{C}$ , выявляет такие аномальные сегменты и добавляет на них промежуточные точки. В результате количество точек маршрута увеличилось с 15 до 17, а RMSE снизилась до  $0,028^{\circ}\text{C}$ , что соответствует улучшению точности на 64 %.

Таким образом, адаптивный алгоритм обеспечивает:

Повышение метеорологической информативности – снижение RMSE на 64 % за счёт локального сгущения точек в зонах высоких градиентов;

Практическую применимость – незначительное увеличение времени полёта (доли процента) делает алгоритм пригодным для реальных миссий БПЛА.

Предложенный подход может быть распространён на другие типы траекторий и использован в системах реального времени для адаптивного планирования маршрутов в зависимости от текущих метеоусловий и рельефа местности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках исследовательской работы была достигнута поставленная цель: разработан и программно реализован алгоритм планирования траектории БПЛА, максимизирующий информативность измерений метеорологических параметров (температуры) в приземном слое над территорией со сложным рельефом. Исследование проводилось на основе реальной цифровой модели рельефа Санкт-Петербурга (SRTM) с использованием смоделированного поля температуры, основанного на сухоадиабатическом вертикальном градиенте ( $0,65\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ ) и опорных данных метеостанции ВНИИГМИ-МЦД. Работа включала аналитический обзор существующих методов планирования траекторий, построение цифровой модели рельефа и температурного поля, программную реализацию эталонных («Змейка», «Песочные часы», спираль) и адаптивных алгоритмов, а также сравнительный вычислительный эксперимент. В результате предложен и апробирован адаптивный алгоритм «Адаптивная змейка», который по критерию порогового перепада температуры ( $\Delta T > 0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) выявляет зоны аномальных градиентов и локально сгущает маршрутные точки.

Выводы по задачам исследования:

1. Аналитический обзор методов. В работе систематизированы и проанализированы эталонные методы планирования траекторий («Змейка», «Песочные часы», Спиральные алгоритмы), а также более сложные подходы, включая адаптивное перепланирование и градиентные методы. Показано, что выбор метода является компромиссом между равномерностью покрытия, информативностью и энергоэффективностью, причем для сложного рельефа статические методы имеют принципиальные ограничения по качеству данных.
2. Разработка модели поля температуры. На основе цифровой модели рельефа Санкт-Петербурга и данных о температуре на метеостанции построена и верифицирована модель пространственного распределения температуры. Сравнение расчетных значений в пяти контрольных точках

показало расхождение с теоретическим градиентом не более 5% (фактический градиент  $\sim 0,68$  °C/100 м). Доказана корректность модели и ее пригодность для имитационного моделирования и оценки информативности маршрутов.

3. Разработка и реализация алгоритма. Предложен и программно реализован адаптивный алгоритм «Адаптивная змейка», который по критерию перепада температур ( $\Delta T > 0,15$  °C) выявляет зоны высоких градиентов поля и локально сгущает в них сетку измерений.

4. Вычислительный эксперимент и оценка эффективности. Проведено моделирование полетов по четырем маршрутам («Песочные часы», «Змейка», «Спираль», «Адаптивная змейка») и выполнена оценка их эффективности:

- «Песочные часы» (4 точки, 38.5 мин) обеспечивают лишь экспресс-оценку ( $RMSE = 0.05$  °C) и непригодны для детального анализа из-за крайне низкого покрытия.
- «Змейка» (15 точек, 100.3 мин) дает полное покрытие, однако из-за резких орографических аномалий демонстрирует высокую ошибку восстановления поля ( $RMSE = 0.08$  °C) из-за эффекта Гиббса при интерполяции.
- «Спираль» (101 точка, 198.1 мин) обеспечивает максимальную детализацию ( $RMSE = 0.04$  °C), но требует почти в 5 раз больше времени, чем не позволяет ресурс современных коммерческих БПЛА, что делает этот метод скорее теоретическим эталоном.
- «Адаптивная змейка» (17 точек, 100.5 мин) показала наилучший баланс. За счет добавления всего двух точек в зонах резких перепадов высот алгоритм позволил снизить ошибку ( $RMSE$ ) на 64% (до  $0.03$  °C) по сравнению с базовой «Змейкой».

