Институт космических исследований
Российской академии наук (ИКИ РАН)

XXIV МЕЖДУНАРОДНЫЕ ЕЖЕГОДНЫЕ КОНФЕРЕНЦИИ
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"

Алгоритм пространственного анализа данных воздушного лазерного сканирования для создания моделей прозрачности древесного полога

Алексеев Александр Борисович
Плотникова Александра Сергеевна
Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов им. А.С. Исаева РАН (ЦЭПЛ РАН)

9-13
ноября
2026

АКТУАЛЬНОСТЬ

Освещенность является ключевой характеристикой фитоклимата леса

Микроклимат: главный регулятор фотосинтеза, температурно-влажностного режима и почвенных процессов.

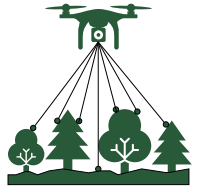
Биоразнообразие: формирование структуры подлеска и живого напочвенного покрова

В лесном хозяйстве: основа для назначения и проектирования рубок ухода.

Дефицит пространственных данных

В настоящее время отсутствуют методики оперативного получения высокодетальных пространственных данных об освещенности леса на локальном уровне.

Современные возможности воздушного лазерного сканирования (ВЛС) позволяют



Оперативно получать высокодетальные 3D-данные о пространственной структуре леса на больших площадях и труднодоступных территориях для мониторинга светового режима в течение вегетационного периода;

Переходить от точечных измерений к непрерывной пространственной оценке.

ПРОЗРАЧНОСТЬ ДРЕВЕСНОГО ПОЛОГА

Горизонтальная и вертикальная структура древостоя с учетом межкроновых и внутрикроновых просветов:

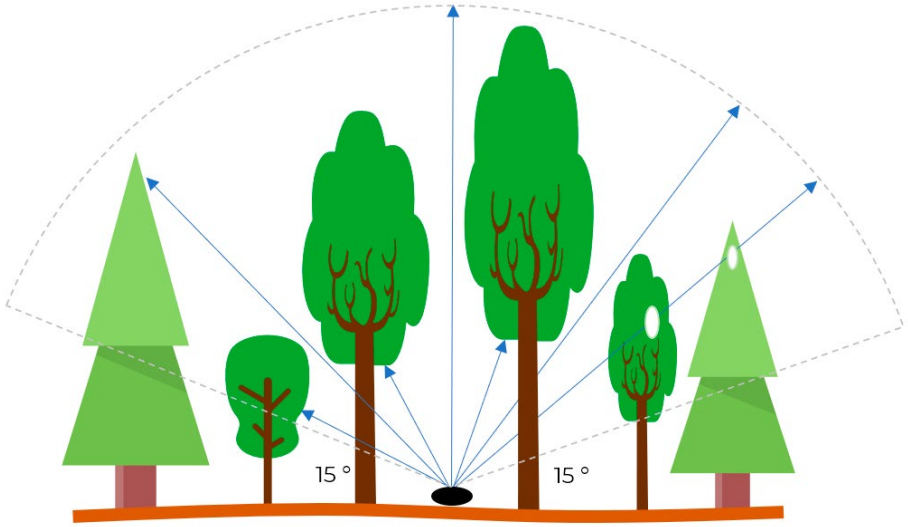
- **определяет освещенность (световой режим леса)**, т.е. поступление, пространственно-временное распределение и трансформацию (изменение) солнечной радиации в лесном биогеоценозе.

- может быть оценена с помощью обобщенного понятия – **прозрачность (сквозистость)** древесного полога.



Прозрачность древесного полога - доля просветов в пологе леса, через которые солнечная радиация беспрепятственно проникает сквозь кроны деревьев к нижним ярусам фитоценоза.

Количественно прозрачность выражается как часть площади полусферы над точкой наблюдения, не перекрытая элементами крон деревьев (листьями, ветвями, стволами), при взгляде из точки наблюдения вверх.



ПРОЗРАЧНОСТЬ ДРЕВЕСНОГО ПОЛОГА

Прямые измерения освещенности:

- **Люксметр** - позволяет определять количество светового потока в люксах (ЛК).
- **Квантометр** - измерение фотосинтетически активной радиации (ФАР).

Фиксируют лишь **мгновенное или кратковременное** состояние световой среды.
Они **критически зависят** от погодных условий, облачности, времени суток.

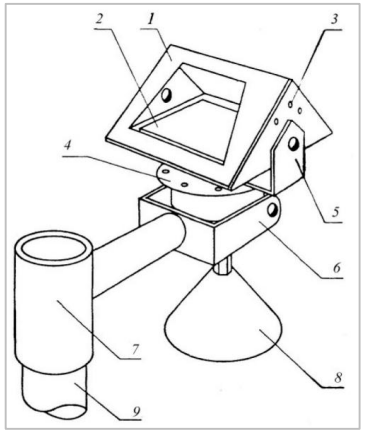
Косвенные оценки освещенности на основе параметров структуры древесного полога:

- **Сомкнутость.**
  Не учитывает внутрикроновые просветы. Сравнение светового режима по сомкнутости применимо только к древостоям одного породного состава.
- **Сквозистость и ажурность.** Измерения производятся:

Фотокамера «рыбий глаз»

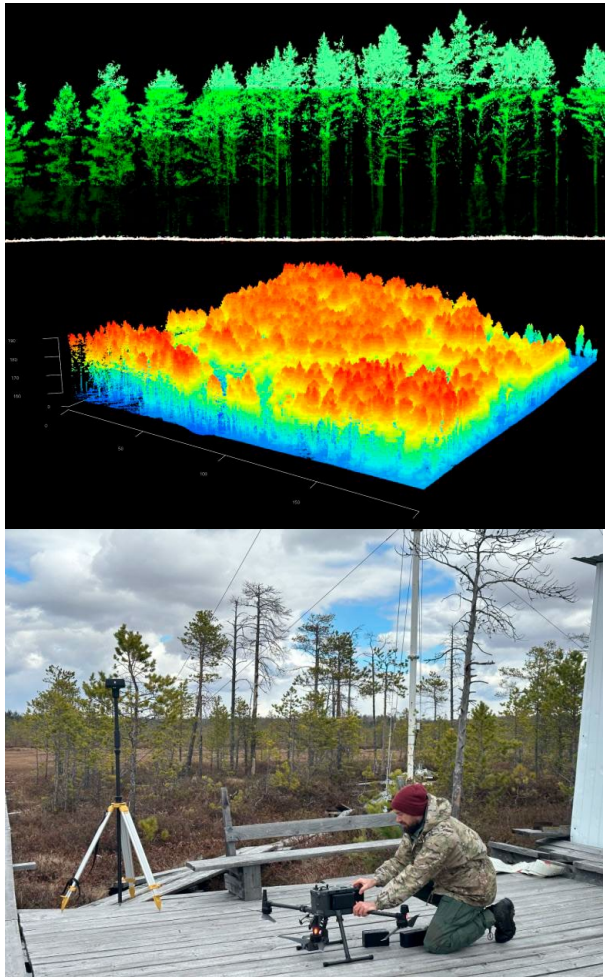


Сквозистометр



Позволяют получать единичные **точечные измерения** – применение на больших площадях является трудоемким.

