



# Описание объектов наблюдения в задачах планирования космической съемки

**В.В. Зайцев**<sup>1</sup>✉

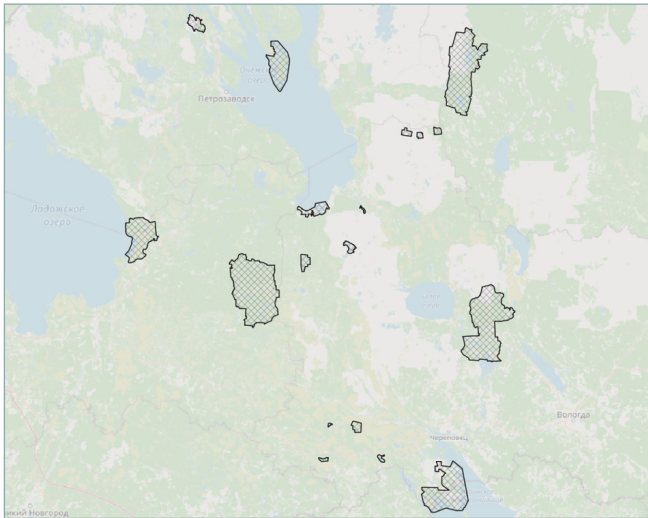
<sup>1</sup> Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия  
✉ vka@mil.ru

**ЦИТИРОВАНИЕ** Зайцев В.В. Описание объектов наблюдения в задачах планирования космической съемки // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 6. С. 87–99. DOI:10.30533/GiA-2025-060.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** дистанционное зондирование Земли, планирование съемки, объект наблюдения, режим съемки, свойства полигона

**АННОТАЦИЯ** В настоящее время активно развиваются космические многорежимные системы наблюдения поверхности Земли, вследствие чего необходимо совершенствовать методы планирования космической оптико-электронной и радиолокационной съемки. Повышаются требования к точности наведения съемочной системы для протяженных, криволинейных и площадных районов, однако вопросы эффективного описания исходных данных для задания объектов наблюдения практически не исследованы. Предлагаемая статья посвящена анализу и разработке расчетных моделей для характеристики геометрических особенностей объектов в задачах планирования съемки современных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Рассмотрены основные характеристики объектов наблюдения в задачах планирования, а также факторы, влияющие на точность получаемых результатов. В статье показано, что определение геометрических размеров объекта зависит от применяемой проекции, в которой представлены исходные данные. Для получения точных результатов и сокращения расчетов предлагается применять локальную косую цилиндрическую проекцию с параметрами для каждого объекта. Предложена методика расчета параметров проекций и основные соотношения для вычислений. Представлены способы расчета геометрического центра объекта, угла ориентации векторного полигона, геометрических размеров объекта и метод расчета граничных описательных рамок. Результаты работы можно использовать для планирования съемки в современных режимах наблюдения высокоточной аппаратурой, на больших площадях, для продолжительных маршрутных включений, а также для составления планов применения группировки космических аппаратов с реализацией в современных геоинформационных системах.

# 1 Введение



**Рис. 1** 

Пример объектов наблюдения сложной конфигурации (особо охраняемые территории северо-запада России)

**Fig. 1**

An example of observation objects with an arbitrary configuration (specially protected areas of north-west Russia)

Современные системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса с высоким и сверхвысоким разрешением характеризуются достаточно малой полосой захвата съемочной аппаратуры, что усложняет решение задач съемки объектов наблюдения в интересах ряда потребителей космических данных.

В общем случае объекты наблюдения могут иметь сложную конфигурацию. Например, кроме обычных точечных целей это могут быть также линейно-протяженные или площадные объекты: зоны экологического мониторинга значительных по площади регионов, границы и линии соприкосновения государств в условиях постоянно возникающих вооруженных конфликтов, протяженные инженерные и технологические объекты, территории стихийных бедствий и техногенных аварий (рис. 1).

Это вынуждает выполнять многомаршрутную съемку объектов наблюдения одним космическим аппаратом (КА) или несколькими КА из состава группировки для покрытия требуемой площади несколькими смежными снимками с заданным перекрытием.

В настоящее время такие решения поддерживаются развитием технических и баллистических возможностей съемочных систем на базе современных КА ДЗЗ, которые характеризуются высокой производительностью и оперативностью съемки площадных объектов. Это достигается:

- совместным применением КА с датчиками, работающими в различных диапазонах спектра, в том числе оптическом и радиолокационном;
- задействованием многорежимных систем, способных выполнять детальную и обзорную съемку одним комплектом съемочной аппаратуры;
- использованием группировок из нескольких КА для увеличения частоты просмотра объектов и размеров территорий мониторинга;
- внедрением режимов съемки КА с двумя и тремя степенями свободы вращения съемочной камеры, позволяющими выполнять динамическую съемку с произвольным азимутом относительно подспутниковой трассы и с сохранением качества получаемых изображений.

В таких условиях становится актуальной задача планирования съемки объектов наблюдения в сложных режимах наблюдения для покрытия района наблюдения узкой полосой захвата без пропуска и с минимальными межмаршрутными перекрытиями. При этом планирование космической съемки (особенно несколькими КА ДЗЗ) представляет собой многокритериальную задачу: необходимо выбрать оптимальные параметры ориентации каждого КА группировки в момент съемки и сформировать маршруты с шириной полосы захвата, обеспечивающей наблюдение наибольшей площади за заданное время с учетом накладываемых ограничений в виде свойств получаемых снимков.