Таким образом, разработанный адаптивный алгоритм «Адаптивная змейка» доказал свою эффективность как инструмент целевого высокоразрешающего зондирования, который, в отличие от классических статических схем, позволяет повысить качество восстанавливаемого

метеорологического поля без превышения технических ограничений современных БПЛА. Практическая значимость работы заключается в создании программного модуля для планирования энергоэффективных и информативных миссий в условиях сложного рельефа.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хромов, С. П. Метеорология и климатология : учебник для вузов / С. П. Хромов, М. А. Петросянц. – 7-е изд., испр. и доп. – М. : Изд-во МГУ, 2006. – 582 с.
2. Матвеев, Л. Т. Физика атмосферы : учебник для вузов / Л. Т. Матвеев. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Гидрометеиздат, 2000. – 778 с.
3. Беспилотные летательные аппараты: основы проектирования и применения / под общ. ред. В. С. Вербы, Б. Г. Татарского. – М. : Радиотехника, 2018. – 512 с.
4. Гурьянов, А. В. Системы автоматического управления беспилотных летательных аппаратов : учеб. пособие / А. В. Гурьянов, А. В. Шалыгин. – СПб. : БГТУ «Военмех», 2017. – 216 с.
5. Геоинформационные системы: учеб. пособие для вузов / под ред. В. С. Тикунова. – М. : Академия, 2010. – 352 с.
6. Choset, H. Coverage of Known Spaces: The Boustrophedon Cellular Decomposition / H. Choset, P. Pignon // Autonomous Robots. – 2000. – Vol. 9, № 3. – P. 247–253.
7. Galceran, E. A survey on coverage path planning for robotics / E. Galceran, M. Carreras // Robotics and Autonomous Systems. – 2013. – Vol. 61, № 12. – P. 1258–1276.
8. Савельев, А. А. Планирование траекторий беспилотных летательных аппаратов при мониторинге линейных объектов / А. А. Савельев, И. В. Майоров // Известия вузов. Авиационная техника. – 2020. – № 2. – С. 89–96.
9. Chao, H. Unmanned Aerial Systems for Atmospheric Science: A Review of Platforms, Sensors, and Applications / H. Chao, Y. Cao, Y. Chen // Sensors. – 2019. – Vol. 19, № 4. – Article 779.
10. Bonin, T. Evaluation of turbulence measurement techniques from a single Doppler lidar within the stable atmospheric surface layer / T. Bonin, P. Chilson, B. Zielke et al. // Atmospheric Measurement Techniques. – 2017. – Vol. 10, № 8. – P. 3021–3039.

11. Вилкова, Н. Н. Использование цифровых моделей рельефа для моделирования приземного поля температуры в городе / Н. Н. Вилкова // Метеорология и гидрология. – 2021. – № 5. – С. 45–55.
12. ArduPilot Project Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ardupilot.org/copter/> (дата обращения: 15.04.2026).
13. OpenTopography: High-Resolution Topography Data and Tools [Электронный ресурс] / OpenTopography Facility. – Режим доступа: <https://opentopography.org/> (дата обращения: 20.03.2026).
14. ВНИИГМИ-МЦД. Специализированные массивы данных по температуре воздуха и осадкам [Электронный ресурс] / Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. – Режим доступа: <http://meteo.ru/data> (дата обращения: 22.03.2024).
15. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global [Электронный ресурс] / U.S. Geological Survey. – Режим доступа: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 20.03.2026).
16. Jacobson, M. Z. Fundamentals of Atmospheric Modeling / M. Z. Jacobson. – 2nd ed. – Cambridge : Cambridge University Press, 2005. – 828 p.
17. Кузнецов, И. М. Энергетическая эффективность полета мультикоптера при ветровых возмущениях / И. М. Кузнецов, А. С. Логинов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 72–82.
18. Комаров, А. А. Метод адаптивной съёмки рельефа с помощью БПЛА на основе анализа локальных градиентов / А. А. Комаров, Д. В. Сидоров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – Вып. 3. – С. 211–219.
19. ГОСТ Р 57258–2016. Беспилотные авиационные системы. Термины и определения [Текст]. – Введ. 2017–07–01. – М. : Стандартинформ, 2016. – 16 с.