ВОЗМОЖНОСТИ ВЛС

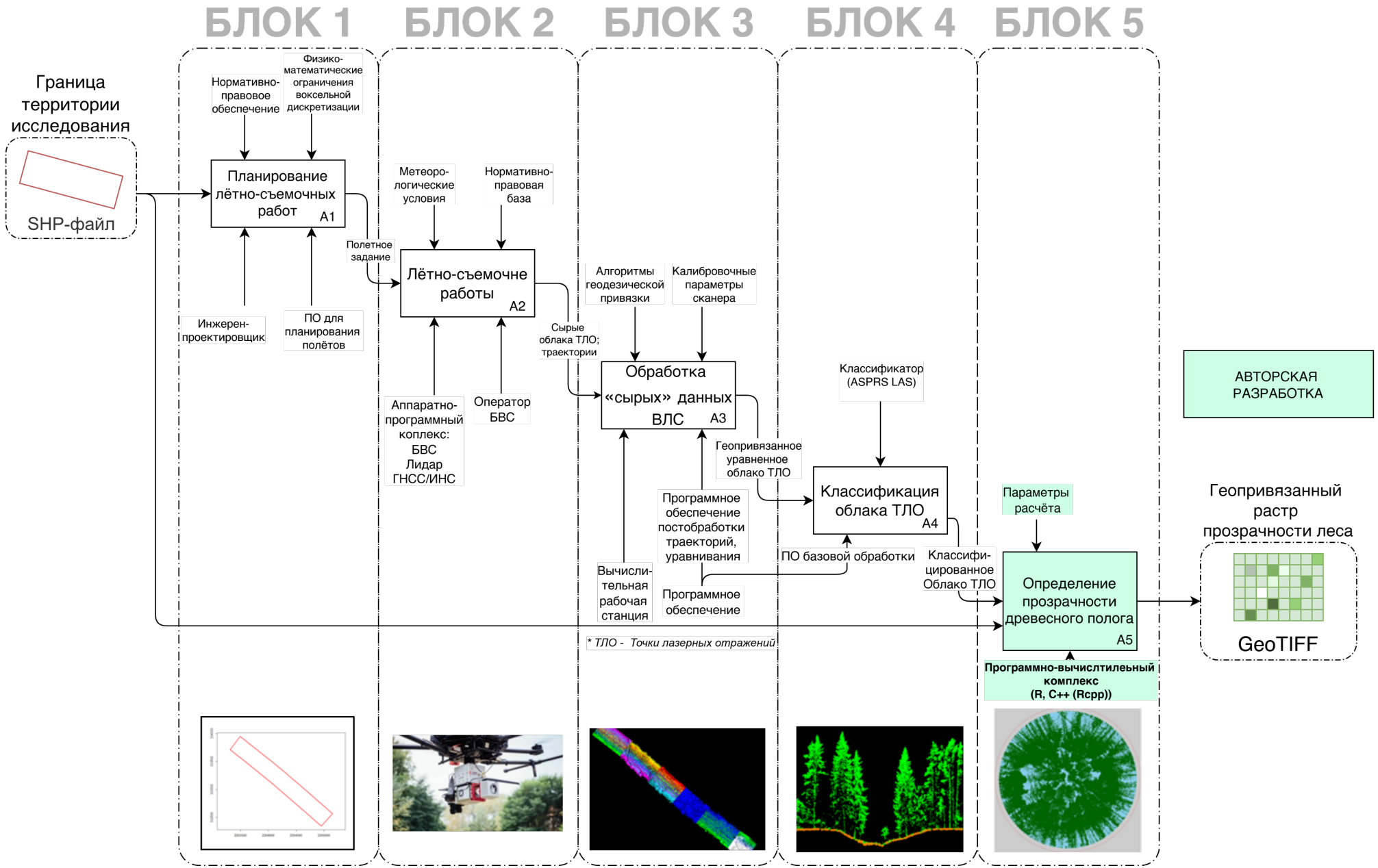


Определяемые таксационные показатели:

- **Высота деревьев.** Автоматизированное **выделение крон** (Сегментация отдельных деревьев - Individual Tree Detection, ITD) и определение высоты деревьев (H) являются наиболее методологически проработанными и успешно решаемыми задачами дистанционного зондирования лесов.
- **Диаметр на высоте груди** (Diameter at Breast Height, DBH).
- **Надземная биомасса** (Above-ground biomass, AGB).
- **Породный состав**

Современные возможности ВЛС позволяют получать **высокодетальные 3D-данные** о пространственной структуре леса. Данные ВЛС могут быть использованы при разработке методов пространственной оценки светового режима леса, с возможностью перехода от точечных измерений к **непрерывной пространственной оценке.**

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ВЛС



АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА

БЛОК 5 (А5)

Классифицированное облако ТЛО

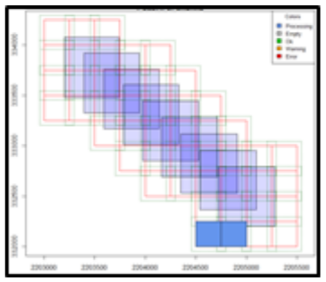
LAS

SHP

Граница территории исследования

ЭТАП 1

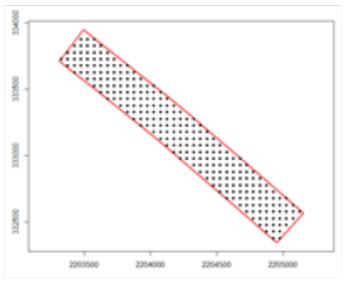
Предварительная подготовка, формирование виртуального пространства и тайлирование облака ТЛО
A51



ЭТАП 2

Формирование сетки локальных точек наблюдения
A52

Виртуальный LAScatalog с настройками разбиения

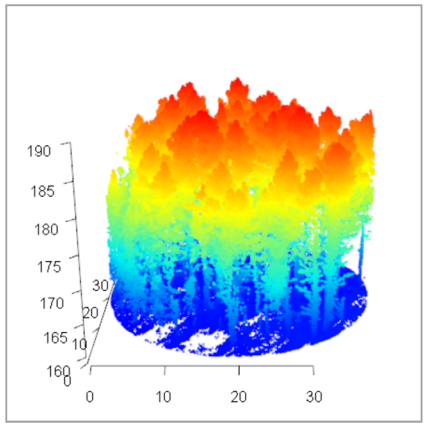


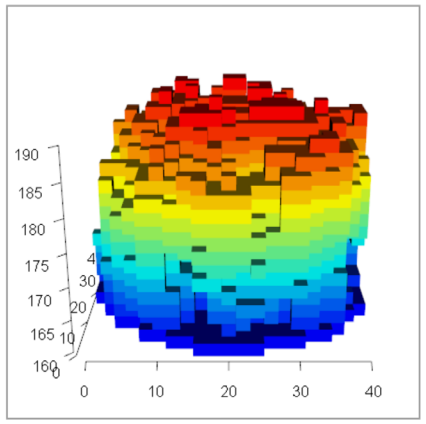
ЭТАП 3

Массив точек локальных наблюдений (X, Y, Z)

Цикл

Извлечение фрагмента ТЛО, вокселизация
A53



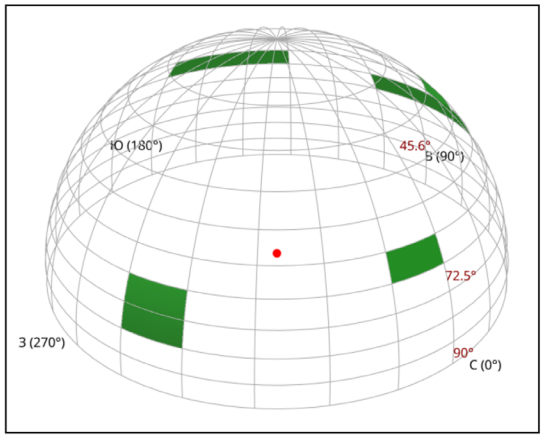


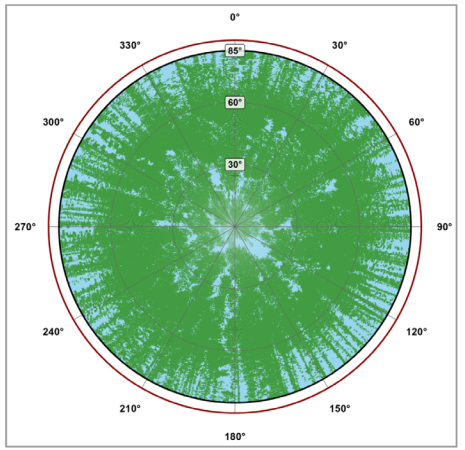
ЭТАП 4

Массив относительных координат вокселов (dx, dy, dz)

Локальный расчет прозрачности по воксельной модели полога
A54

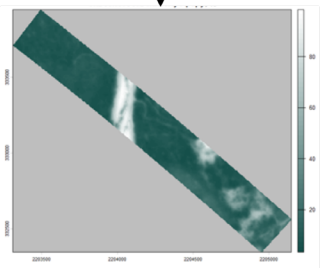
Значение прозрачности в точке наблюдения [0...100%]





ЭТАП 5

Агрегациия локальных измерений и построение растровой модели
A55



Растровая модель прозрачности (GeoTIFF)

А51. ФОРМИРОВАНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА

Организация высокопроизводительной пакетной обработки сверхбольших массивов данных ВЛС.

