



Двадцать четвертая международная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»

Обоснование выбора способа описания земной
поверхности для моделирования режимов работы
РСА космического базирования

дтн, А.Н. Григорьев, ктн В.В. Зайцев, К.С. Кудинов

Цели и задачи

Цель

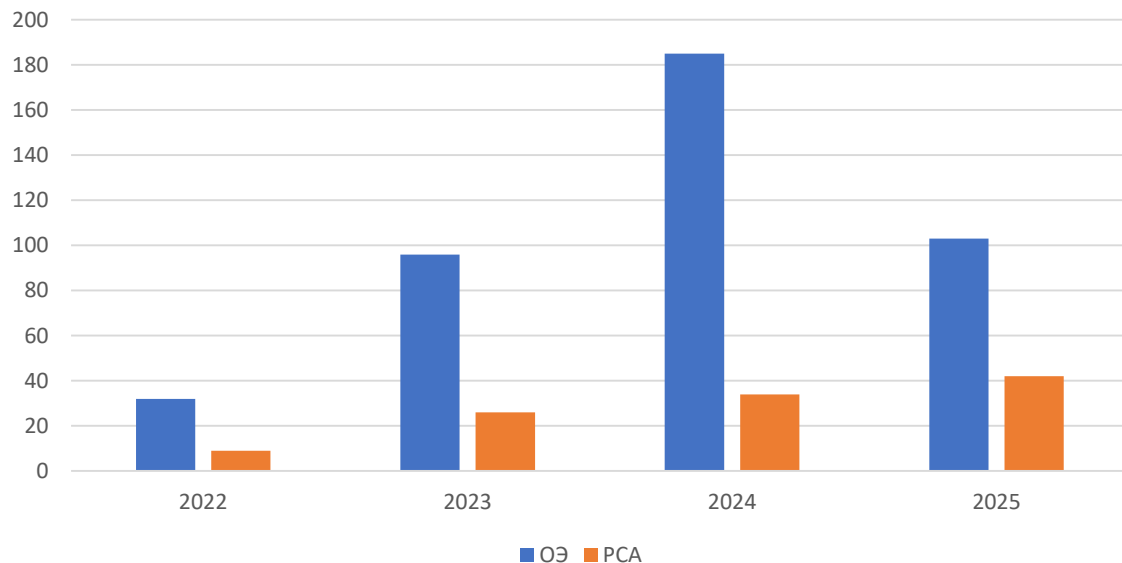
Выбрать и обосновать модель земной поверхности, обеспечивающую требуемую точность моделирования режимов РСА космического базирования при приемлемых вычислительных затратах.

Задачи

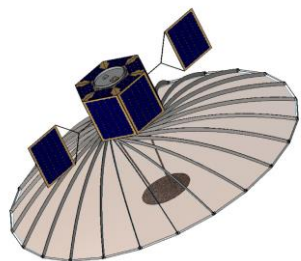
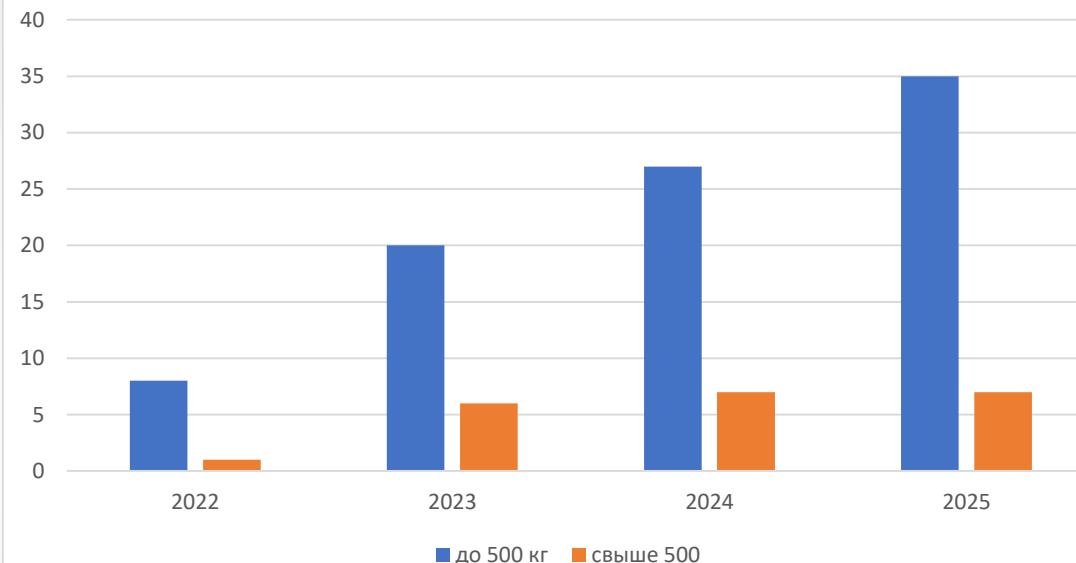
- Детально проанализировать аналитические модели формы Земли;
- Выполнить количественное сравнение всех моделей
- Дать рекомендации по выбору модели для различных режимов.

Анализ запусков КА ДЗЗ

Запуск КА ДЗЗ по типам в 2022-2025 годах



Динамика запуска КРСА по годам



UMBRA



TerraSAR-X



ICEYE

Категории задач решаемых КА РСА по разрешению

Задачи требующие высокого разрешения $\leq 1-5$ м

Контроль деформаций и смещений

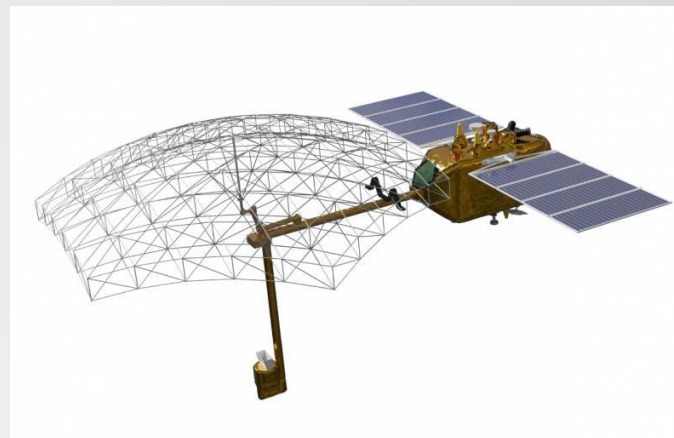
Просадки грунта, подвижки склонов, деформации зданий и сооружений: интерферометрия на данных 1–3 м даёт точность до сантиметров.

Картографирование в крупных масштабах (1:2 000–1:10 000)

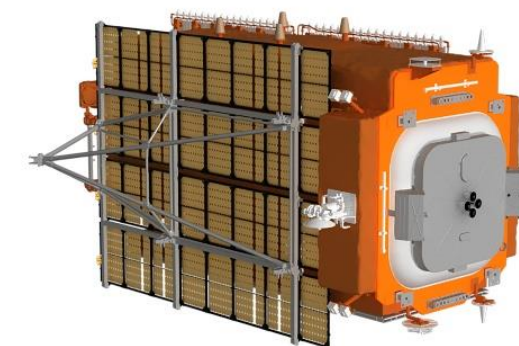
Детальные планы городов, промышленных зон, транспортных узлов, где нужно различать отдельные строения, малые объекты, малые водоёмы.

Мониторинг инфраструктуры

Трубопроводы, ЛЭП, дороги, мосты: разрешение 1–5 м позволяет выявлять повреждения, подмывы опор, оползни рядом с трассами.