В качестве исходной информации для планирования космической съемки используются параметры орбитального построения КА, параметры съемочной аппаратуры, требования к качеству получаемой информации, а также сведения о районах наблюдения.

В то же время большинство существующих разработок в области планирования применения спутниковых систем ДЗЗ сводится к оптимизационным задачам, решение которых в основном представляет собой поиск стратегии управления бортовой аппаратурой КА, позволяющей при соблюдении ограничений съемки достичь наилучшей эффективности системы наблюдения на заданном временном интервале планирования [1–3]. При этом практически не исследованы вопросы эффективного описания параметров объектов наблюдения, таких как координаты его геометрического центра, ориентация

относительно меридиана, протяженность, ширина и площадь, которые являются исходными данными для любой задачи планирования. Обычно используются стандартные функциональные возможности ГИС-приложений, позволяющих представить объект векторными моделями в виде набора географических координат точек полигона [4], и его разделение маршрутами съемки выполняется в криволинейных угловых координатах. Однако при этом не рассматриваются погрешности из-за особенностей применения равнопромежуточных картографических проекций на больших территориях или в районе полюсов, что отмечается, например, в работах [5, 6].

Таким образом, разработка научно-методического аппарата описания геометрических свойств объектов съемки, оценка их влияния на результаты планирования являются актуальными. Цель настоящего исследования состоит в определении таких методов расчета параметров объектов, которые позволили бы выполнять планирование съемки современными системами ДЗЗ, в том числе с применением новых режимов работы целевой аппаратуры, независимо от протяженности, расположения на поверхности Земли и конфигурации контура заданного района наблюдения относительно подспутниковой трассы. Для достижения указанной цели предполагается решить частные задачи: определить перечень свойств объекта наблюдения для планирования съемки, требований к ним; разработать методики расчета параметров специализированной картографической проекции. Для решения данных задач необходимы алгоритмы компьютерной графики и обработки пространственных данных в ГИС, элементы математической картографии.

## 2 Материалы и методы

### 2.1 Характеристики объекта наблюдения

Для описания объектов наблюдения используется набор статических и динамических параметров. Статические параметры не изменяются в процессе планирования съемки. К ним относятся:

- наименование, класс, идентификатор в базе данных объектов;
- координаты центра объекта  $(x_m, y_m)$  и среднее превышение над поверхностью земного эллипсоида  $(h_m)$ ;
- векторные данные в виде набора координат граничного полигона района наблюдения

1 

$$R = \{(x_i, y_i)\},$$

где  $i \in [0, N - 1]$ ,  $N$  — количество вершин полигона;

- цифровая модель рельефа в пределах граничного полигона.

Динамические параметры изменяются во времени при формировании опорного плана съемки, долгосрочном, оперативном планировании, разработке рабочей программы. К динамическим параметрам относят:

- векторный слой текущего покрытия съемкой (полигоны с идентификатором объекта);
- приоритет объекта;
- параметры съемки для объекта (режим работы съемочной аппаратуры, разрешение, угол обзора);
- уровень облачности и освещенности для систем оптического диапазона;
- предельные частотные параметры отраженных сигналов для радиолокатора с синтезированной апертурой антенны.

Параметры объектов хранятся в формате, удобном для программного обеспечения планирования. Это могут быть одиночные векторные слои, как правило полигональные, либо таблицы геореляционной базы данных с соответствующими атрибутивными полями.

На этапе планирования съемки описываются границы объектов наблюдения в определенной системе координат. Исходное координатное описание может выполняться:

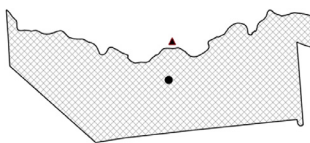
- в географических координатах (широта, долгота);
- в прямоугольных координатах глобальной системы координат (например, веб-Меркатора и аналогичных);
- в прямоугольных координатах зональной системы координат (проекция Гаусса — Крюгера, UTM).

Определим основные правила задания геометрического описания для полигонального слоя объектов:

- однопартийность (полигон не должен быть сложным и должен состоять только из одного пространственного объекта, соответственно, в нем должны отсутствовать части с оцифровкой в обратном направлении — отверстия);
- топологическая правильность (границы полигона не должны пересекаться);
- упрощенность границ и выпуклость полигона.

Последнее требование не обязательно, но позволяет сократить вычисления и получить более предсказуемые результаты при планировании. Для предварительной обработки данных, упрощения полигонов и уменьшения количества точек границ можно использовать стандартные функции программного обеспечения геоинформационных систем (ПО ГИС) для генерализации. Например, алгоритм Дугласа — Пекера (D. Douglas, T. Peucker)<sup>1</sup> для упрощения границ, алгоритм Грэхема (R. Graham)<sup>2</sup> для создания выпуклых оболочек многоугольников. В качестве параметра сглаживания (расстояния, на котором будут удалены и прорежены вершины) можно использовать мгновенный минимальный размер полосы захвата съемочной аппаратуры.