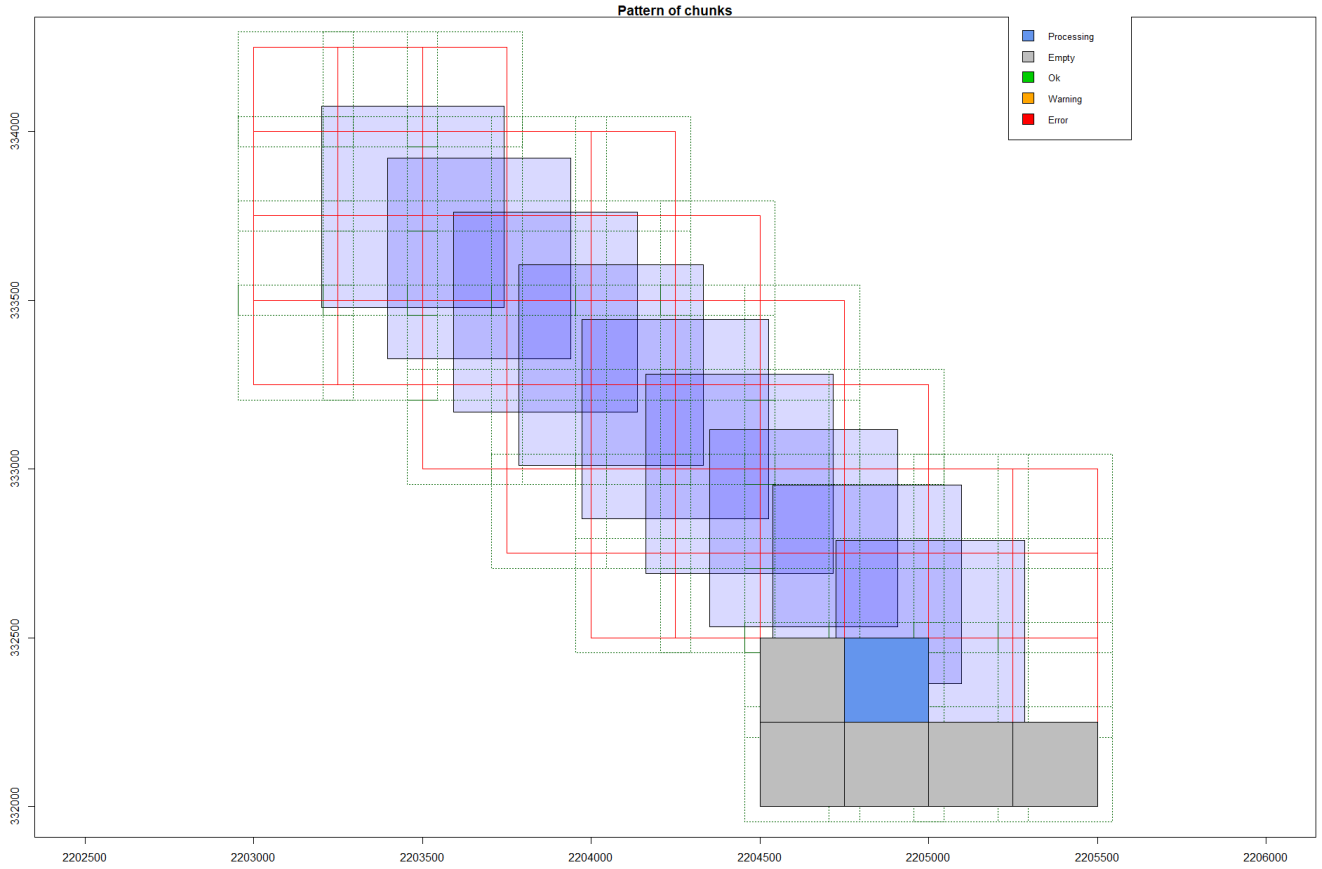
1) Инициализация каталога LAS (readLAScatalog):

- Загрузка распределенного массива облаков точек без полной единовременной загрузки в оперативную память (RAM).

2) Пространственное тайлирование регулярные блоки (чанки) заданного размера (250×250 м).

3) Буферизация чанков (Buffer = max_radius + 5 м)

4) Приведение к единой системе координат границы объекта и файлов LAS



A52. ФОРМИРОВАНИЕ СЕТКИ ЛОКАЛЬНЫХ ТОЧЕК ИЗМЕРЕНИЯ

1) Генерация цифровой модели рельефа (ЦМР / DTM):

Построение регулярной матрицы земной поверхности с заданным шагом, определяемым разрешением результирующего растра прозрачности, алгоритмом триангуляции с линейной интерполяцией (TIN).

2) Размещение виртуальных точек наблюдения (Viewpoints):

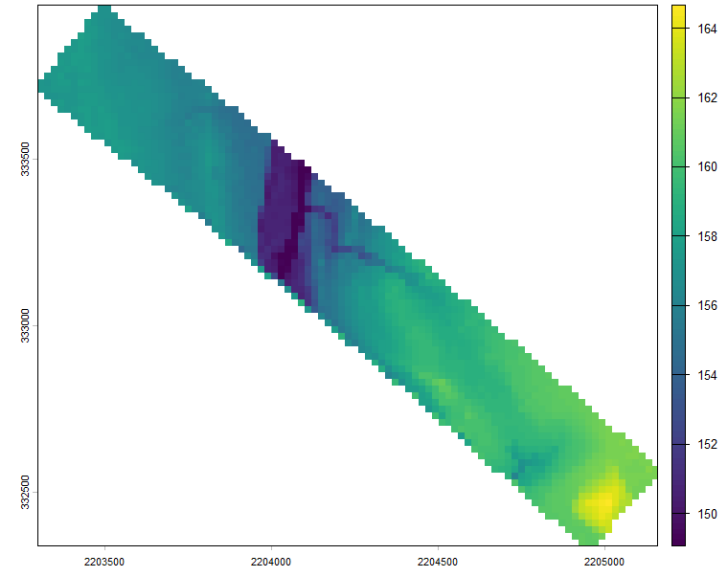
Извлечение координат центров ячеек ЦМР, попадающих строго внутрь границы объекта (SHP).

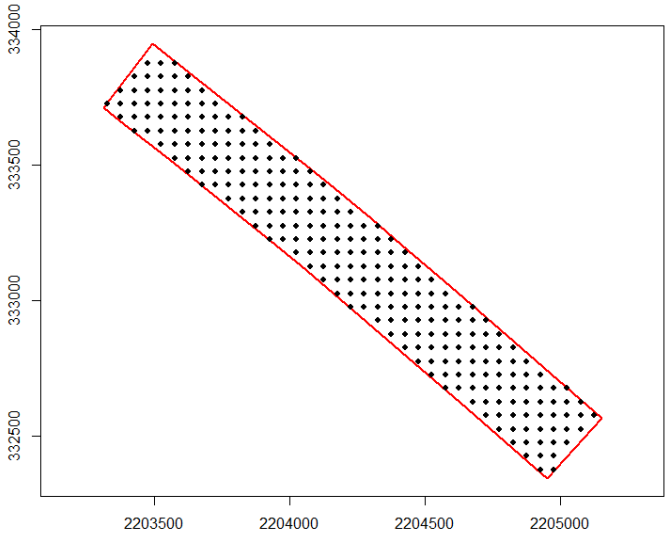
Вертикальное позиционирование сенсора:

$Z_{camera} = Z_{DTM} + H_{cam}$

Высоты камеры на фиксированном уровне над землей.