Кондор - ФКА



Обзор-Р

Категории задач решаемых КА РСА по разрешению

Задачи требующие среднего разрешения $\leq 6-50$ м

Оценка зон затопления и паводков

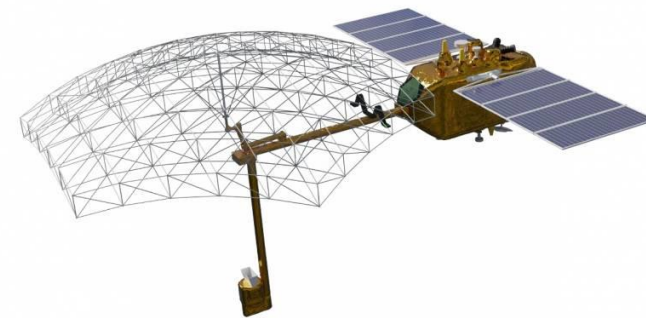
Границы подтопления, динамика разлива рек: при 10–20 м надёжно очерчиваются контуры зон, даже если детализация отдельных строений не требуется.

Контроль сельскохозяйственных и лесных угодий

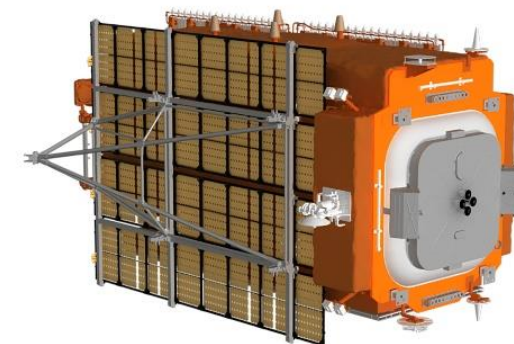
Оценка состояния посевов, выявление вырубок, гарей, крупных нарушений землепользования: при 10–30 м уверенно различаются крупные поля, массивы леса, большие вырубки.

Геологическое и тематическое картографирование

Выделение крупных геологических структур, крупных форм рельефа: при 10–30 м хорошо видны протяжённые разломы, крупные складки, террасы.



Кондор - ФКА



Обзор-Р

Категории задач решаемых КА РСА по разрешению

Задачи требующие низкого разрешения $\geq 200-1000$ м

Обнаружение крупных зон паводков и наводнений

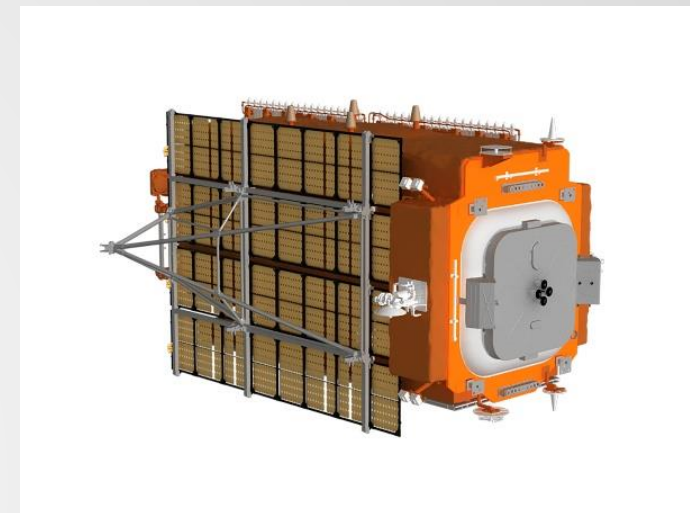
Оценка масштабов затопления на уровне бассейнов рек, крупных территорий: при 500–1000 м надёжно фиксируются большие зоны подтопления, даже без детализации отдельных объектов

Оперативный метеомониторинг и оценка состояния поверхности океана

Крупные зоны волнения, фронтальные разделы, крупные вихри и аномалии: при 500–1000 м хорошо видны крупномасштабные процессы, влияющие на погоду и судоходство.

Оценка крупных экологических явлений

Обширные нефтяные плёнки, крупные зоны загрязнения, большие зоны пожаров: при 500–1000 м уверенно обнаруживаются крупные пятна и зоны, даже если детализация границ не требуется.

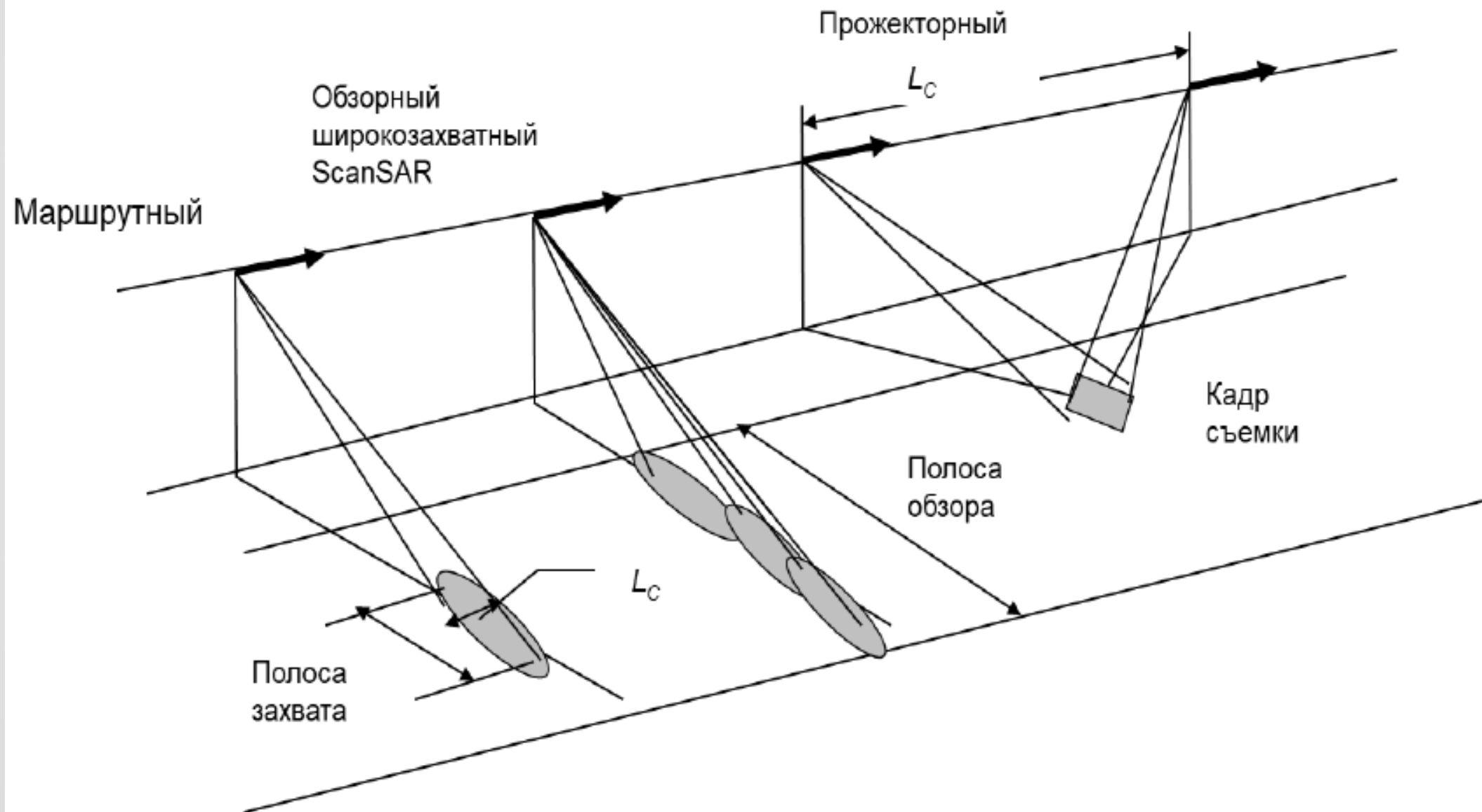


Обзор - Р



Метеор - М

Режимы работы РСА



Параметры РСА, зависящие от модели земной поверхности

Наклонная дальность $R(t)$:

Основа для расчета времени задержки принятого сигнала

$$R(t) = |r_c(t) - r_T|$$

Центральная доплеровская частота $f_d(t)$:

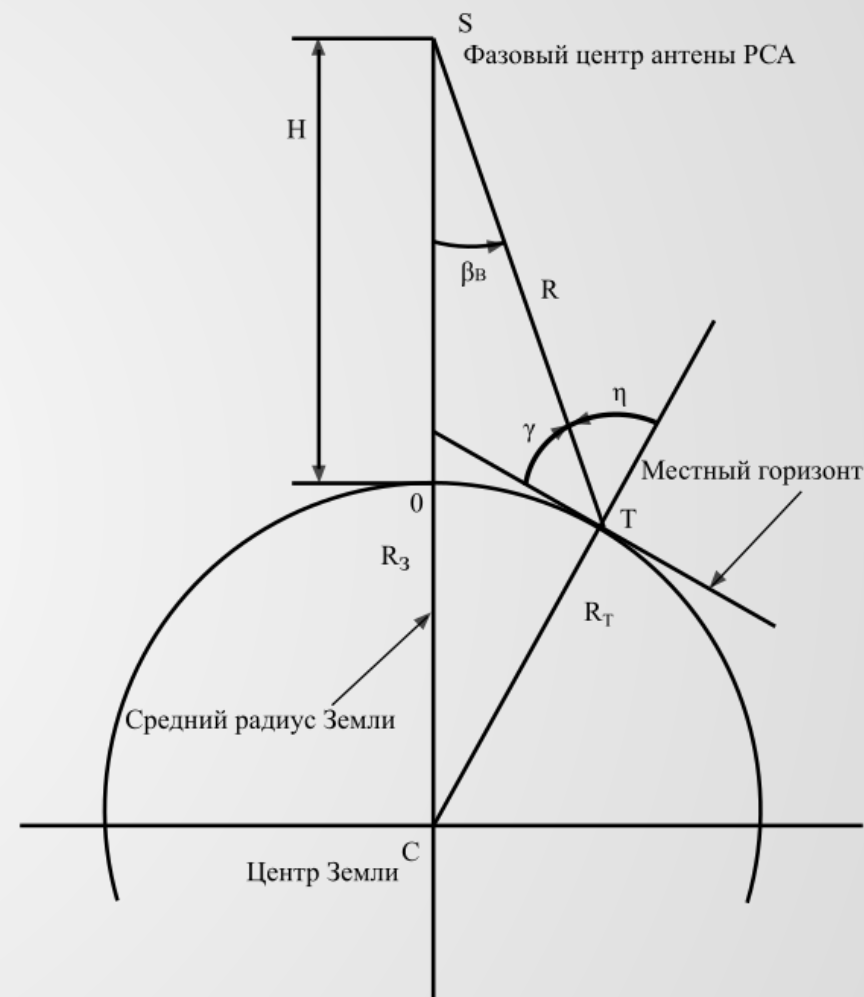
Зависит от относительной скорости КА и цели

$$f_d(t) = \frac{2}{\lambda R(t)} [r_c(t) - r_T] \cdot [V_c(t) - V_T]$$

Локальный угол падения γ :

Для радиометрической коррекции

$$\cos \gamma = \frac{(r_c - r_T) \cdot n}{|r_c - r_T|}$$



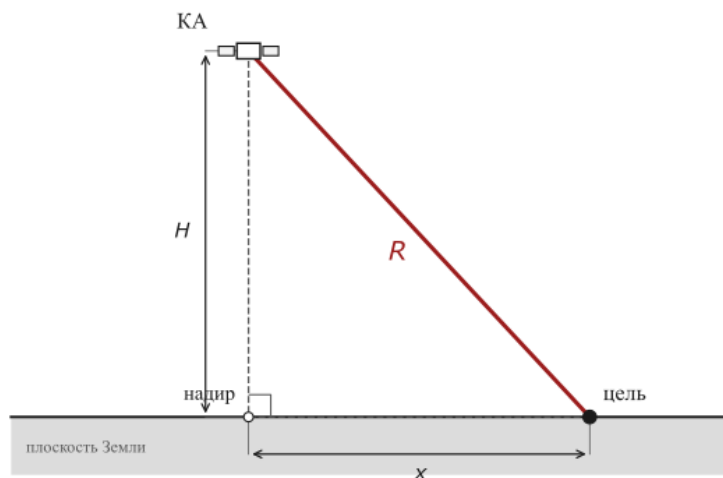
Критерии выбора модели земной поверхности

Для выбора модели земной поверхности в космическом РСА ключевым является две группы параметров, которые определяют насколько детально нужно описывать геометрию планеты:

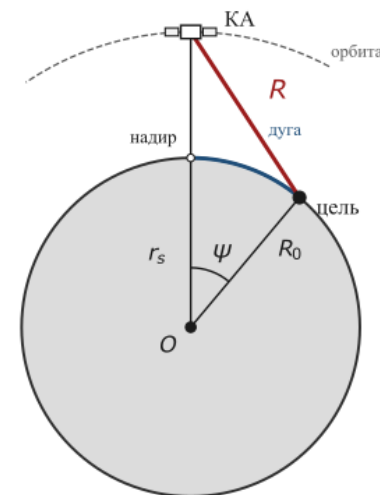
- **Режим работы РСА** – определяет геометрию съемки и требуемое разрешение;
- **Тип конечной обработки** — первичная (фокусировка) или вторичная (геопривязка , интерферометрия).

Эти параметры определяют, какая из моделей обеспечит необходимую точность при приемлемых вычислительных затратах, рассмотрим их подробнее.

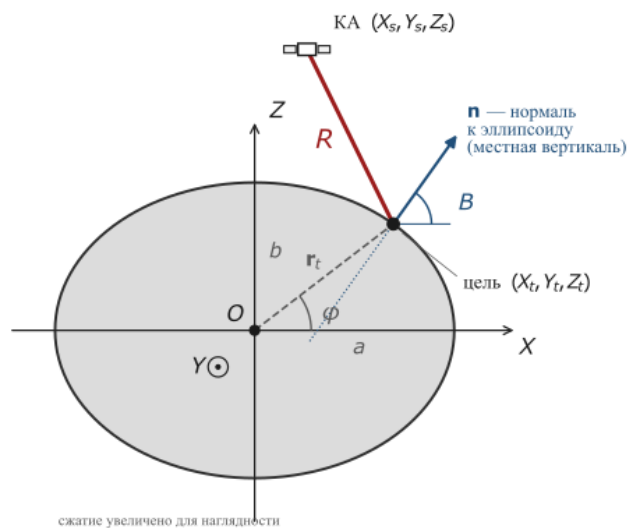
Рассматриваемые аналитические модели земной поверхности