## 2.2 Определение центра полигона объекта планирования



**Рис. 2** ▲  
Положение центра полигона

**Fig. 2**  
Position of the polygon center

**Условные обозначения**

- ▲ геометрический центр, смещенный в сторону максимальной концентрации вершин
- центроид полигона

2 ➤

3 ➤

Положение центральной точки — это начало «внутренней системы координат» объекта. Относительно нее рассчитываются остальные параметры и характеристики объекта наблюдения: главный угол и геометрические размеры.

Центр полигональной фигуры объекта позволяет определить точку наведения съемочной аппаратуры для тех случаев, когда размеры объекта меньше полосы захвата. Хотя нахождение центра полигона является стандартной задачей для геоинформационных приложений и систем технического зрения, его практическое определение вызывает известные трудности, поскольку может осуществляться несколькими способами, которые на практике дают различные результаты.

Если полигон содержит  $N$  вершин, его геометрический центр  $(x_m, y_m)$  находится как среднее значение координат вершин полигона

$$x_m = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i,$$

$$y_m = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y_i.$$

Соответственно, центр выпуклого объекта всегда лежит внутри полигона. Невыпуклый объект может иметь центр, лежащий вне границы (рис. 2).

Геометрический центр полигона (центр масс) в большинстве случаев не соответствует фактическому центру многоугольника и будет смещаться в сторону максимальной плотности расположения вершин. Тем не менее геометрический

1 Douglas D.H., Peucker T.K. Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line or Its Caricature // The Canadian Cartographer. 1973. Vol. 10. No. 2. P. 112-122.

2 Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р. и др. Алгоритмы: построение и анализ / пер. с англ. 2-е изд. М.: Вильямс, 2011. 1296 с.

центр является важной характеристикой, которая используется для определения производных параметров полигона.

Для нахождения фактических координат центра полигона (центроида) для задач планирования используется расчет через площадь фигуры<sup>3</sup>, определяемую как сумма площадей трапеций, образованных последовательными вершинами полигонов в плоской системе координат:

4 ➤ 
$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N-1} (x_{i+1}y_i - x_iy_{i+1}).$$

При прямой оцифровке полигона по часовой стрелке значение площади положительно, при обратной – отрицательно. Координаты центроида определяются соотношениями

5 ➤ 
$$x_m = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i + x_{i+1})(x_iy_{i+1} - x_{i+1}y_i);$$

6 ➤ 
$$y_m = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{N-1} (y_i + y_{i+1})(x_iy_{i+1} - x_{i+1}y_i).$$

Положение центроида объекта (рис. 2) не зависит от системы координат точек полигона. Вычисления можно выполнять также в равнопромежуточной проекции (широта / долгота  $B, L$ ).

Значение площади  $A$  при выборе определенных проекций совпадает с фактической площадью полигональной фигуры. Для достаточно малых объектов наблюдения, например в проекции Меркатора, можно использовать поправку площади на масштабный коэффициент<sup>4</sup>, зависящий от широты объекта:

7 ➤ 
$$m = \sec^2 B.$$

Для зональных проекций действительное значение площади считается в пределах рабочей зоны. Для общих случаев и значительных по протяженности глобальных объектов наблюдения следует использовать суммы площадей фигур, ограниченных геодезическими линиями между смежными точками границы полигона. Длины геодезических линий ограничивают в зависимости от требуемой точности вычислений [7]. Данный функционал входит в программное обеспечение большинства современных ГИС.

Известны и другие методы нахождения центра координат полигона [8, 9]: при помощи простых вспомогательных фигур, образованных вершинами полигона. Например, это может быть центр пересечения большой и малой полуоси вписанного в многоугольник эллипса либо центр, образованный прямыми, проходящими через центры сторон ограничивающего прямоугольника.

### 2.3 Расчет геометрических размеров объекта планирования

К геометрическим параметрам объекта планирования относятся его ширина, протяженность и угол ориентации. Длинная сторона или протяженность объекта определяет продолжительность включения съемочной аппаратуры для сканерных систем, ширина объекта — количество маршрутов или включений. Ориентация объекта с учетом наклона орбиты определяет направление сканирования относительно подспутниковой трассы.

3 Xiao N. GIS Algorithms: Theory and Applications for Geographic Information Science & Technology. London: SAGE Publications, 2016. 336 p.

4 Вахрамеева Л.А., Бугаевский Л.М., Казакова З.Л. Математическая картография: учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 286 с.

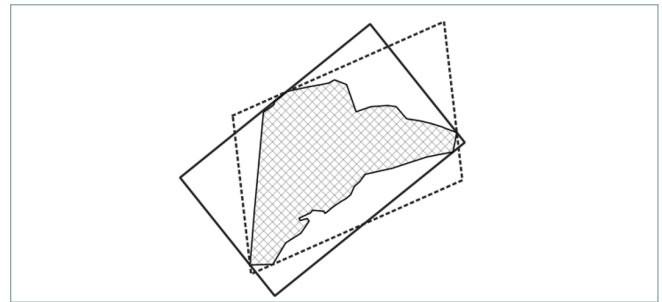
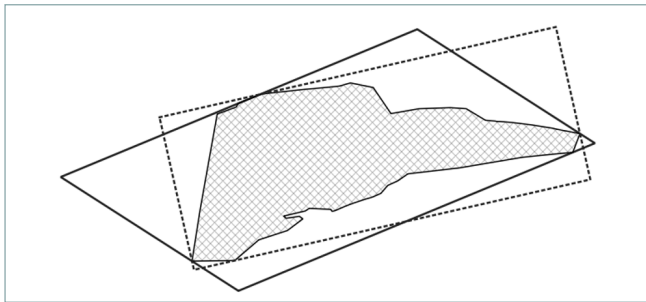
В вычислительной геометрии и геоинформатике для определения граничных размеров полигона находится минимальная ограничивающая рамка, которая полностью содержит полигон. Для объектов наблюдения ограничивающую рамку следует выбирать, исходя из правила достижения минимального количества включений съемочной аппаратуры КА за счет увеличения продолжительности съемки на маршруте. Это позволит сохранить рабочий ресурс КА и выполнить съемку протяженных объектов за минимальное время. Таким образом, ограничивающая рамка должна быть повернута вдоль преобладающего направления полигона (азимута наиболее длинного набора сегментов) так, чтобы при этом получалась наименьшая площадь.