Результат: Регулярный массив координат точек наблюдения (X, Y, Z_{cam})





А53. ИЗВЛЕЧЕНИЕ ФРАГМЕНТА ТЛО. ВОКСЕЛИЗАЦИЯ

1) **Извлечение фрагмента облака точек лазерных отражений (ТЛО)**

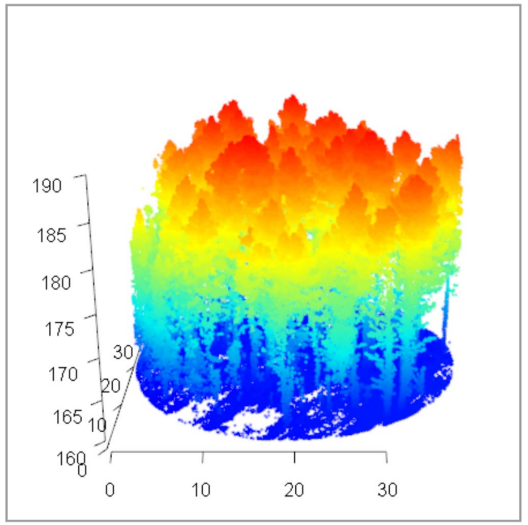
вокруг точки наблюдения – цилиндрический фильтр заданного радиуса

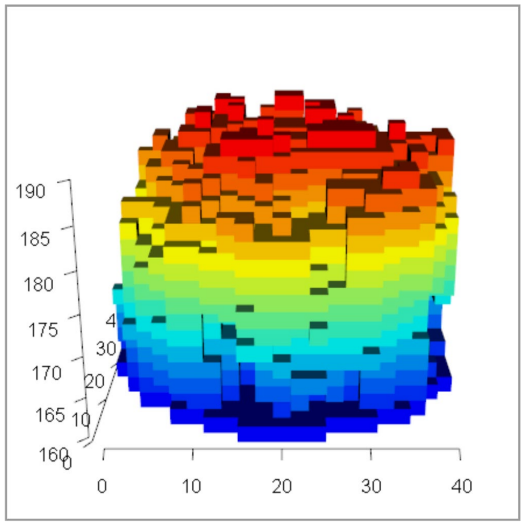
2) Вокселизация

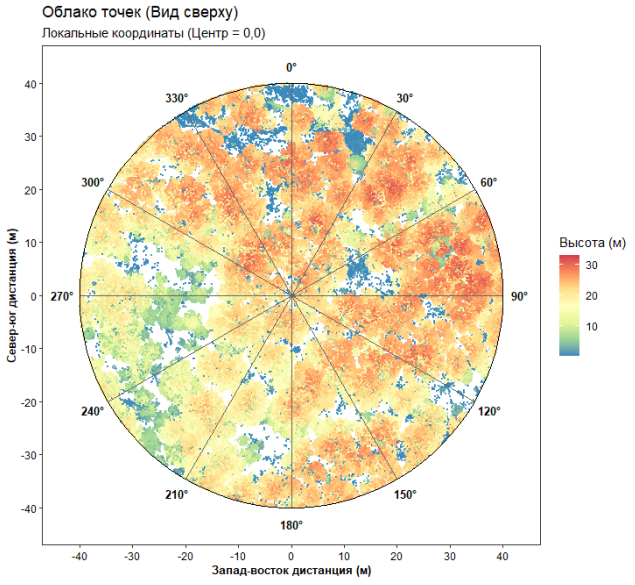
Преобразование облака ТЛО в регулярную воксельную 3D-матрицу с разрешением V_{size}

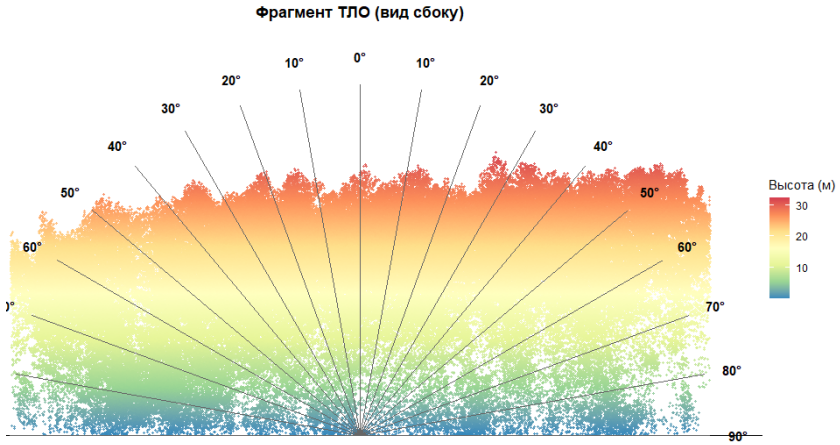
3) **Пересчет координат**

фрагмента в локальную систему координат относительно центра точки наблюдения









А54. ЛОКАЛЬНЫЙ РАСЧЕТ ПРОЗРАЧНОСТИ

Высокопроизводительное ядро (C++) расчета прозрачности полога.

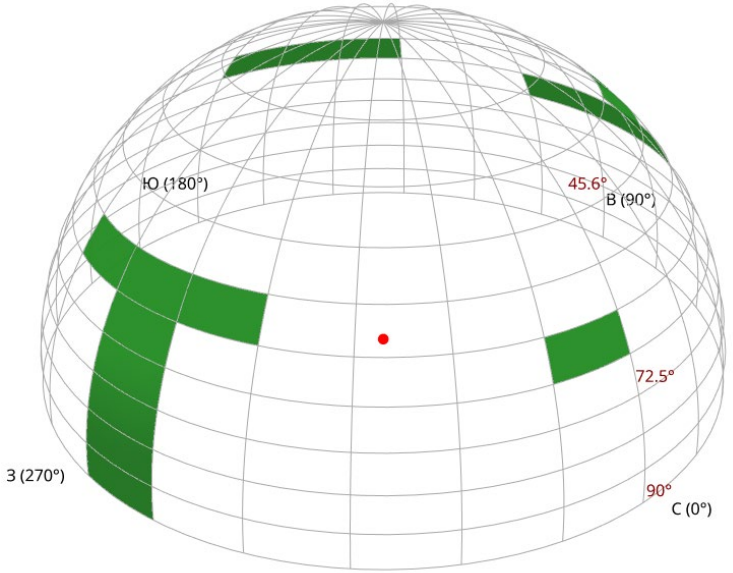
1) Построение полусферы с центром в точке наблюдения.

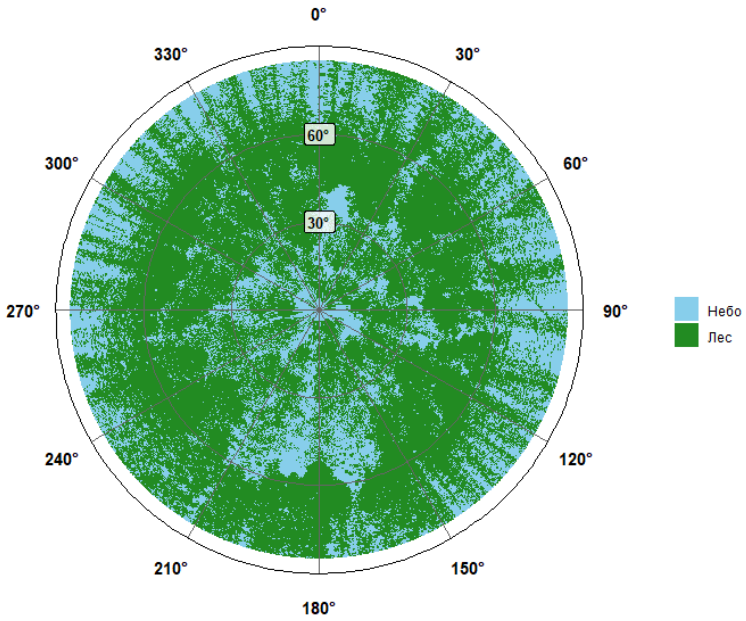
2) Деление полусферы на ячейки равной площади (равный телесный угол):

- зенитными кольцами (задается нижняя граница ниже которой прозрачность не изменяется). Шаг по зениту задается функцией (1−cosθ), что делает площадь каждой ячейки на поверхности сферы одинаковой.
- азимутальными секторами (равный шаг градусов)

3) Перспективное экранирование (Ray-casting):

- Каждый воксел отбрасывает угловую «тень» на небесную полусферу.
- Закон перспективы: чем дальше воксел от виртуальной камеры, тем меньший телесный угол он закрывает.