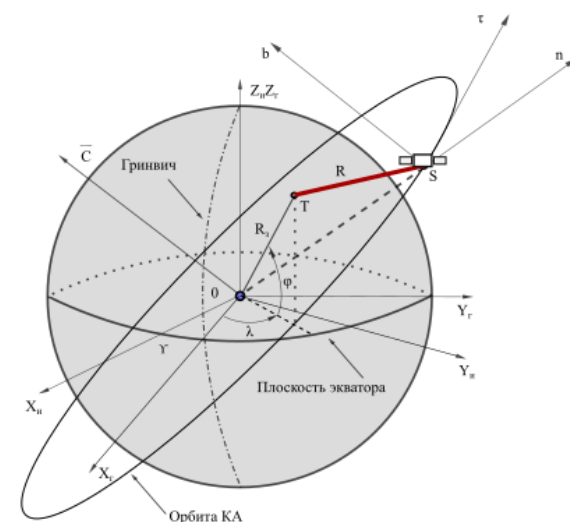
(а) Плоскость



(б) Сфера



(в) Эллипсоид вращения



(г) Эллипсоид вращения с учетом динамики геометрии РЛ съемки

Модель «Земля – плоскость»

Допущения:

Земля – локальная плоскость в полосе обзора, отсутствует кривизна и вращение.

Наклонная дальность:

$$R = \sqrt{(x_s - x_t)^2 + (y_s - y_t)^2 + (z_s - z_t)^2}$$

(в локальной декартовой системе).

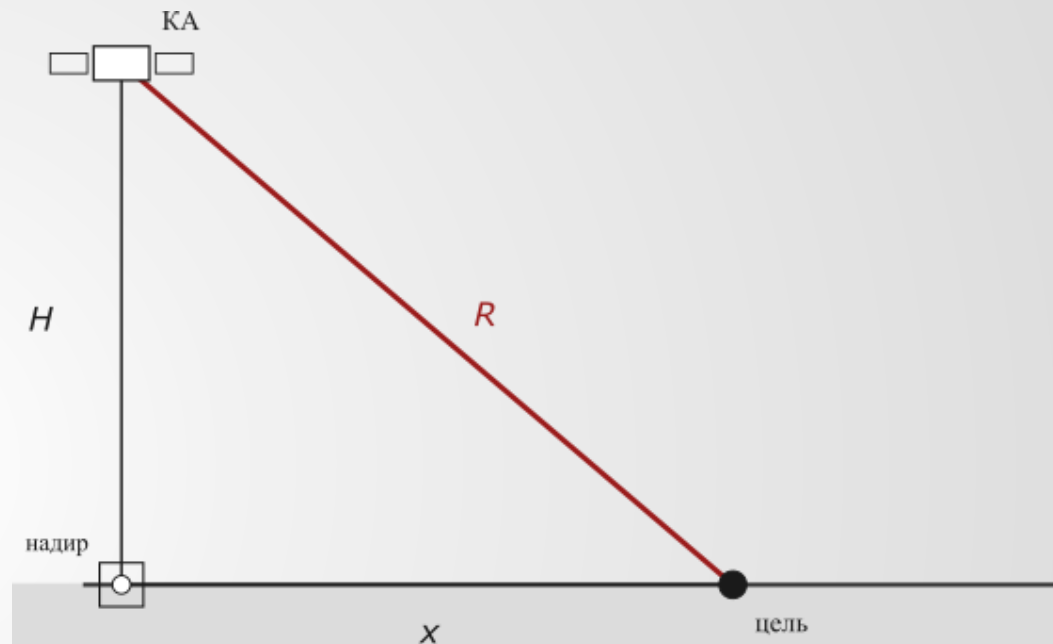
Ошибки:

Ошибка из-за отсутствия учета кривизны Земли

Применимость:

Только для предварительных и учебных расчетов, сцены не более 10–20 км.

Не учитывает миграцию дальности и доплеровский центроид на больших интервалах.



Модель «Земля – плоскость»

Статья	Применение
Rodriguez E., Martin J.M. Theory and design of interferometric synthetic aperture radars. IEE Proceedings F – Radar and Signal Processing, 1992 .	Аналитическое решение геолокации
Van Zyl J.J., Shi J. Radiometric correction and calibration of SAR images. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1993 .	Радиометрическая калибровка PCA
Li Y., Zhu D., Zhu Z. Geometric distortion correction in the subaperture processing for high squint airborne SAR imaging. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004 .	Расчёт координат при высоком угле скоса
Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Москва: Радиотехника, 2005 .	Базовая геометрия для синтеза апертуры, используемая в классических учебных пособиях
Xu B., Li Z., Zhu Y., Shi J., Feng G. SAR Interferometric Baseline Refinement Based on Flat-Earth Phase without a Ground Control Point. Remote Sensing, 2020 .	Уточнение интерферометрической базы

Модель «Земля – сфера»

Допущения:

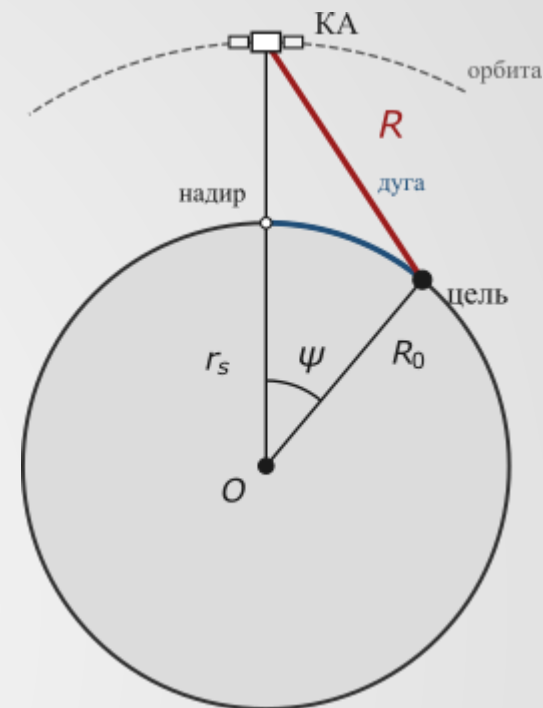
Земля – идеальная сфера радиусом $R_{\oplus} = 6371$ км (средний).

Преимущество:

Учитывает кривизну, дальность вычисляется по сферической геометрии:

$$R = \sqrt{r_s^2 + r_t^2 - 2r_s r_t \cos \psi},$$

где ψ – центральный угол.



Ошибки:

Не учитывает полярное сжатие (разница между экваториальным и полярным радиусами ~21 км). - На средних широтах ошибка по высоте до ~10–15 км из-за сжатия.

Применимость:

Для грубых оценок покрытия, анализа видимости, предварительных расчётов и непригодна для высокоточного позиционирования и интерферометрии.

Модель «Земля – сфера»

Статья	Применение
Wang Y., Peng H. 3D reconstruction of targets in interferometric SAR // Journal of Electronics & Information Technology. — 2003 .	3D-реконструкция целей в InSAR
Сосновский А.В. Интерферометрическая обработка данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой при создании цифровых моделей рельефа земной поверхности: состояние и проблемы // Ural Radio Engineering Journal. — 2020 .	Используется для этапа развёртки фазы и пересчёта наклонной дальности в географические координаты
Guo S., Deng Q., Wang J. Analysis of the spherical earth surface effect in spaceborne high-orbit synthetic aperture radar imaging // Chinese Journal of Aeronautics. — 2025 .	Влияние кривизны на изображение в высокоорбитальных PCA
Mao X., Tao M., Fan J. Extended Spherical Geometry Algorithm for Spaceborne SAR Processing in Stripmap and TOPS Imaging Modes // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2025 .	Обработка Stripmap и TOPS

Модель «Земля - эллипсоид вращения»

Параметры:

Земля – эллипсоид вращения с значениями: $a = 6378137$ м, $f = 1/298.257223563$, $e^2 = 2f - f^2$.