Известен алгоритм Rotating Calipers, предложенный М. Шамосом (M. Shamos<sup>5</sup>) и развитый до практического применения Г. Туссенем (G. Toussaint)<sup>6</sup>. Алгоритм заключается в повороте опорных параллельных прямых, построенных между минимальными и максимальными точками выпуклой оболочки полигона. Повороты выполняются, пока опорные прямые не совпадут с краем выпуклой оболочки, при этом вычисляется площадь получившегося прямоугольника. Когда прямоугольник вернется в первоначальное положение, находят минимальную площадь из всех вариантов поворота. В качестве критерия возможно также вычисление минимального периметра ограничивающей рамки. Следует отметить, что алгоритм работает только на выпуклых полигонах или выпуклых оболочках, результат зависит от применяемой проекции, в которой представлены исходные данные (рис. 3), и всегда присутствуют проективные ошибки, связанные с изменением расстояний и площадей в зависимости от широты вершин полигона.


**Рис. 3**  Построенные граничные рамки  
**Fig. 3** Boundary frames constructed

Равнопромежуточная проекция (широта / долгота) – пунктирная линия /  
The equidistant projection (latitude / longitude) – dotted line

Проекция Меркатора – сплошная линия /  
The Mercator projection – solid line



В обработке изображений для нахождения ограничивающей рамки используют центральные моменты двумерной функции<sup>7</sup>, описывающей форму полигона при помощи эллипса. Метод успешно применяется на практике для различных приложений в задачах обработки изображений. При приведении моментов к геометрическому центру объекта  $(x_m, y_m)$  центральные моменты в дискретном виде определяются по формуле


**8**  
$$u_{pq} = \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - x_m)^p (y_i - y_m)^q,$$

где  $p, q = 0, 1, 2, \dots$  – степени момента порядка  $(p + q)$ .

Моменты позволяют вычислить большую  $a$  и малую  $b$  полуоси эллипса полигона:

**9**  
$$a = \sqrt{\frac{2(u_{20} + u_{02} + D)}{u_{11}}},$$

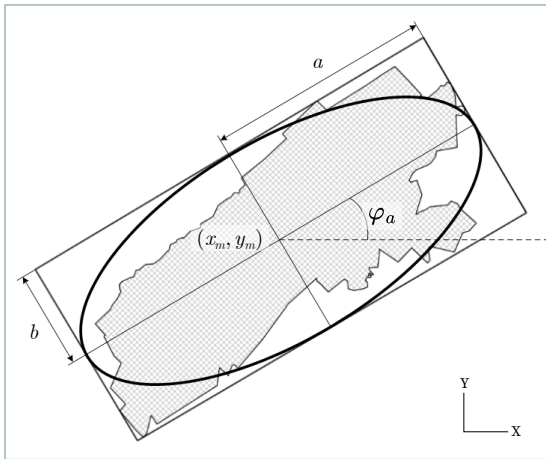
**10**  
$$b = \sqrt{\frac{2(u_{20} + u_{02} - D)}{u_{11}}},$$

**11**  где  $D = \sqrt{4u_{11}^2 + (u_{20} + u_{02})^2}$ .

5 Shamos M.I. Computational Geometry: PhD Thesis. New Haven, 1978. 236 p.

6 Toussaint G.T. Solving Geometric Problems with the Rotating Calipers // Proceedings of IEEE MELECON'83. Athens: IEEE, 1983. P. A10.02/1-4.

7 Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital Image Processing. 4th ed. New York: Pearson Education, 2018. 1022 p.



**Рис. 4** ⬆  
Граничные рамки, построенные с использованием вспомогательного эллипса

**Fig. 4**  
Bounding frames constructed using an auxiliary ellipse

Угол ориентации большой полуоси эллипса относительно координатной оси  $x$  (рис. 4) вычисляется по формуле

**12** ⬆ 
$$\varphi_a = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{2u_{11}}{u_{20} - u_{02}} \right).$$

Как видно из соотношений, получаемые размеры объекта ( $2a$  и  $2b$ ) имеют зависимость от точного нахождения координат центра полигона. Из-за смещения центральной точки и пропуска части точек контура объекта в пределах вписанной фигуры (рис. 4) большая и малая полуоси дают неверные значения размеров объекта. Их можно использовать для предварительной оценки, но не для высокоточного планирования наведения камеры съемочной системы.

Однако величину угла ориентации эллипса  $\varphi$  удобно использовать для расчетов положения вершин граничной рамки, азимута направления объекта относительно меридианов (или центрального меридиана) в рабочей системе координат, представленной исходными координатами точек полигона объекта.