20. Быков, А. А. Применение беспилотных авиационных систем для зондирования атмосферы: состояние и перспективы / А. А. Быков, Н. В. Гордиенко // Метеорология и гидрология. – 2020. – № 8. – С. 93–108.

21. Гревцов, Н. М. Планирование траекторий полета беспилотных летательных аппаратов с учетом ограничений на информативность / Н. М. Гревцов, А. В. Зайцев, В. Ю. Рутковский // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2021. – Т. 22, № 8. – С. 421–428.

## ПРИЛОЖЕНИЯ А

```
import os
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import rasterio
from rasterio.warp import transform_bounds
from scipy.interpolate import griddata
import pandas as pd
import time

# ПУТЬ К ФАЙЛУ
desktop = os.path.join(os.path.expanduser("~"), "Desktop")
dem_file = os.path.join(desktop, "output_hh.tif")
if not os.path.exists(dem_file):
    raise FileNotFoundError(f"Файл не найден: {dem_file}")

# ЗАГРУЗКА ЦМР
print("Загрузка ЦМР...")
start_time = time.time()
with rasterio.open(dem_file) as src:
    h_orig, w_orig = src.height, src.width
    max_dim = 600
    factor = max(1, max(h_orig, w_orig) // max_dim)
    out_shape = (h_orig // factor, w_orig // factor)
    elevation = src.read(1, out_shape=out_shape).astype(np.float32)
    elevation[elevation < -1000] = np.nan
    src_crs = src.crs
    dst_crs = 'EPSG:4326'
    west_full, south_full, east_full, north_full = transform_bounds(src_crs, dst_crs, *src.bounds)
```

Рисунок 3 - Фрагмент программного кода на языке Python для загрузки и предварительной обработки цифровой модели рельефа

```
#Карта рельефа
fig1 = plt.figure(figsize=(10, 8))
im1 = plt.imshow(elevation, cmap='terrain', extent=[west, east, south, north])
plt.colorbar(im1, label='Высота (м)')
plt.title('Цифровая модель рельефа Санкт-Петербурга (SRTM)')
plt.xlabel('Долгота (° в.д.)')
plt.ylabel('Широта (° с.ш.)')
plt.tight_layout()
out1 = os.path.join(desktop, "relief_map.png")
plt.savefig(out1, dpi=150)
```

Рисунок 4 - Фрагмент программного кода на языке Python для визуализации цифровой модели рельефа Санкт-Петербурга

```

#Карта температуры
fig2 = plt.figure(figsize=(10, 8))
im2 = plt.imshow(temperature, cmap='coolwarm', extent=[west, east, south, north])
plt.colorbar(im2, label='Температура (°C)')
plt.title('Модель распределения температуры в Санкт-Петербурге')
plt.xlabel('Долгота (° в.д.)')
plt.ylabel('Широта (° с.ш.)')
plt.tight_layout()
out2 = os.path.join(desktop, "temperature_map.png")
plt.savefig(out2, dpi=150)

```

Рисунок 6 - Программная реализация построения карты распределения температуры воздуха в Санкт-Петербурге на основе модели вертикального градиента.

```

# 3. ПАРАМЕТРЫ
# -----
station_alt = 3.0
station_temp = 3.0
temp_gradient = 0.0065
speed = 10.0      # М/С
alpha = 1.0
beta = 5.0

# ТОЧКИ ДЛЯ ПЕСОЧНЫХ ЧАСОВ
center_lon = (west + east) / 2
center_lat = (south + north) / 2
offset = 0.032
points_deg = [
    (center_lon - offset, center_lat + offset),
    (center_lon + offset, center_lat + offset),
    (center_lon - offset, center_lat - offset),
    (center_lon + offset, center_lat - offset)
]
order = [0, 1, 2, 3, 0]

#ВЫСОТА И ТЕМПЕРАТУРА
def get_scalar(value):
    if isinstance(value, np.ndarray):
        return value.item() if value.size == 1 else value[0]
    return value

point_data = []
for i, (lon, lat) in enumerate(points_deg):
    h = griddata((Lon.flatten(), Lat.flatten()), elevation_filled.flatten(), (lon, lat), method='linear')
    h = get_scalar(h)
    if np.isnan(h):
        h = 0.0
    T = station_temp + temp_gradient * (station_alt - h)
    point_data.append({
        'seq': i+1,
        'lon': lon,
        'lat': lat,
        'height': h,
        'temperature': T
    })

route_points = [point_data[i] for i in order]
for idx, pt in enumerate(route_points):
    pt['route_seq'] = idx + 1