Преимущество:

- Является **глобальным стандартом** для навигации и геодезии.
- Позволяет вычислять координаты цели (B, L, H) и КА в единой системе.
- Переход к геоцентрическим координатам осуществляется по формулам:

$$X = (N + H)\cos B \cos L, \quad Y = (N + H)\cos B \sin L, \quad Z = [N(1 - e^2) + H]\sin B$$

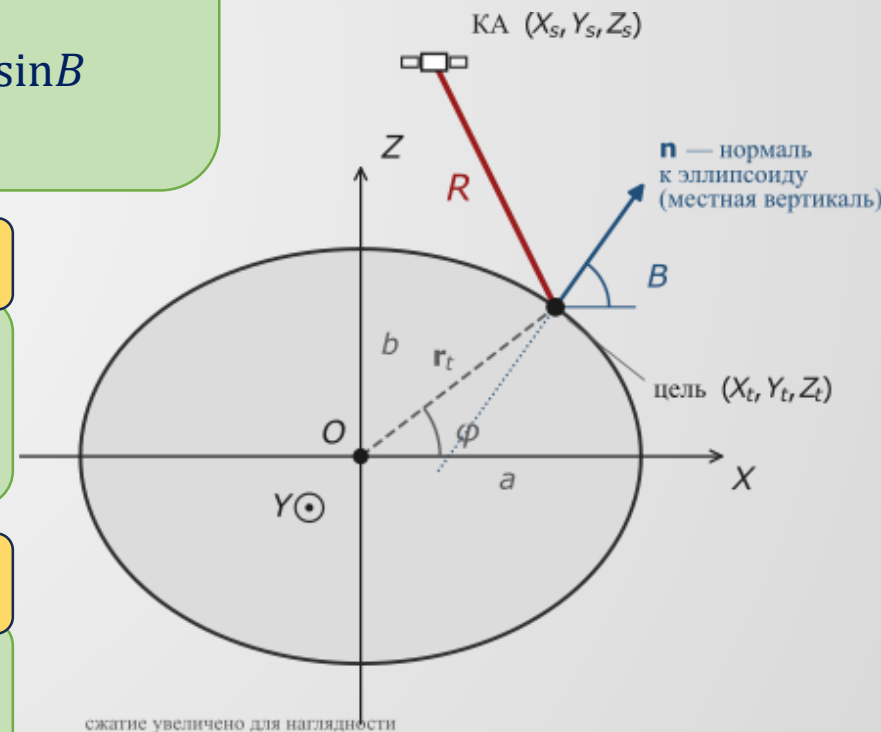
где $N = a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}$.

Точность:

Для равнинной местности даёт ошибку по высоте до ± 50 м (без учёта рельефа), что достаточно для многих прикладных задач (амплитудные РЛИ, грубая геопривязка).

Применимость:

Базовая модель для всех точных расчётов (орбита КА, покрытие, доплеровский эффект).



Модель «Земля - эллипсоид вращения»

Статья	Применение
Burgett S. Target Location in WGS-84 Coordinates Using Synthetic Aperture Radar Images // Proceedings of the 49th Annual Meeting of The Institute of Navigation. – 1993 .	Высокоточное определение координат (< 5 м)
lv Y., Zhong L., Qiu X., Yuan X., Yang J., Hu Y., Ding C. Improving the Image Quality of Moving Ships for GF-3NG Based on Simultaneous AIS Information // Remote Sensing. – 2021 .	Совместная обработка с AIS
Peng Z., Guo Y., Zhu H. Geolocation of a Known Altitude Target Using Azimuth Measurements Based on the Ellipsoidal Expansion in Normal Direction of WGS-84 Model // Proceedings of the 35th Chinese Control and Decision Conference (CCDC 2023). – 2023 .	Геолокация по азимутальным измерениям
Савченко Б.С. Методика уточнения параметров строгой модели PCA по данным, полученным в результате автоматического поиска ключевых точек на оптическом и радиолокационном изображении // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2025 .	Использование уравнений дальности, доплеровской частоты и модели земного эллипсоида для точного определения координат.
Lee S., Kim D. и др. A New 3-D Positioning Method Using Zero-Doppler Image Matching for High-Squint Small SAR Satellite // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2026 .	3D-позиционирование для малых PCA с высоким углом скоса

Содержание модели «Земля – эллипсоид вращения с учетом динамики геометрии радиолокационной съемки»

Основа:

Эллипсоид вращения, но добавляются:

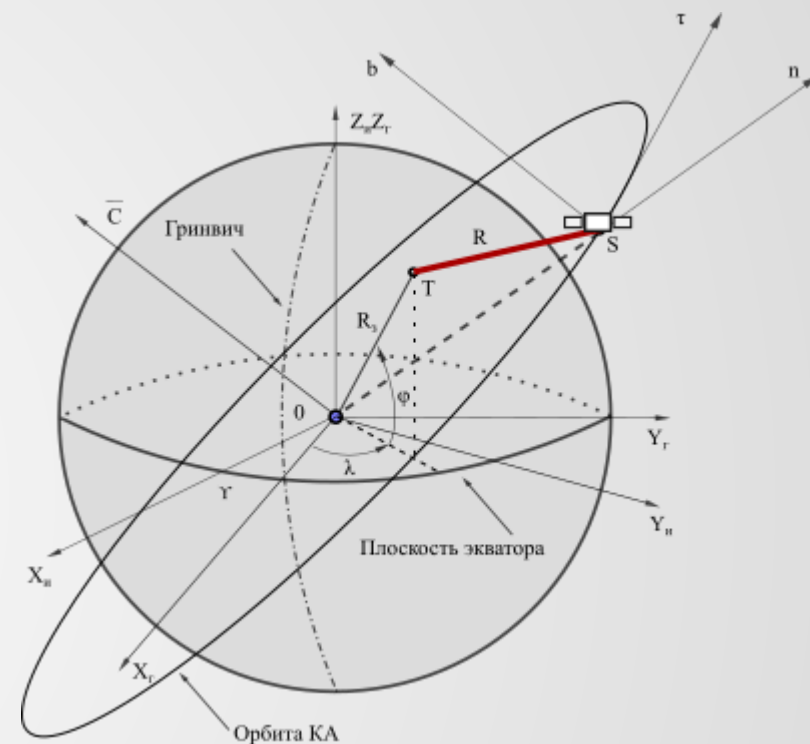
- уравнение наклонной дальности;
- уравнение доплеровской частоты;
- координатные преобразования (геодезическая СК → геоцентрическая СК → инерциальная СК → орбитальная СК).

Математическая суть:

Система трёх уравнений (эллипсоид, наклонная дальность, уравнение Доплера), решаемая совместно для определения положения КА и цели.

Позволяет решать:

- **прямую задачу** – вычислять параметры сигнала для заданной цели;
- **обратную задачу** – определять требуемую ориентацию антенны для получения нужной задержки и частоты.