4) **Расчёт прозрачности**: $$Прозрачность = (1.0 - \frac{\sum BlockedCells}{N_{rings} \times N_{sectors}}) \times 100\%$$

N_{rings} – количество зенитных колец

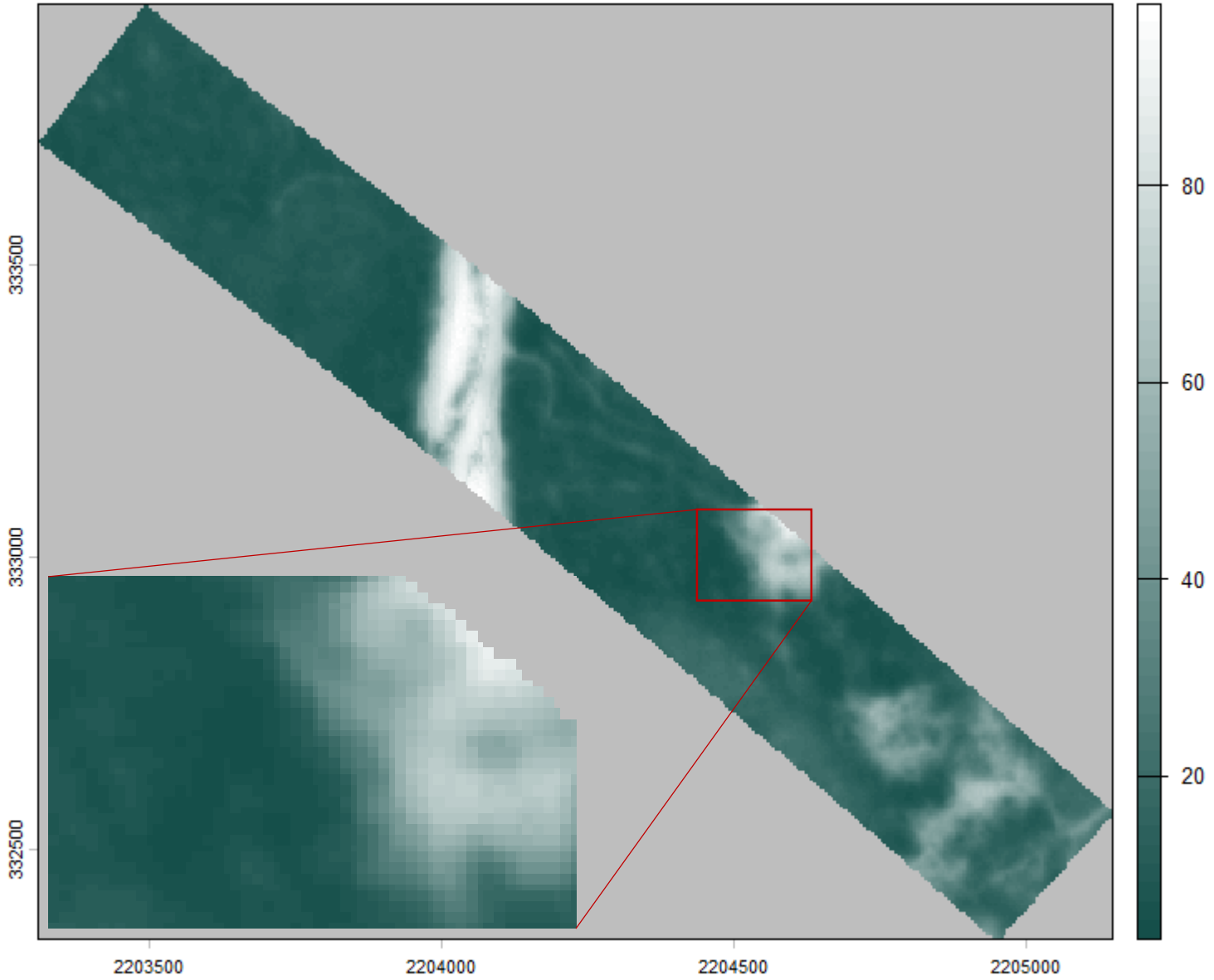
$N_{sectors}$ – количество азимутальных секторов

$BlockedCells$ – занятая ячека

А55. АГРЕГАЦИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В РАСТР

Синтез непрерывного геопространственного поля прозрачности полога.

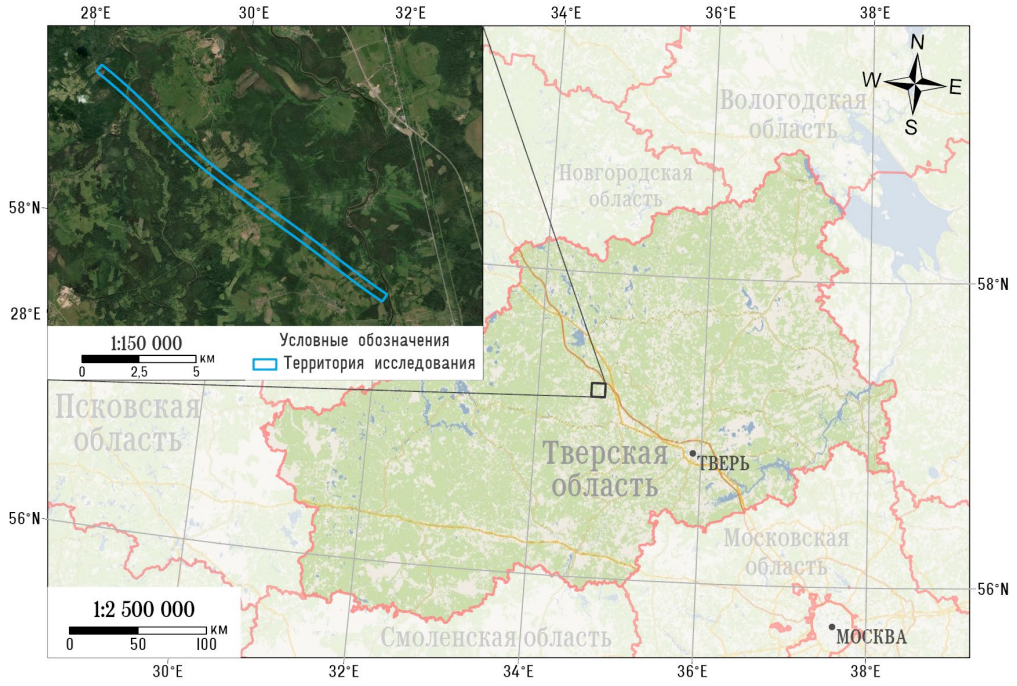
- Формирование итогового координатного датасета измерений: [X, Y, GapFraction (%)].
- Растеризация и экспорт в геопривязанный GeoTIFF в системе координат исходных данных, с заданным разрешением



ТЕРРИТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Территория Тверской области

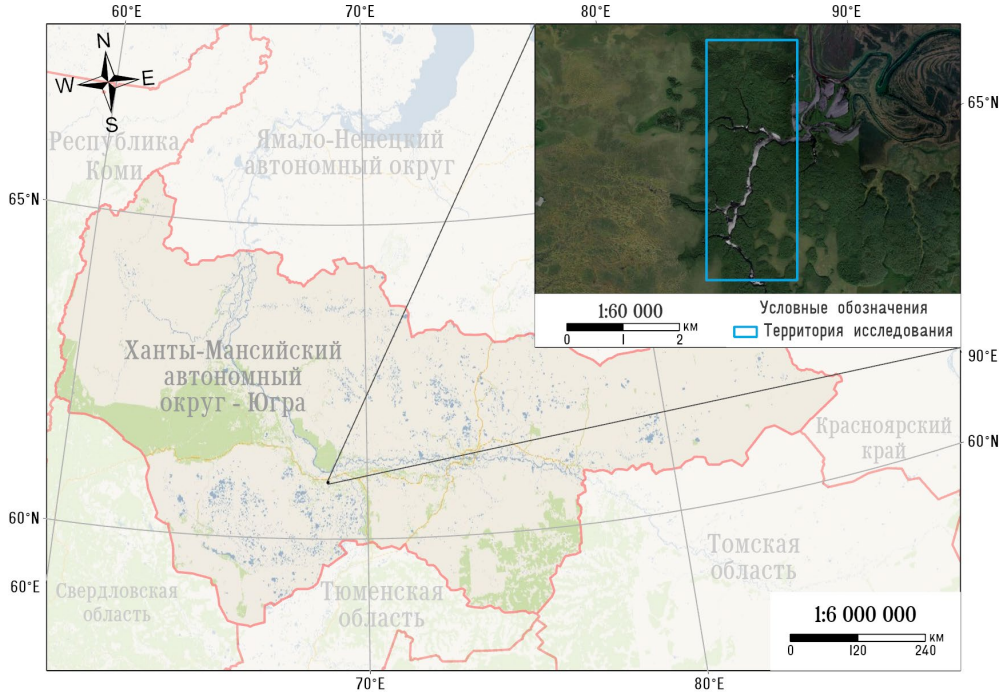
Территория исследования площадью 6.1 км^2 расположена в Тверской области в 77 км к северо-западу от г. Тверь.