Определим параметры прямой, проходящей через центр полигона  $(x_m, y_m)$  в направлении, задаваемом углом  $\varphi_a$ .

Вспомогательные координаты начальной и конечной точек с единичной длиной отрезка:

**13** ⬆ 
$$x_n = -\cos \varphi_a + x_m,$$
  
**14** ⬆ 
$$y_n = -\sin \varphi_a + y_m;$$
  
**15** ⬆ 
$$x_k = \cos \varphi_a + x_m,$$
  
**16** ⬆ 
$$y_k = \sin \varphi_a + y_m.$$

Уравнение прямой

**17** ⬆ 
$$k_1 x + k_2 y + k_3 = 0,$$

**18** ⬆ где  $k_1 = x_n - y_n;$   
**19** ⬆  $k_2 = y_k - y_n;$   
**20** ⬆  $k_3 = -(ax_n + by_n).$

Расстояние  $d$  от любой точки полигона  $R = \{(x_i, y_i)\}$  до этой прямой равно

**21** ⬆ 
$$d = \frac{k_1 x + k_2 y + k_3}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}}.$$

Таким образом, если расстояние больше или меньше нуля, точки будут находиться с разных сторон от прямой. Выполняя перебор вершин полигона, можно найти максимальное удаление точек от прямой с каждой стороны

**22** ⬆ 
$$w_1 = d_{max},$$
  
**23** ⬆ 
$$w_2 = d_{min}$$

и, соответственно, ширину граничной рамки полигона

**24** ⬆ 
$$w = w_1 + w_2.$$

Угол ориентации малой оси эллипса равен

**25** ⬆ 
$$\varphi_b = \varphi_a + \frac{\pi}{2}.$$

Аналогично находятся максимальное удаление вершин относительно малой полуоси  $h_1, h_2$  и длина граничной рамки:

**26** ⬆ 
$$h = h_1 + h_2.$$

Проведем через центр объекта взаимно перпендикулярные отрезки  $[z_1(x, y), z_2(x, y)]$  и  $[z_3(x, y), z_4(x, y)]$  — оси внутренней системы координат объекта:

- 27 ➤
- 28 ➤
- 29 ➤
- 30 ➤
- 31 ➤
- 32 ➤
- 33 ➤
- 34 ➤

$$\begin{aligned} x_{z_1} &= w_1 \cos \varphi_a + x_m, \\ y_{z_1} &= w_1 \sin \varphi_a + y_m, \\ x_{z_2} &= w_2 \cos \varphi_a + x_m, \\ y_{z_2} &= w_2 \sin \varphi_a + y_m, \\ x_{z_3} &= -h_1 \cos \varphi_b + x_m, \\ y_{z_3} &= -h_1 \sin \varphi_b + y_m, \\ x_{z_4} &= -h_2 \cos \varphi_b + x_m, \\ y_{z_4} &= -h_2 \sin \varphi_b + y_m. \end{aligned}$$

Затем вычислим координаты четырех угловых точек ограничивающей рамки:

- 35 ➤
- 36 ➤
- 37 ➤
- 38 ➤
- 39 ➤
- 40 ➤
- 41 ➤
- 42 ➤

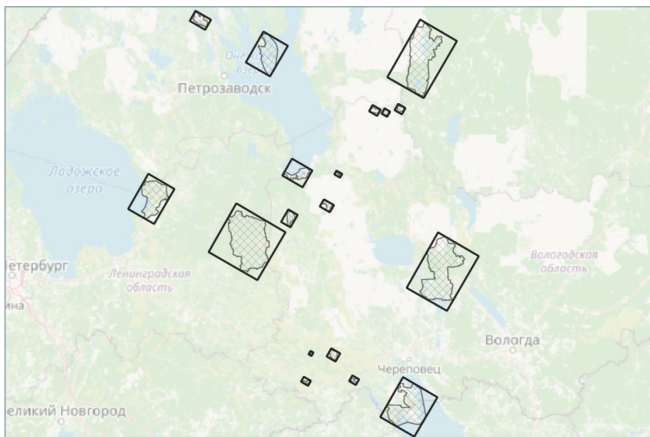
$$\begin{aligned} x_1 &= x_{z_1} - h_1 \cos \varphi_b, \\ y_1 &= y_{z_1} - h_1 \sin \varphi_b, \\ x_2 &= x_{z_1} - h_2 \cos \varphi_b, \\ y_2 &= y_{z_1} - h_2 \sin \varphi_b, \\ x_3 &= x_{z_2} - h_2 \cos \varphi_b, \\ y_3 &= y_{z_2} - h_2 \sin \varphi_b, \\ x_4 &= x_{z_2} - h_1 \cos \varphi_b, \\ y_4 &= y_{z_2} - h_1 \sin \varphi_b. \end{aligned}$$

Координаты центра ограничивающей рамки, лежащего на пересечении диагоналей прямоугольника, в общем случае не совпадут с координатами геометрического центра и центроида полигона, но их также можно использовать в качестве характеристики объекта наблюдения.

Если КА может выполнять отклонение оптической оси съемочной камеры только по углу крена (в плоскости, перпендикулярной плоскости орбиты), граничные рамки объекта должны быть ориентированы вдоль подспутниковой трассы космического аппарата. Угол  $\varphi_a$  в расчетах определяется наклоном орбиты  $i$ :

43 ➤ 
$$\varphi_a = \frac{\pi}{2} - i.$$

На рис. 5 приведены граничные рамки для объектов наблюдения, ориентированные относительно трассы КА.