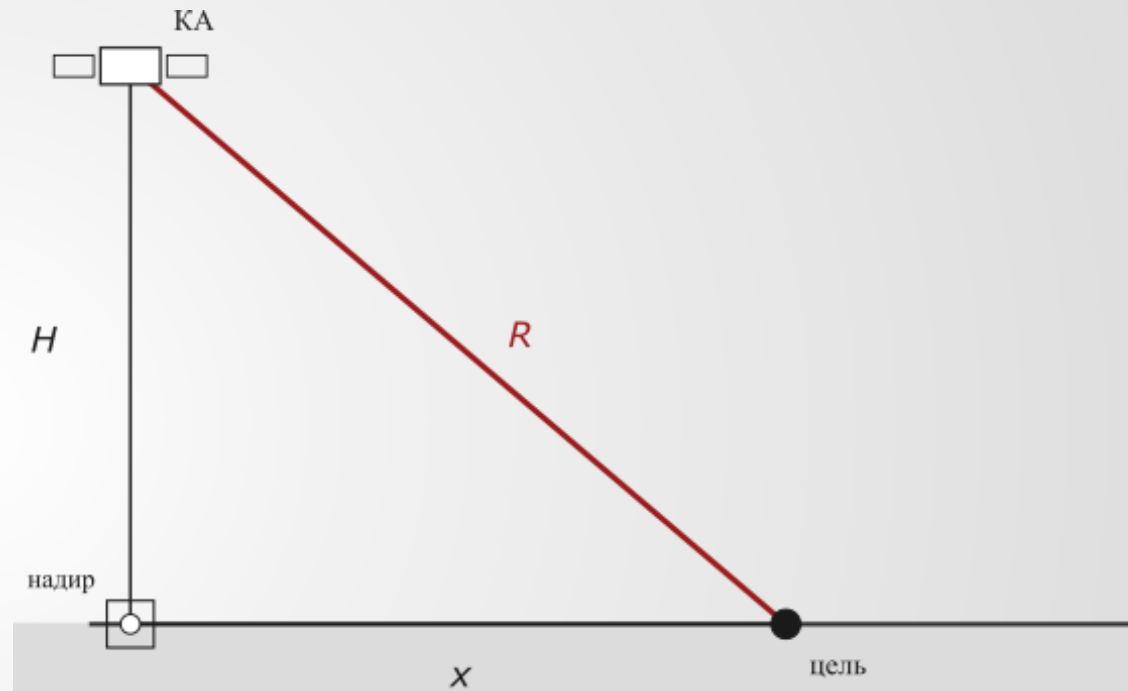
Ошибка определения наклонной дальности при разных допущениях в описании формы Земли

«Земля - плоскость»

$$\delta_R \approx \frac{L^2}{8R_{\oplus}}$$

«Земля - сфера»

$$\delta_R^{сф} \approx \frac{L^2 \Delta R_{кр}}{8R_{\oplus}^2}$$



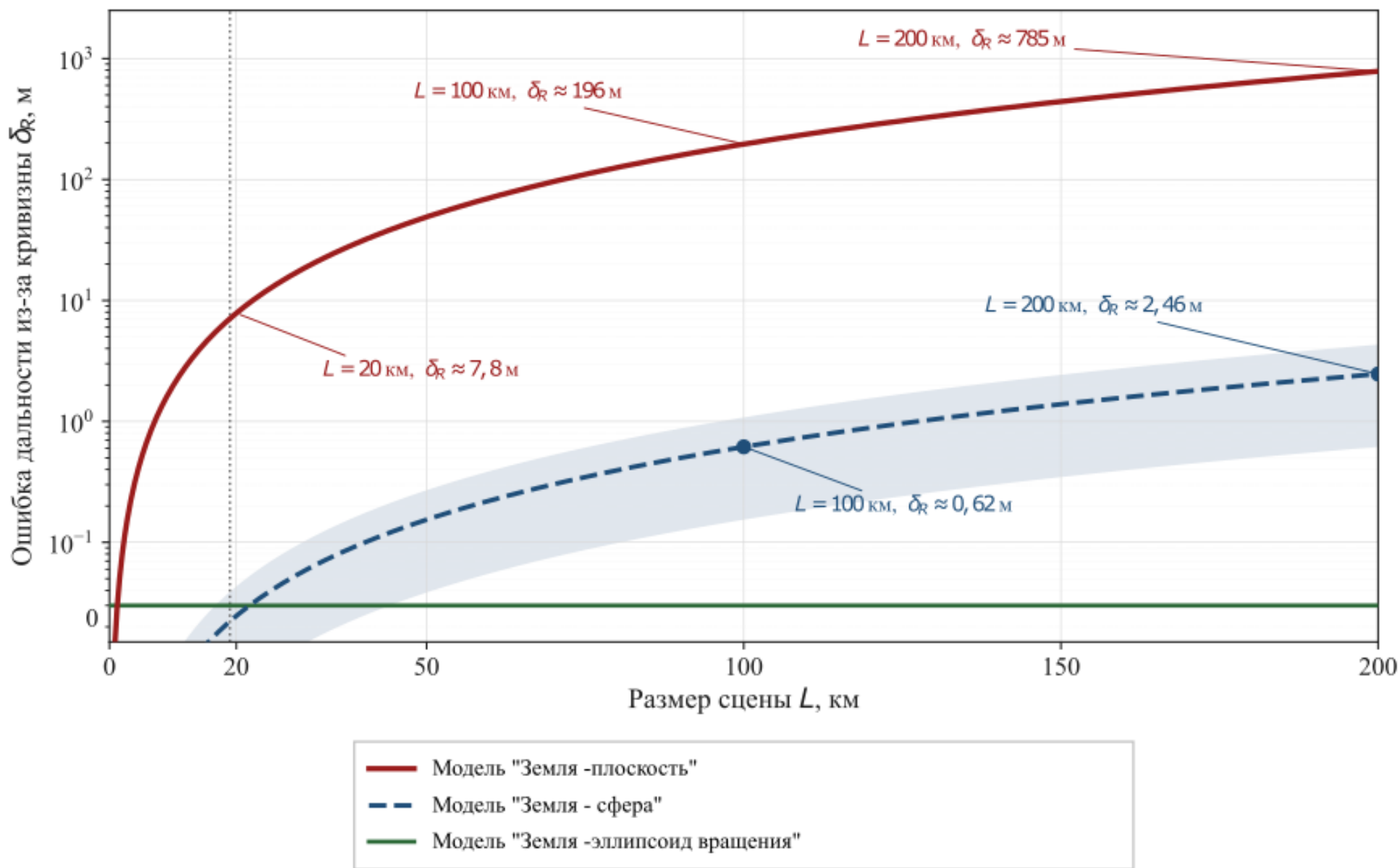
L размер снимаемого участка,
 $R_{\oplus}=6371$ км средний радиус Земли,
 ΔR – разброс локального радиуса (5000 - 35 000 м).