Объектом исследования на территории Тверской области являются **древостои сосновых лесов**.

Международный стационар «Мухрино»

Полевой стационар Югорского государственного университета (площадь 6.7 км^2), цель: организация наблюдений за экосистемами в зоне средней тайги Западной Сибири.

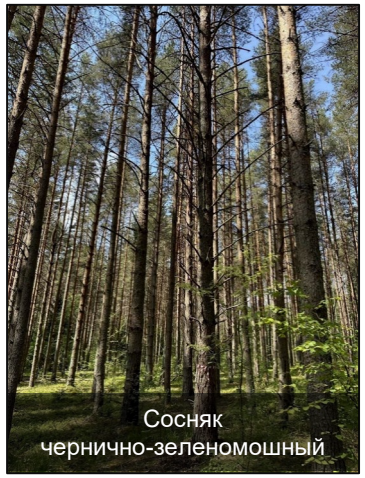


Объектом исследования на территории Ханты-Мансийского автономного округа являются **древостои смешанного темнохвойно-осинового леса**.

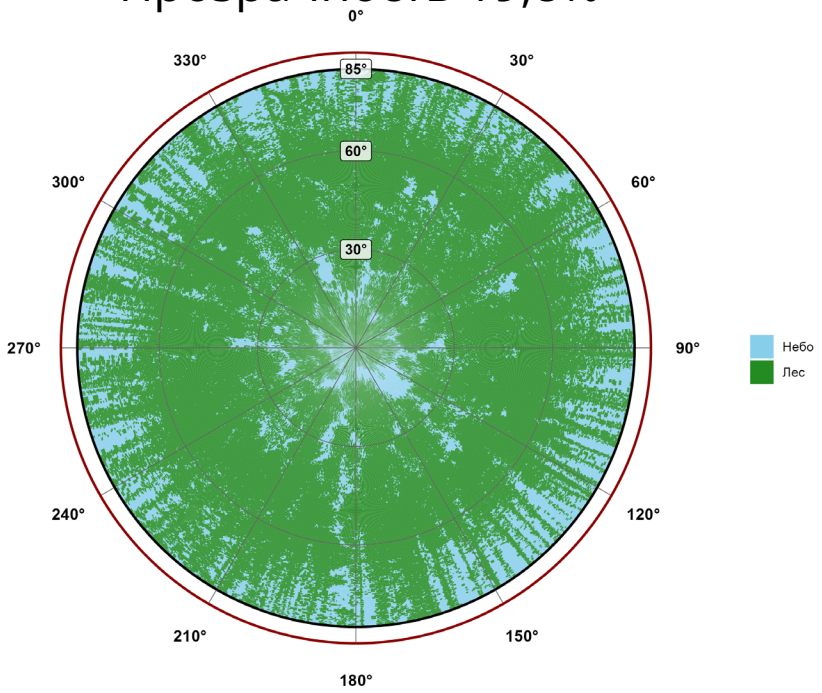
Для **валидации** результатов оценки прозрачности были заложены пробные площади.

РЕЗУЛЬТАТЫ В ТОЧКАХ ВИРТУАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Демонстрация работы алгоритма лучевого проецирования – проекции лесного полога на полусферу.