**Рис. 5** ⬆  
 Планирование границ съемки с постоянным углом ориентации объекта относительно подспутниковой трассы КА с наклоном орбиты  $60^\circ$

**Fig. 5**  
 Planning the boundaries with a constant angle of orientation of the object relative to the sub-satellite path of the spacecraft with an orbital inclination of  $60^\circ$

### 3 Результаты и обсуждение

При вычислениях ограничивающей рамки важное значение имеет вопрос о картографической проекции, которая выбирается из следующих взаимно противоречивых требований:

- равноугольность и конформность отображения;
- минимальные искажения площадей и длин;
- возможность работы на больших территориях.

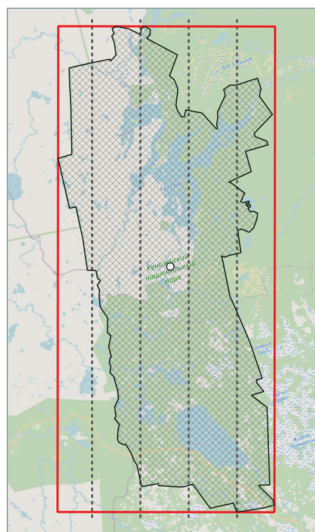
Применение зональных проекций как оптимальных для достижения указанных целей не всегда возможно из-за протяженных объектов съемки, а также при планировании съемки на значительных по площади территориях либо на всей поверхности земного эллипсоида. Самые большие искажения для равноугольных проекций возникают по широте, что приводит к разрывам между съемочными маршрутами или к их переналожению.

**Рис. 6** ✓

Результат расчетов граничной рамки и маршрутов съемки в косой цилиндрической проекции Меркатора на примере полигона с углом ориентации  $17,8^\circ$  и с центром в точке центраида полигона

**Fig. 6**

The result of calculations of the boundary frame and survey routes in the oblique cylindrical Mercator projection using the example of a polygon with an orientation angle of  $17.8^\circ$  and with the center at the polygon centroid point

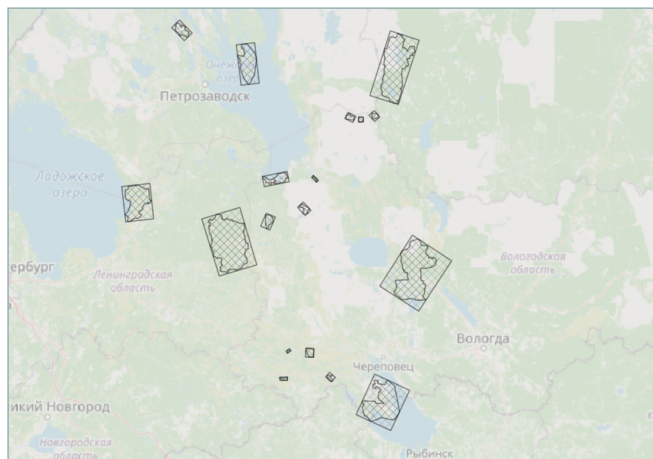


**Рис. 7** ✓

Планирование границ объектов наблюдения с учетом произвольной ориентации съемочной камеры

**Fig. 7**

Planning the boundaries of observation objects taking into account the arbitrary orientation of the shooting camera



В данной работе для расчетов граничных рамок объектов и для уменьшения искажений предлагается использовать косую цилиндрическую проекцию Меркатора в версии Хотина (*англ.* Hotine Oblique Mercator), в которой параметры проекции задаются центром системы координат каждого объекта и его азимутом относительно меридиана.

В качестве исходной для хранения координат объектов в системе планирования предлагается проекция веб-Меркатора для неискаженного отображения полигонов и сокращения расчетов. Получение параметров проекции для каждого объекта складывается из следующих этапов:

- 1) определяется центр полигона в географических координатах;
- 2) вычисляется азимут преобладающего направления объекта (угол  $\varphi_a$ ) в исходной проекции (или любой равноугольной проекции);
- 3) задаются параметры косой цилиндрической проекции (в версии Хотина) с началом системы координат в центре полигона и азимутом объекта;
- 4) вычисляются координаты граничных рамок каждого объекта с условием, что в косой проекции  $\varphi_a = 0, \varphi_b = \pi/2$ ;
- 5) вычисляются геометрические параметры объекта;
- 6) координаты вершин каждой граничной рамки полигона пересчитываются в исходную проекцию;
- 7) результаты расчетов записываются в атрибутивную таблицу слоя объектов в системе планирования.

Косая цилиндрическая проекция позволяет сохранить масштаб вдоль главного направления объекта, что важно для расчетов граничных рамок и дальнейшего проектирования маршрутов при формировании полного покрытия площади (рис. 6). Кроме того, в отличие от зональных проекций, косая проекция позволяет избежать переходов между зонами для протяженных с запада на восток объектов и упростить вычисления за счет исключения операции подбора зоны.

В случае, когда КА в момент съемки может совершать вращение относительно центра масс только по углу крена (рис. 5), используется широко известный как космическая косая проекция Меркатора частный вариант косой цилиндрической проекции, предложенный Дж.П. Снайдером (J.P. Snyder)<sup>8</sup> и применяемый для планирования съемки КА на солнечно-синхронной орбите в определенный момент времени. Данная проекция сохраняет конформность отображения вдоль трассы КА, но не учитывает направление протяженности объекта.