Ошибка определения наклонной дальности при разных допущениях в описании формы Земли

Модель	δ_R при $L = 20$ км	δ_R при $L = 100$ км	δ_R при $L = 200$ км
Земля -плоскость	7,85 м	196 м	785 м
Земля - сфера	0,0246 м	0,62 м	2,46 м
Земля-эллипсоид вращения	≈ 0 м	≈ 0 м	≈ 0 м
Земля – эллипсоид вращения вращения с учетом динамики геометрии радиолокационной съемки	≈ 0 м	≈ 0 м	≈ 0 м

Примечание: расчет произведен без учета рельефа земной поверхности,
для сферы расчёт произведен с значением средней кривой $\Delta R = 20\,000$ м

Ошибка определения наклонной дальности при разных допущениях в описании формы Земли



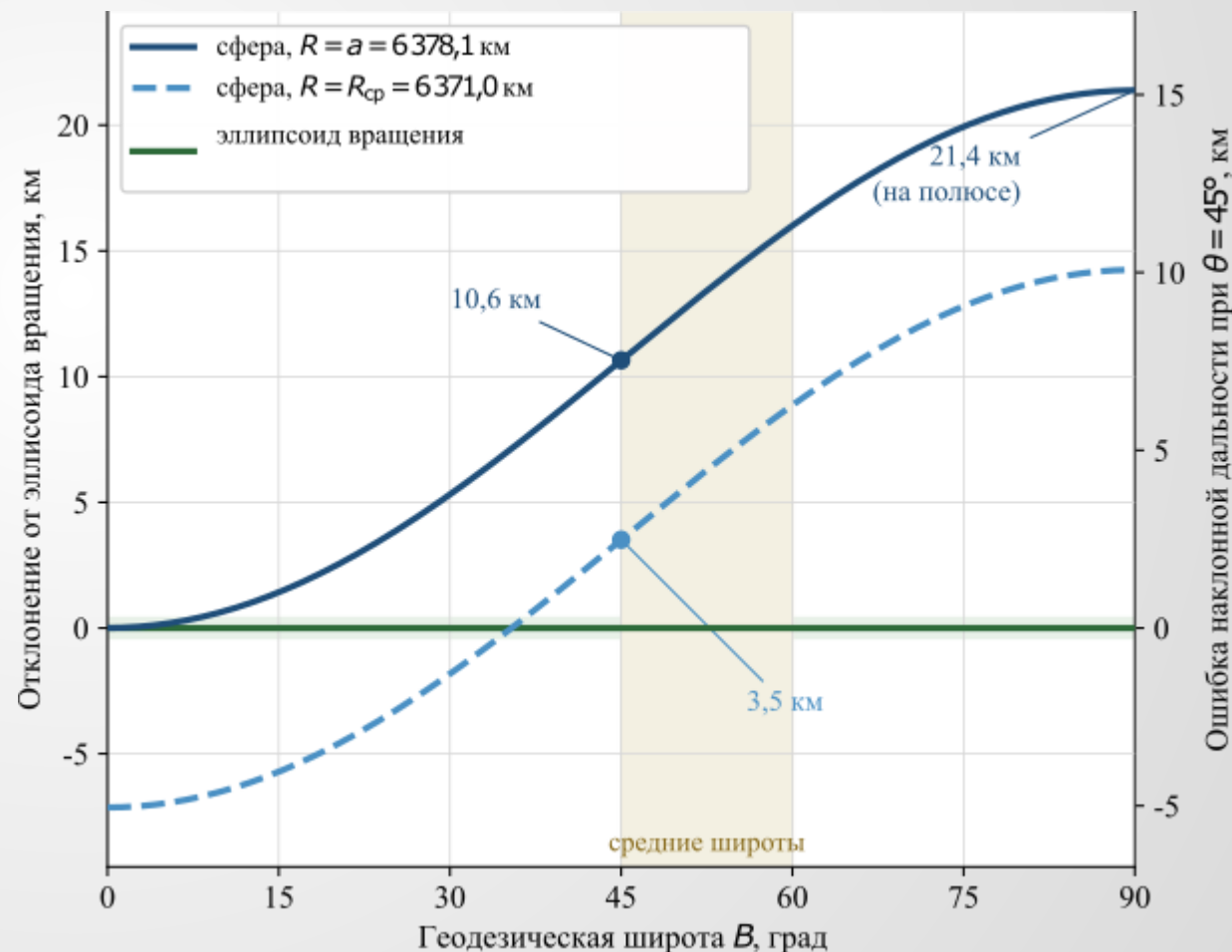
Расхождение поверхности сферы и эллипсоида

Расхождение каждой из двух сферических аппроксимаций с эллипсоидом вращения в зависимости от широты

Сфера радиуса $R=a=6378,1$ км
 $\Delta_1(B) = a - r_{\text{ell}}(B)$

Сфера радиуса $R=6371,0$ км
 $\Delta_2(B) = R_{\text{cp}} - r_{\text{ell}}(B)$

$r_{\text{ell}}(B)$ расстояние от центра Земли до точки на поверхности эллипсоида



Локальная кривизна эллипсоида $M(B)$, $N(B)$ и средний радиус сферы

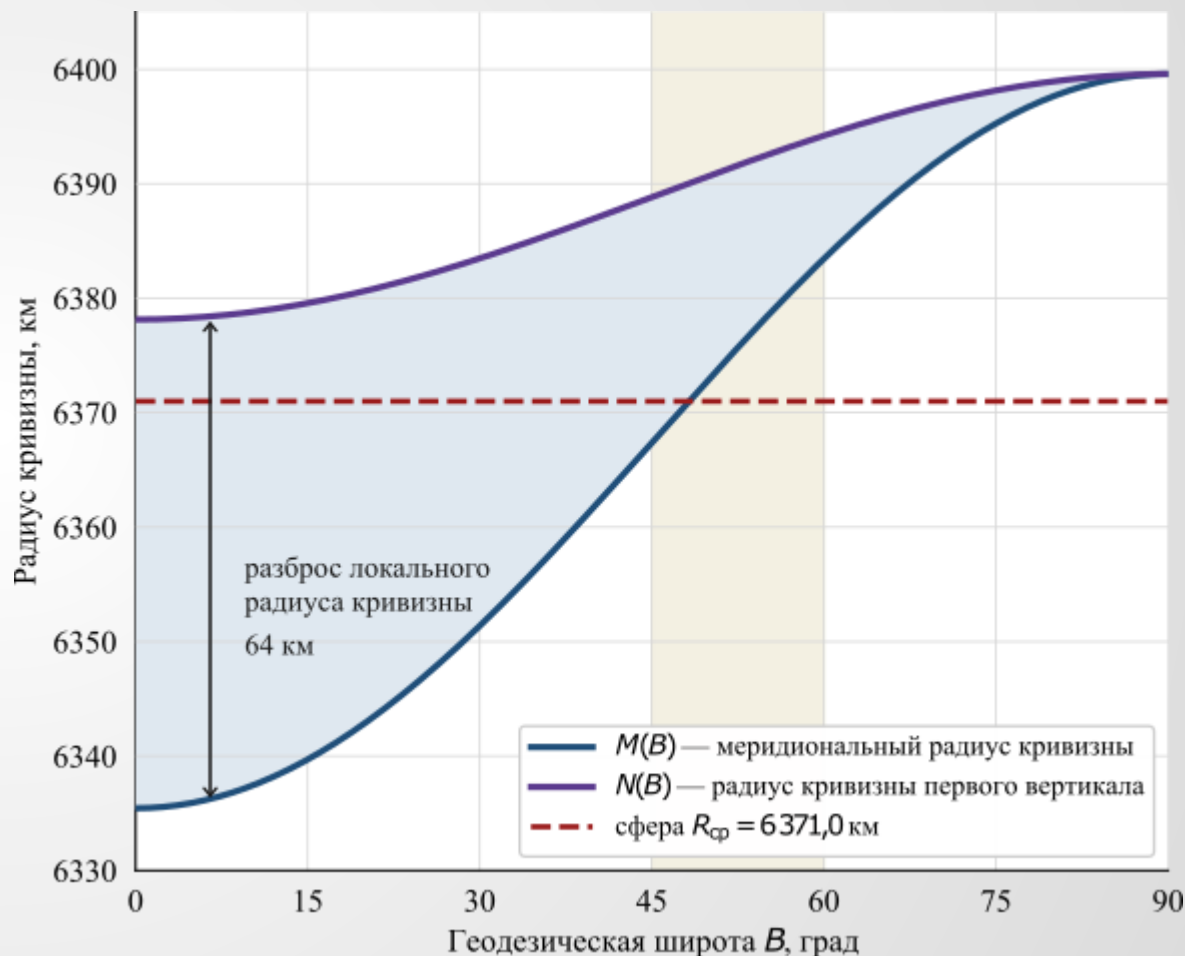
Меридиональный радиус

$$M(B) = \frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 B)^{3/2}}$$

Радиус кривизны первого вертикала

$$N(B) = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}$$

Одна и та же сцена на одной и той же широте будет иметь разную ошибку кривизны в зависимости от направления съемки, он уменьшается от экватора к полюсам