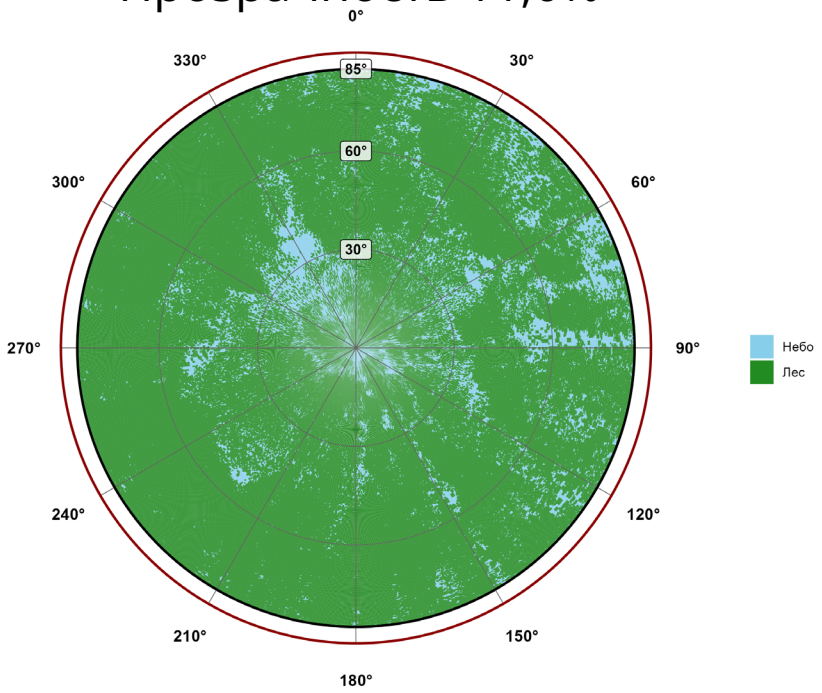


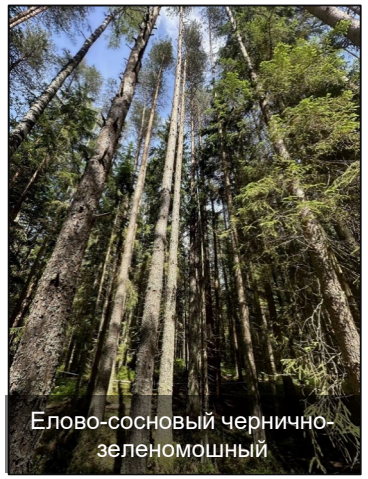
Прозрачность 19,8%



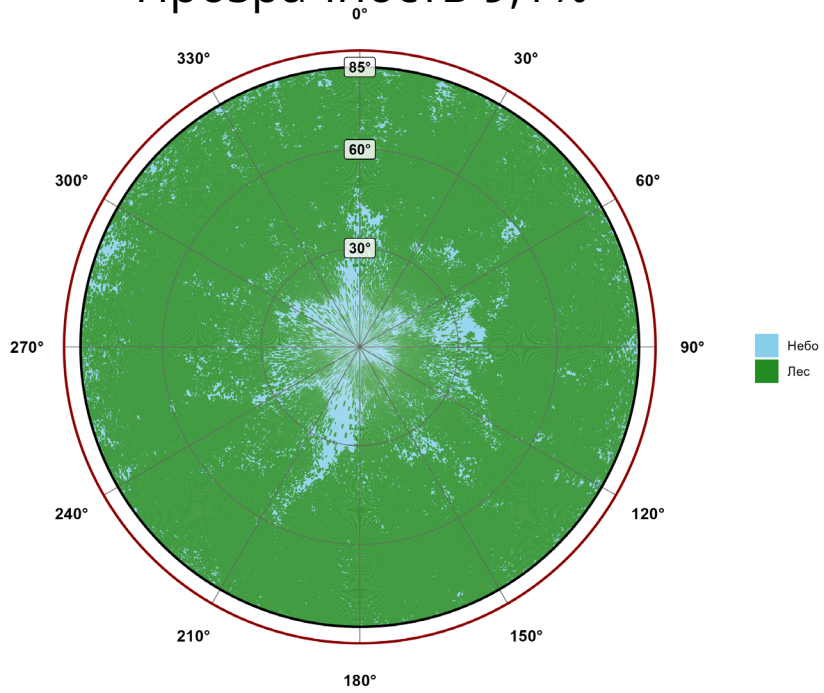


Прозрачность 11,0%



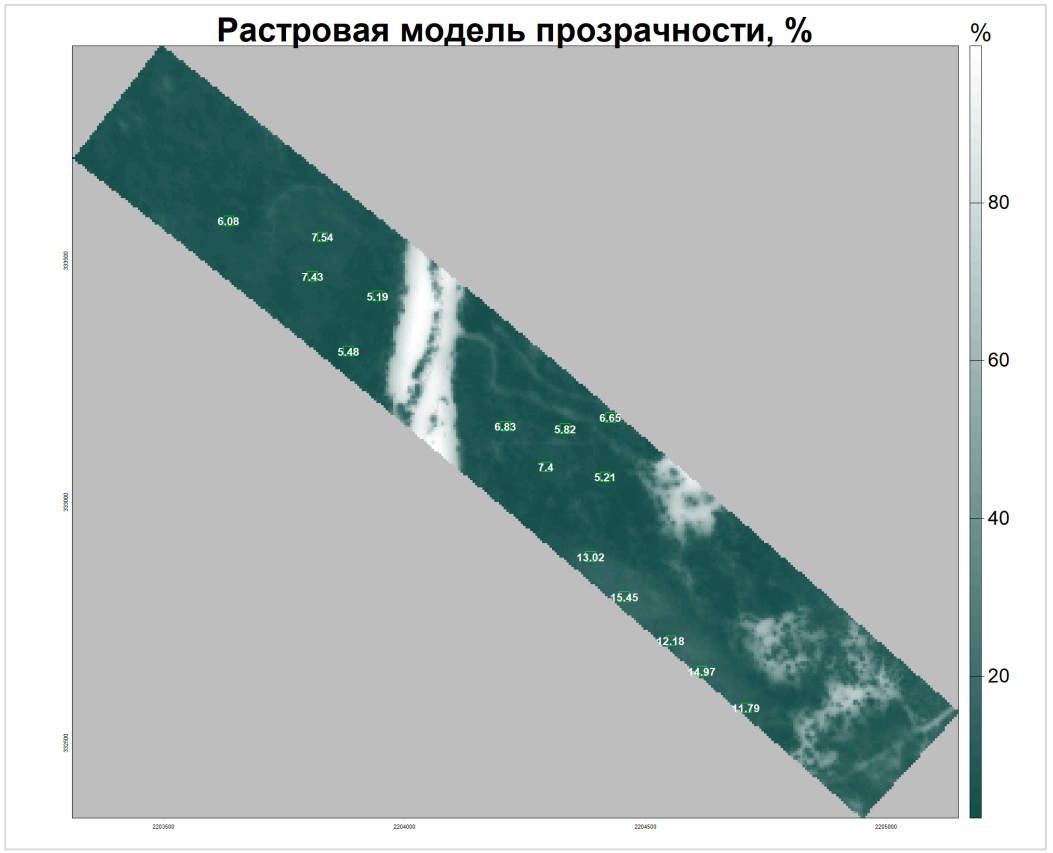


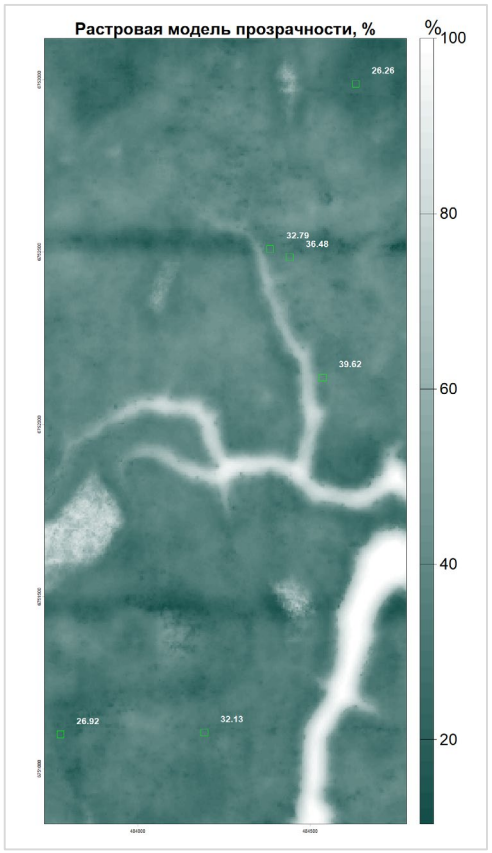
Прозрачность 9,1%

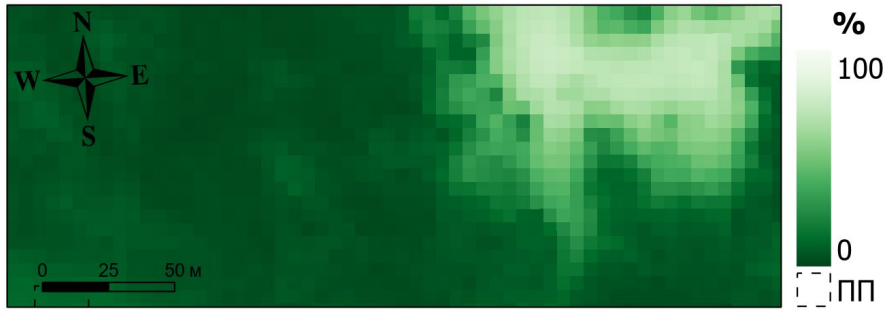


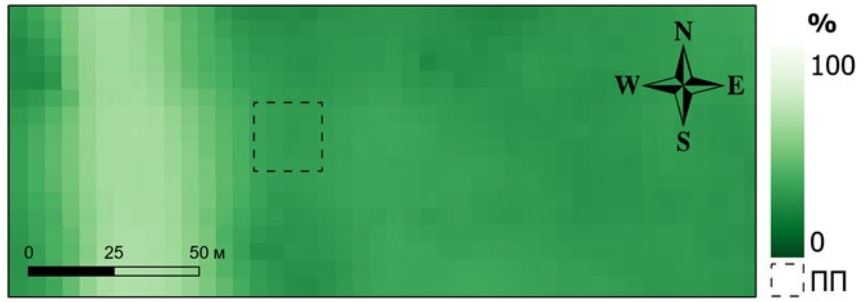
РАСТРОВЫЕ МОДЕЛИ ПРОЗРАЧНОСТИ

Объект: «Мухрино»









ВАЛИДАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Прямые инструментальные измерения освещенности **фиксируют лишь мгновенное** или кратковременное состояние световой среды.

Травяно-кустарничковый ярус является **естественным биоиндикатором, который отражает интегрированное влияние светового режима** на протяжении всего вегетационного периода

Для валидации результатов оценок по данным ВЛС была выбрана **шкала освещенности Э. Ландольта.**

1. Составление флористического списка на каждой ПП – определение балла освещенности для каждого вида.

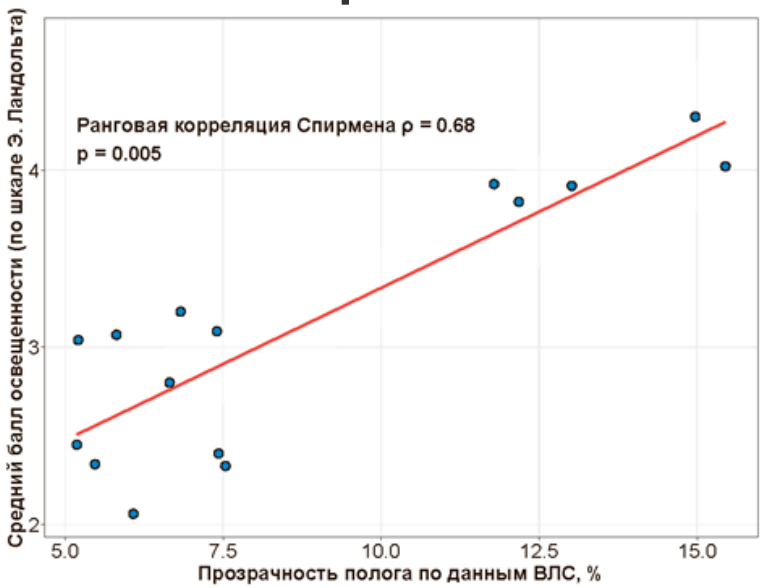
2. Вычисление среднего арифметического балла всех зарегистрированных видов.

3. На каждой пробной площади сопоставление среднего балла освещенности с рассчитанным значением прозрачности.