В нормальной цилиндрической проекции Меркатора рабочего проекта полученная граничная рамка будет иметь вид четырехугольника, разность между противоположными сторонами которого и угол между ними будут зависеть от широты расположения вершин и размеров объекта. На рис. 7 показаны результаты проектирования граничных рамок объектов наблюдения, находящихся в пределах двух шестиградусных зон.

Реализация рассматриваемого способа расчета границ объекта наблюдения производилась в среде ГИС QGIS. Исходные данные для проекции каждого объекта задавались параметрами в формате proj.4, а пересчет выполнялся с использованием свободно распространяемой библиотеки proj<sup>9</sup>. Приведем строку задания проекции для объекта из примера, показанного на рис. 6:

```
+proj=omerc +lat_0=61.95 +lonc=38.14
+alpha=0 +gamma=-17.8 +ellps=WGS84
+units=m +no_defs.
```

8 Snyder J.P. Space Oblique Mercator Projection Mathematical Development. Reston: Geological Survey, 1981. 108 p.

9 PROJ. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://proj.org/en/9.4> (дата обращения: 01.08.2024).

Полученные в результате расчетов граничные рамки объектов рекомендуется разбить на маршруты (полигоны с шириной, равной полосе захвата) с необходимым межмаршрутным перекрытием. Данную операцию также следует выполнять в локальной косой цилиндрической проекции Меркатора для каждого объекта во избежание переналожений и разрывов. Продолжительность включения на маршрутах и их длину следует ограничивать размерами исходного полигона. Для данных вычислений можно применять оверлейные операции [10] из функционала ГИС-приложений с учетом упреждения съемки объекта.

## 4 Выводы

В результате развития съемочных систем, совершенствования режимов съемки появляются новые требования к описанию объектов наблюдения. В работе обобщены характеристики объектов наблюдения для использования в системах планирования съемки современных систем ДЗЗ с программным сканированием. Показано, что определение геометрических размеров объекта зависит от применяемой проекции, в которой представлены исходные данные. Для получения точных результатов и сокращения расчетов предлагается применять локальную косую цилиндрическую проекцию со своими параметрами для каждого объекта. Предложены методика расчета параметров проекции и основные соотношения для вычислений, приведены соответствующие примеры. Результаты работы можно использовать для проектирования съемки в современных режимах наблюдения высокоточной аппаратурой на больших площадях для продолжительных маршрутных включений, а также для планирования работы группировки КА.

### БИБЛИОГРАФИЯ

1. Григорьев А.Н., Замарин А.И., Караваев М.Н. Метод формирования групповых объектов для космических средств дистанционного зондирования Земли // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15, № 4. С. 587–594. DOI:10.17586/2226-1494-2015-15-4-587-594.
2. Zezhong LU, Xin Shen, Deren LI, et al. Multiple Super-Agile Satellite Collaborative Mission Planning for Area Target Imaging // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2023. Vol. 117. P. 103211. DOI:10.1016/j.jag.2023.103211.
3. Li F., Wan Q., Wen F., et al. Multi-Satellite Imaging Task Planning for Large Regional Coverage: A Heuristic Algorithm Based on Triple Grids Method // Remote Sensing. 2024. Vol. 16. P. 194. DOI:10.3390/rs16010194.
4. Галузин В.А., Симонова Е.В. Планирование съемки площадных объектов наблюдения группировкой космических аппаратов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20, № 6-2. С. 344–351.
5. Дарнопых В.В., Усовик И.В. Автоматизация параметрического анализа целевого функционирования космических систем дистанционного зондирования Земли // Труды МАИ. 2011. № 47. С. 10. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://trudymai.ru/upload/iblock/d83/avtomatizatsiya-parametricheskogo-analiza-tselevogo-funktsionirovaniya-kosmicheskikh-sistem-distantsionnogo-zondirovaniya-zemli.pdf> (дата обращения: 25.08.2025).
6. Емельянов А.А., Малышев В.В., Смольянинов Ю.А. и др. Формализация задачи оперативного планирования целевого функционирования разнотипных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Труды МАИ. 2017. № 96. С. 11. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://trudymai.ru/published.php?ID=85921> (дата обращения: 25.08.2025).
7. Обиденко В.И. Определение метрических параметров территории Российской Федерации средствами геоинформационных систем // Вестник СГУГиТ. 2018. Т. 23, № 2. С. 18–33.
8. Mulchrone K., Choudhury K. Fitting an Ellipse to an Arbitrary Shape: Implications for Strain Analysis // Journal of Structural Geology. 2004. Vol. 26. Iss. 1. P. 143–153. DOI:10.1016/S0191-8141(03)00093-2.

9. Yu F., Chou A., Ko K. On the Complexity of Finding Circumscribed Rectangles and Squares for a Two-Dimensional Domain // Journal of Complexity. 2006. Vol. 22. Iss. 6. P. 803–817. DOI:10.1016/j.jco.2006.05.005.
10. Тюкачев Н.А. Алгоритм построения оверлея многоугольников и многогранников // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5, № 5. С. 51–63.