Влияние ошибки определения наклонной дальности на фазу

Фаза принятого сигнала жестко связана с наклонной дальностью

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi\Delta R}{\lambda}$$

Примеры расчета для РСА S-диапазона:

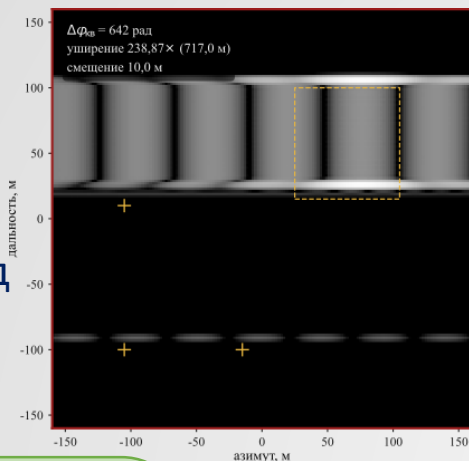
Ошибка высоты Δh	Ошибка дальности ΔR	Фазовая ошибка $\Delta\varphi$
50 м (ошибка эллипсоида без геоида)	≈ 35 м	= 702.8 периодов
10 м (типичная ошибка ЦМР среднего разрешения)	≈ 7 м	= 140 периодов
1 м (высокоточная ЦМР)	≈ 0.7 м	= 14 периодов
1 см (геодезическая точность)	≈ 0.7 см	≈ 0.14 периода

Ошибка по дальности приводит к расфокусировке по дальности и геометрическим искажениям

Влияние модели на качество синтезируемого РЛ изображения

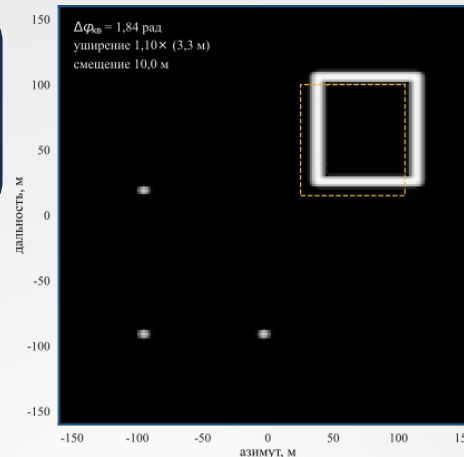
Модель
«Земля-
плоскость»

$$\Delta\varphi_{KB} = 642 \text{ рад}$$



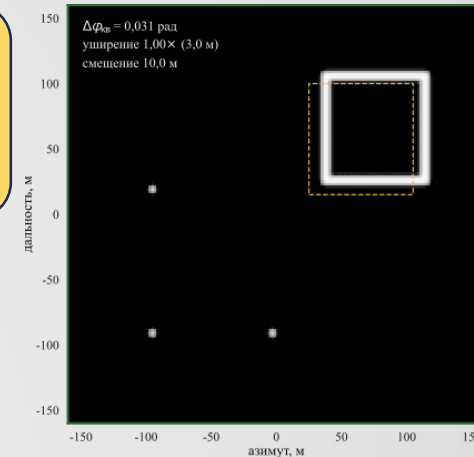
Модель
«Земля-
сфера»

$$\Delta\varphi_{KB} = 1.8 \text{ рад}$$



Модель
«Земля-
эллипсоид
вращения»

$$\Delta\varphi_{KB} = 0.031 \text{ рад}$$



Фрагмент РЛ
изображения
320x320м,
Желтым истинное
положение
объектов

Сфера экваториального радиуса
ошибка наведения 0,7–1,0°

Наведение на
объект в
зависимости от
выбранной
модели земной
поверхности



цель вне главного лепестка

Эллипсоид вращения с учетом динамики геометрии
РЛ съемки
ошибка 0,003°; прогноз T_c , F_p , миграции



луч на цели

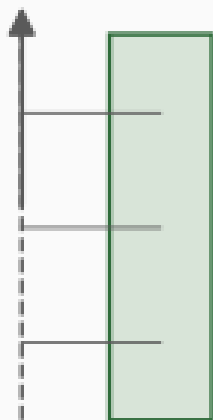
Сравнение моделей земной поверхности

Критерий сравнения	Плоскость	Сфера	Эллипсоид вращения	Эллипсоид вращения с учетом динамики геометрии РЛ съёмки
Кривизна Земли	не учтена	учтена	учтена	учтена
Полярное сжатие	не учтено	не учтено	учтено	учтено
Баллистика КА и вращение Земли	не учтены	частично	частично	учтены строго
Ошибка геопривязки сцена $L = 100$ км	около 200 м	8 м ... 10 км	0 м	0 м
Вычислительные затраты	1 усл. ед.	2 усл. ед.	6 усл. ед.	20 усл. ед.
Необходимые исходные данные	высота орбиты	локальный радиус кривизны	параметры эллипсоида вращения, эфемериды	параметры эллипсоида вращения, эфемериды

Разработанная методика выбора модели



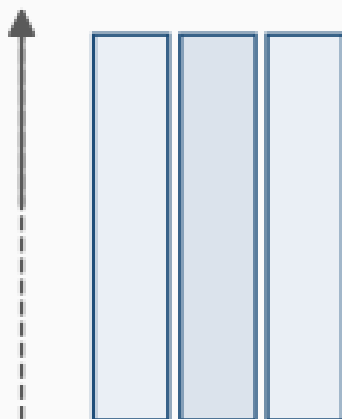
Учёт режимов работы РСА – рекомендации по моделям



Маршрутный

Эллипсоид вращения

полоса 30...100 км, разрешение 3...10 м
непрерывная съёмка вдоль трассы

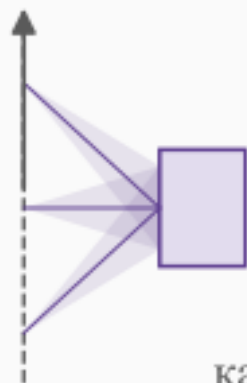


Обзорный

сфера и
эллипсоид вращения

полоса 200...500 км, разрешение 20...100 м
переключение луча между подполосами
сфера — фокусировка, эллипсоид - геопривязка

Учёт режимов работы РСА – рекомендации по моделям



Прожекторный,
в том числе пристальный
прожекторный

кадр 4...10 км, разрешение 0,25...1 м
удержание луча на участке

Модель "Земля-эллипсоид
вращения с учетом
динамики геометрии
РЛ съемки"

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для большинства задач решаемых работы с РСА космического базирования достаточно эллипсоида, однако при переходе к сложным режимам и когерентной обработке предпочтение следует отдавать модели эллипсоида вращения с учетом динамики геометрии радиолокационной съемки с необходимыми уточнениями по рельефу. Универсальной модели не существует – оптимальный выбор всегда является компромиссом между требуемой точностью, вычислительными затратами и доступностью исходных данных.

Спасибо за внимание