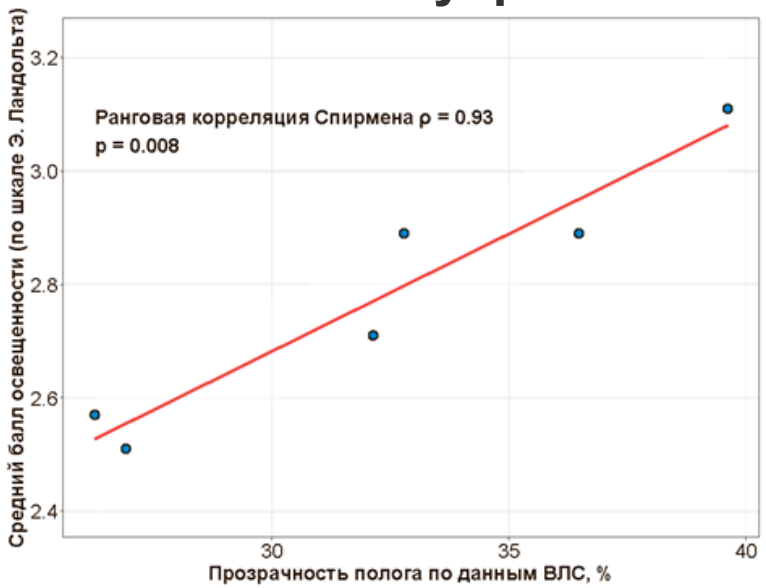




Объект: Тверская область

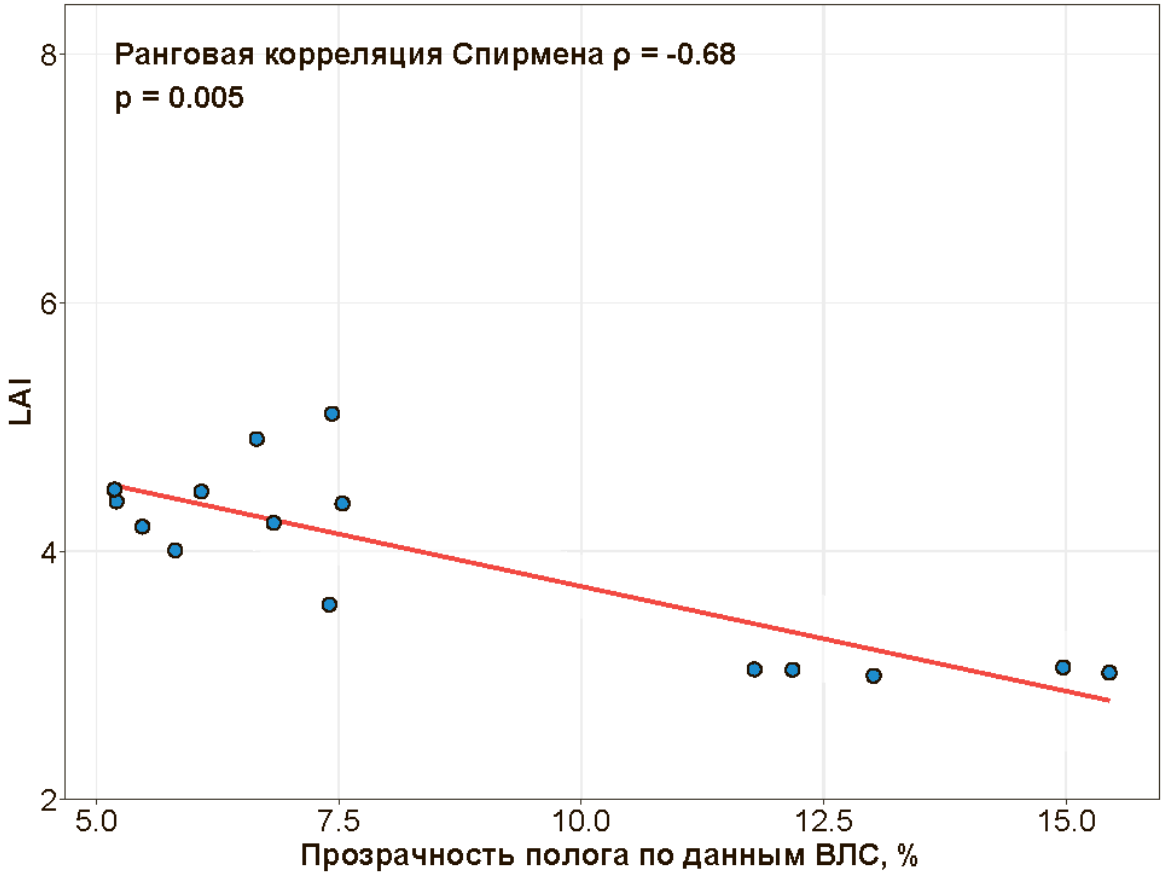


Объект: «Мухрино»

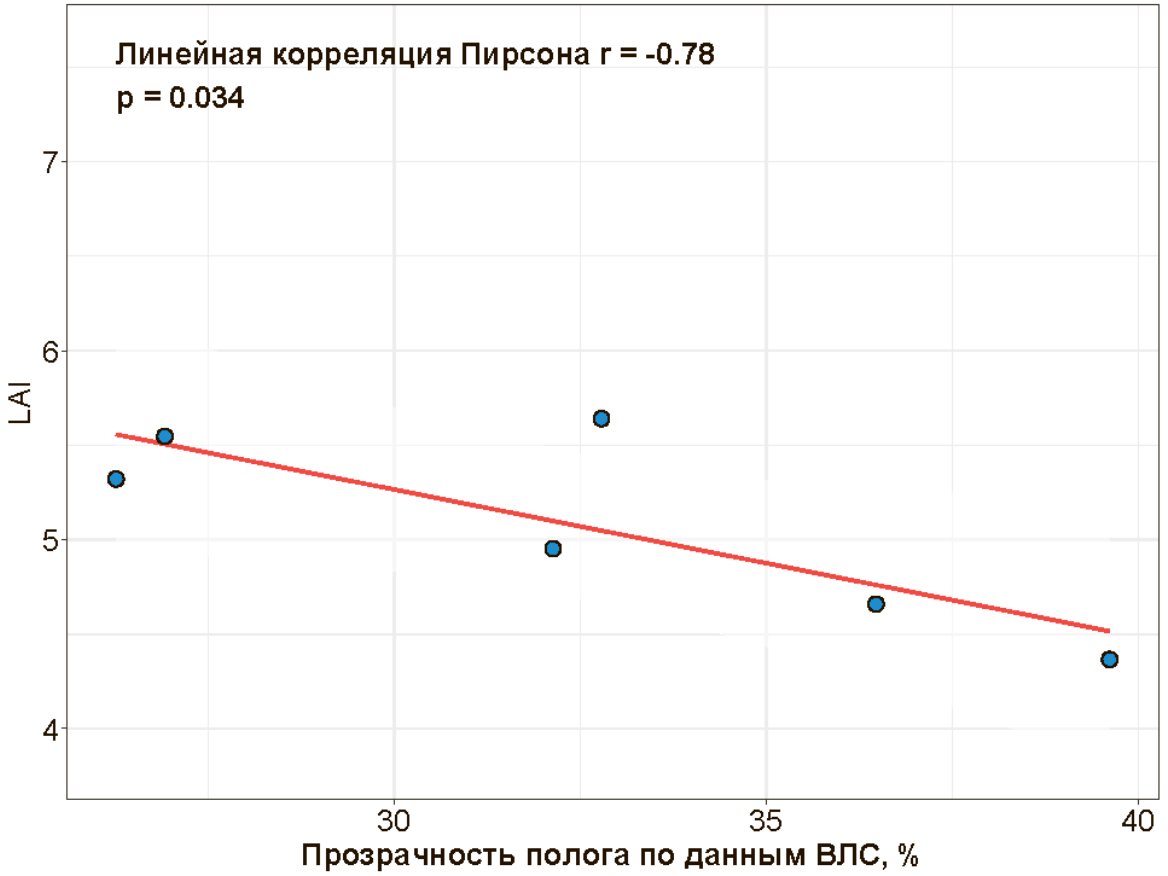


Наличие статистически значимой **сильной положительной связи** между этими показателями является биологически обоснованным подтверждением **корректности оценки освещенности леса** с помощью созданных на основе разработанной методики растровых моделей прозрачности древесного полога.

Объект: Тверская область



Объект: «Мухрино»





Спасибо за внимание!

Алексеев Александр Борисович, ЦЭПЛ РАН

poxpox@mail.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президентского фонда природы (ЭКО-26-2-000303).