```

Рисунок 9 - Программная реализация моделирования маршрута «песочные часы»: задание параметров, формирование опорных точек и расчёт метеопараметров

```

# 5. ВЫСОТА И ТЕМПЕРАТУРА
def get_scalar(value):
    if isinstance(value, np.ndarray):
        return value.item() if value.size == 1 else value[0]
    return value

point_data = []
for i, (lon, lat) in enumerate(points_deg):
    h = griddata((Lon.flatten(), Lat.flatten()), elevation_filled.flatten(), (lon, lat), method='linear')
    h = get_scalar(h)
    if np.isnan(h):
        h = 0.0
    T = station_temp + temp_gradient * (station_alt - h)
    point_data.append({
        'seq': i+1,
        'lon': lon,
        'lat': lat,
        'height': h,
        'temperature': T
    })

```

Рисунок 11 - Программная реализация интерполяции высот рельефа и расчёта температуры воздуха в точках маршрута

```

# 6. РАСЧЁТ ВРЕМЕНИ (в секундах и минутах)
mean_lat = np.mean([p['lat'] for p in point_data])
m_per_deg_lat = 111320
m_per_deg_lon = 111320 * np.cos(np.radians(mean_lat))

segment_times_sec = [0.0]
cumulative_time_sec = [0.0]

for i in range(1, len(point_data)):
    lon1, lat1 = point_data[i-1]['lon'], point_data[i-1]['lat']
    lon2, lat2 = point_data[i]['lon'], point_data[i]['lat']
    dx = (lon2 - lon1) * m_per_deg_lon
    dy = (lat2 - lat1) * m_per_deg_lat
    dist = np.sqrt(dx*dx + dy*dy)
    seg_time_sec = dist / speed
    segment_times_sec.append(seg_time_sec)
    cumulative_time_sec.append(cumulative_time_sec[-1] + seg_time_sec)

for i, pt in enumerate(point_data):
    pt['segment_time_sec'] = segment_times_sec[i]
    pt['segment_time_min'] = segment_times_sec[i] / 60.0
    pt['time_from_start_sec'] = cumulative_time_sec[i]
    pt['time_from_start_min'] = cumulative_time_sec[i] / 60.0

total_time_sec = cumulative_time_sec[-1]
total_time_min = total_time_sec / 60.0
print(f"\nОбщее время маршрута: {total_time_sec:.1f} с ({total_time_min:.1f} мин)")

```

Рисунок 12 - Алгоритм расчёта пространственных расстояний и временных параметров полёта БПЛА.

```

#ИНТЕРПОЛЯТОР

interpolator = RegularGridInterpolator((lat_grid, lon_grid), elevation_filled,
                                       bounds_error=False, fill_value=0)

#ПАРАМЕТРЫ СПИРАЛИ
center_lon = (west + east) / 2
center_lat = (south + north) / 2

start_radius = 0.0
step_radius = 0.025      # шаг радиуса за виток (градусы)
max_radius = 0.105       # максимальный радиус (градусы) ≈ 11.7 км
delta_theta_deg = 15     # шаг по углу (градусы)
delta_theta = np.radians(delta_theta_deg)

theta = 0.0
points_deg = []
while True:
    r = start_radius + step_radius * (theta / (2*np.pi))
    if r > max_radius:
        break
    lon = center_lon + r * np.cos(theta)
    lat = center_lat + r * np.sin(theta)
    if west <= lon <= east and south <= lat <= north:
        points_deg.append((lon, lat))
    theta += delta_theta

# ВЫСОТЫ И ТЕМПЕРАТУРЫ
points_array = np.array(points_deg)[: , :-1]
heights = interpolator(points_array)
heights = np.nan_to_num(heights, nan=0.0)

station_alt = 3.0
station_temp = 3.0
temp_gradient = 0.0065
speed = 10.0 # м/с

point_data = []
for i, (lon, lat) in enumerate(points_deg):
    h = heights[i]
    T = station_temp + temp_gradient * (station_alt - h)
    point_data.append({
        'seq': i+1,
        'lon': lon,
        'lat': lat,
        'height': h,
        'temperature': T
    })

#РАСЧЕТ ДЛИНЫ И ВРЕМЕНИ
mean_lat = np.mean([p['lat'] for p in point_data])
m_per_deg_lat = 111320
m_per_deg_lon = 111320 * np.cos(np.radians(mean_lat))

cumulative_time_sec = [0.0]
for i in range(1, len(point_data)):
    lon1, lat1 = point_data[i-1]['lon'], point_data[i-1]['lat']
    lon2, lat2 = point_data[i]['lon'], point_data[i]['lat']
    dx = (lon2 - lon1) * m_per_deg_lon
    dy = (lat2 - lat1) * m_per_deg_lat
    d = np.hypot(dx, dy)
    cumulative_time_sec.append(cumulative_time_sec[-1] + d / speed)

for i, pt in enumerate(point_data):
    pt['time_min'] = cumulative_time_sec[i] / 60.0

total_time_sec = cumulative_time_sec[-1]
total_time_min = total_time_sec / 60.0
total_distance = total_time_sec * speed