**АВТОР** **Зайцев Владимир Валентинович**

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» МО РФ,  
Санкт-Петербург, Россия  
кафедра оптико-электронных средств контроля,  
факультет сбора и обработки информации  
канд. техн. наук

Поступила 08.09.2025. Принята к публикации 19.12.2025. Опубликовано 26.12.2025.



# Description of Observation Objects in Space Survey Planning Tasks

Vladimir V. Zaytsev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> A.F. Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia  
 vka@mil.ru

**CITATION** Zaytsev VV. Description of Observation Objects in Space Survey Planning Tasks. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(6): 87–99. DOI:10.30533/GiA-2025-060.

**KEYWORDS** remote sensing, survey planning, observation object, survey modes, polygon properties

**ABSTRACT** Development of modern space multi-mode Earth observation systems necessitates improvement of planning methods for space optical-electronic and radar survey. Requirements for survey system pointing accuracy are increasing for extended, curved, and areal regions, yet issues related to the effective description of initial data for defining observation objects remain virtually unexplored. This article analyzes and develops computational models for characterizing the geometric features of objects in survey planning tasks for modern Earth remote sensing spacecraft. The article examines the key characteristics of observation objects in planning tasks, as well as factors influencing the accuracy of the obtained results. The article demonstrates that determining the geometric dimensions of an object depends on the projection used to represent the initial data. To obtain accurate results and reduce calculation time, it is proposed to use a local oblique cylindrical projection with parameters for each object. A method for calculating projection parameters and the basic relationships for the calculations are proposed. Methods for calculating the geometric center of an object, the orientation angle of a vector polygon, the geometric dimensions of an object, and a method for calculating descriptive bounding frames are proposed. The results can be used for planning surveys in modern observation modes with high-resolution equipment, over large areas, for long-term missions, and for planning the use of satellite constellations with implementation in modern geographic information systems.

**REFERENCES**

1. Grigor'ev AN, Zamarin AI, Karavaev MN. Metod formirovaniya gruppovykh ob'ektov dlya kosmicheskikh sredstv distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Method of Group Objects Forming for Space-Based Remote Sensing of the Earth]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2015;15(4): 587–594. (In Russian). DOI:10.17586/2226-1494-2015-15-4-587-594.

2. Zezhong LU, Xin Shen, Deren LI, et al. Multiple Super-Agile Satellite Collaborative Mission Planning for Area Target Imaging. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2023;117: 103211. DOI:10.1016/j.jag.2023.103211.
3. Li F, Wan Q, Wen F, et al. Multi-Satellite Imaging Task Planning for Large Regional Coverage: A Heuristic Algorithm Based on Triple Grids Method. *Remote Sensing*. 2024;16: 194. DOI:10.3390/rs16010194.
4. Galuzin VA, Simonova EV. Planirovanie s'emki ploschadnykh ob'ektov nablyudeniya gruppirovkoi kosmicheskikh apparatov [Planning the Surveying of Area Observation Objects by a Group of Spacecrafts]. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2018;20(6-2): 344–351. (In Russian).
5. Darnopykh VV, Usovik IV. Avtomatizatsiya parametricheskogo analiza tselevogo funktsionirovaniya kosmicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Automation of Parametrical Analysis of Earth Observation Systems Target Functioning]. *Trudy MAI*. 2011;47: 10. (In Russian). Available from: <https://trudymai.ru/upload/iblock/d83/avtomatizatsiya-parametricheskogo-analiza-tselevogo-funktsionirovaniya-kosmicheskikh-sistem-distantsionnogo-zondirovaniya-zemli.pdf> (Accessed 25 August 2025).
6. Emelyanov AA, Malyshev VV, Smolyaninov YuA., et al. Formalizatsiya zadachi operativnogo planirovaniya tselevogo funktsionirovaniya raznotipnykh kosmicheskikh apparatov distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Formalization of the Problem of Operative Target Functioning of Diverse Spacecraft for Remote Earth Probing]. *Trudy MAI*. 2017;96: 11. (In Russian). Available from: <https://trudymai.ru/published.php?ID=85921> (Accessed 25 August 2025).
7. Obidenko VI. Opreделение metriceskikh parametrov territorii Rossiiskoi Federatsii sredstvami geoinformatsionnykh sistem [Definition of Metric Parameters of the Russian Federation Territory by Means of GIS]. *Vestnik SSUGT*. 2018;23(2): 18–33. (In Russian).
8. Mulchrone K, Choudhury K. Fitting an Ellipse to an Arbitrary Shape: Implications for Strain Analysis. *Journal of Structural Geology*. 2004;26(1): 143–153. DOI:10.1016/S0191-8141(03)00093-2.
9. Yu F, Chou A, Ko K. On the Complexity of Finding Circumscribed Rectangles and Squares for a Two-Dimensional Domain. *Journal of Complexity*. 2006;22(6): 803–817. DOI:10.1016/j.jco.2006.05.005.
10. Tyukachev NA. Algoritm postroeniya overlaya mnogougol'nikov i mnogogrannikov [Algorithm of Construction Overlay of Polygons and Polyhedrons]. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2009;5(5): 51–63. (In Russian).

**AUTHOR Vladimir V. Zaytsev**

A.F. Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia  
 Department of Optical-Electronic Control Means, Faculty of Data Collection and Processing  
 PhD in Engineering

Submitted: September 08, 2025. Accepted: December 19, 2025. Published: December 26, 2025.