```

Рисунок 14 - Программная реализация основных этапов моделирования спирального маршрута: интерполяция высот и расчёт температуры (а), вычисление длин сегментов и времени полёта (б)

```

# АДАПТИВНАЯ ЗМЕЙКА (ДОБАВЛЕНИЕ ТОЧЕК)
def add_points_by_gradient(points, temp_threshold=0.15):
    new_points = [points[0].copy()]
    for i in range(len(points)-1):
        T1 = points[i, 3]
        T2 = points[i+1, 3]
        if abs(T2 - T1) > temp_threshold:
            mid_lon = (points[i, 0] + points[i+1, 0]) / 2
            mid_lat = (points[i, 1] + points[i+1, 1]) / 2
            mid_h = (points[i, 2] + points[i+1, 2]) / 2
            mid_T = (T1 + T2) / 2
            new_points.append([mid_lon, mid_lat, mid_h, mid_T])
        new_points.append(points[i+1].copy())
    return np.array(new_points)

adaptive_points = add_points_by_gradient(snake_points, temp_threshold=0.15)
added_points = []
for p in adaptive_points:
    is_new = True
    for q in snake_points:
        if abs(p[0]-q[0]) < 1e-6 and abs(p[1]-q[1]) < 1e-6:
            is_new = False
            break
    if is_new:
        added_points.append(p)
added_points = np.array(added_points)

```

Рисунок 16 - Программная реализация адаптивной змейки (добавление точек по градиенту)

```

# КАРТА
fig, ax = plt.subplots(figsize=(12, 10))
im = ax.imshow(elevation_filled, cmap='terrain', extent=[west, east, south, north], origin='upper', alpha=0.5)
plt.colorbar(im, ax=ax, label='Высота (м)')

ax.plot(snake_points[:,0], snake_points[:,1], 'r-', linewidth=2, marker='o',
        markersize=4, label='Базовая змейка (15 точек)')
if len(added_points) > 0:
    ax.scatter(added_points[:,0], added_points[:,1], c='blue', s=150, marker='*',
              label='Добавленные точки (ΔT > 0.15°C)', zorder=5, edgecolors='black', linewidth=0.5)
for pt in adaptive_points:
    lon, lat, h, T = pt
    ax.text(lon+0.0015, lat+0.0015, f"{h:.0f}м\n{T:.1f}°C",
            fontsize=7, ha='left', va='bottom',
            bbox=dict(facecolor='white', alpha=0.7, boxstyle='round,pad=0.2'))
!ax.quiver(30.35, 59.92,
!         Vw * np.sin(np.radians(phi_w)),
!         Vw * np.cos(np.radians(phi_w)),
!         angles='xy', scale_units='xy', scale=3, color='black', width=0.01, alpha=0.8)
ax.text(30.235, 60.005, f'Ветер {Vw} м/с\nюго-юго-запад', fontsize=10, ha='left')

```

Рисунок 17 - Фрагмент программного кода для визуализации адаптивной змейки на цифровой модели рельефа