



**Федеральный исследовательский центр  
«Красноярский научный центр  
Сибирского отделения Российской академии наук»**

**Особенности мониторинга отдельно стоящих деревьев с  
использованием сигналов L1-диапазона навигационных спутников.**

**Д. В. Харламов, Д. С. Макаров, А. В. Сорокин**

**Восемнадцатая Всероссийская Открытая конференция  
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА  
(Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных  
явлений и объектов)»**

16 - 20 ноября 2020 г., г. Москва, Институт космических исследований РАН



# Введение

- Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) имеют значимый для мониторинга земных покров ресурс – когерентные и поляризованные радиосигналы широкого диапазона частот, проходящие околоземное пространство с ионосферой и атмосферой, взаимодействующее с земными покровами.
- Изменения характеристик сигналов навигационных спутников (НС) в процессах поглощения и рассеяния в объеме сред земных покровов, отражения на границах раздела измеряемы и позволяют восстанавливать значимые для практики электрофизические характеристики этих сред.
- Существует много факторов, влияющих на распространение радиоволн в лесном покрове, обусловленных структурными особенностями древостоя и отдельных деревьев, сезонными изменениями их электрофизических характеристик.
- Пространственно-временные координаты положения навигационных спутников в сочетании с координатами расположения антенны и границы лесного массива позволяют однозначно определить траекторию трассы прохождения сигнала (НС) сквозь лесной полог и перемещения рассеивающего объема лесного полога.

**Это обстоятельство дает возможность определить коэффициент погонного ослабления сигнала с координатной привязкой и восстанавливать эффективную комплексную диэлектрическую проницаемость (ЭКДП), связанную с биомассой и влажностью древостоя.**



## Характеристики сигналов ГНСС

- Сигналы ГНСС относятся к классу сигналов с расширенным спектром. Такие сигналы называют широкополосными или шумоподобными.
- В качестве «расширяющих» (порождающих) псевдослучайных последовательностей (ПСП) используются бинарные M-последовательности (511, ГЛОНАСС) и коды Голда (1023, GPS).
- Вид модуляции: фазовая манипуляция (BPSK) и BOC-модуляция (частный случай BPSK, при умножении порождающих последовательностей на меандр).
- Частотные диапазоны: L1 (~ 1,5 ГГц ), L2 (~1,2 ГГц) и другие.
- Период ПСП: 1 мс.
- Длительность чипа ПСП  $t_c$ :  $1\text{мс} / 511 \sim 2\text{ мкс}$ ;  $1\text{мс} / 1023 \sim 1\text{ мкс}$ .
- Длина когерентности: ГЛОНАСС ~ 600 м, GPS ~ 300 м.
- Способ разделения сигналов: FDMA (частотное) , CDMA (кодированное).
- Поляризация: правая круговая.



## Общие характеристики группировок ГНСС

Система/ Параметры	GPS США	ГЛОНАСС СССР, РФ	Galileo ESA	Бэйдоу КНР
Количество спутников	24	24	26	5 – геостац 27 – кругов 3 геосинх
Кол-во орбитальных плоскостей	6	3	3	1 геостац 3 круговые 1 геосинх
Орбиты: угол наклонения	55°	64,8°	56°	55°
Высота орбит, км	20180	19100	23230	Гео- (стац, синх) 35786 Круговые 21528



# Распространения сигналов ГНСС в средах земных покровов

1. Прохождение сигналов ГНСС от излучателя до приемника:
    - космическое пространство (КП)
    - атмосфера (АС), тропо-, страто, мезо-, термо-, экзо- СФЕРЫ
    - растительные покровы (РП - леса, злаковые, травянистые)
    - лед, снег (ЛС)
  2. Отражение от границ раздела сред:
    - Пропускающих , КП- слои АС, АС-ЛС
    - Поглощающих, вода, почва, здания – АС
- Среды прохождения сигналов ГНСС – **разнообразно слоистые!**



# Соотношения геометрических параметров элементов древостоя и длины волны излучения ГНСС диапазона L1 (1,5 -1,6 ГГц)

Характерные средние размеры:

диаметры стволов -  $a$ , ветвей –  $b$ , хвои, листвы -  $c$ ;

длины волн  $\lambda$  ГЛОНАСС – (18,8 -18,9) см,  
диапазона L 1: GPS – 19,04 см

Для зрелого леса:

$b/a, c/a \ll 1, b/\lambda, c/\lambda \ll 1, a/\lambda \sim \text{или} > 1$

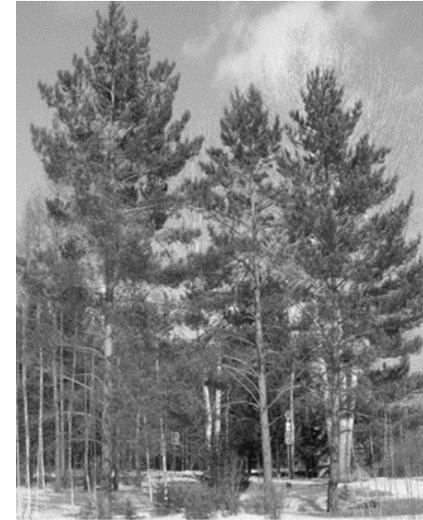


# Структура древостоя и рефракционная модель

- Разномасштабные элементы деревьев - стволы, ветви, хвоя или листья, их пространственная ориентация, пространственные неоднородности распределения фитомассы, слои стволов и крон с градиентами фитомассы по вертикали.
- Наличие взаимного пересечения слоев стволов и крон.
- В мониторинге лесных покровов необходима разработка рефракционной модели древостоя с учетом:
  - распределения объемной плотности фитомассы;
  - ориентационной упорядоченности стволов и ветвей крон;
  - диэлектрических характеристик древесины, хвои или листьев

# Ориентационная упорядоченность элементов древостоя

Слой крон как ансамбль объемных структур из ветвей деревьев имеет нескольких ярусов. Имеется заметное видовое различие ориентационной упорядоченности крон отдельных деревьев. Примеры структуры крон представлены на рисунке:





## Диэлектрическая модель

Значения  $\epsilon'_l - \epsilon'_c$  получены в рамках модели смешанного диэлектрика влажной древесины и воздуха:

$$\epsilon'_{см} = W_1 \epsilon'_1 + W_2 \epsilon'_2,$$

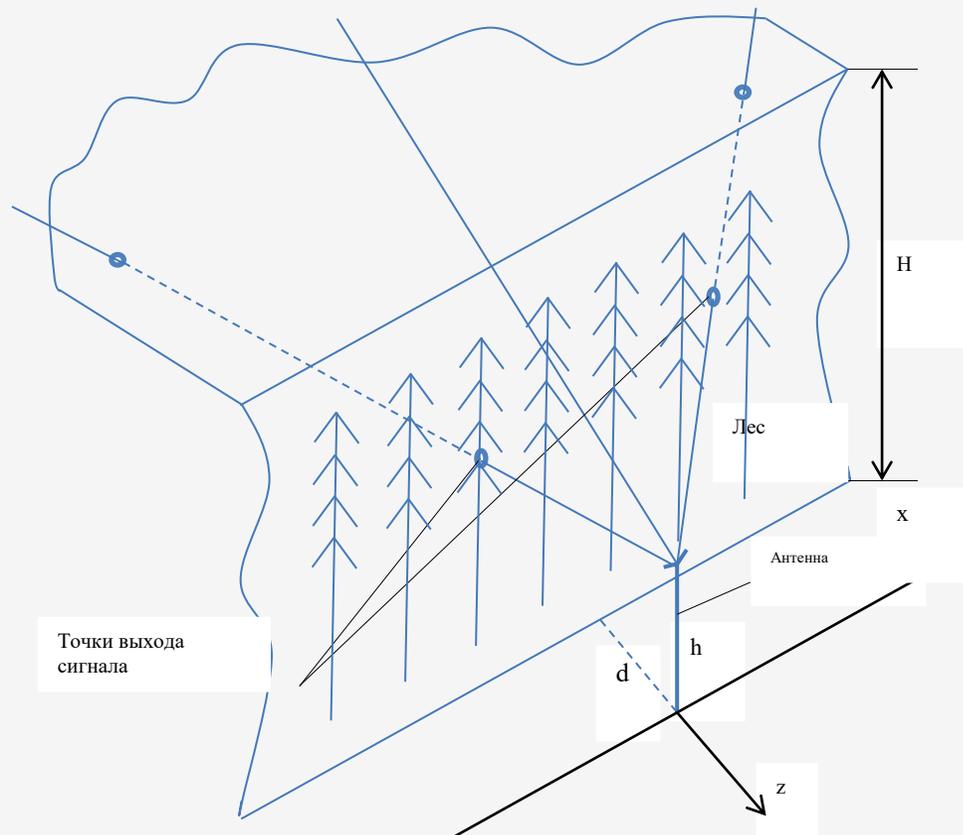
где  $\epsilon'_{см}$ ,  $\epsilon'_1$ ,  $\epsilon'_2$  – действительные части диэлектрические проницаемости смеси, древесины и воздуха соответственно,  $W_1$ ,  $W_2$  – объёмные доли влажной древесины и воздуха в объеме дровостоя.

	$\Delta\epsilon'$	Высота, м	Диаметр, м	Плотность, м <sup>-2</sup>
Лиственница	0,02	25 м	0,25 м.	0,114
Сосна	0,03	21	0,25	0,129

Использованы экспериментальные данные диэлектрической проницаемости древесины влажностью 40% при температуре 20° на частотах 0,915 и 2,375 ГГц.

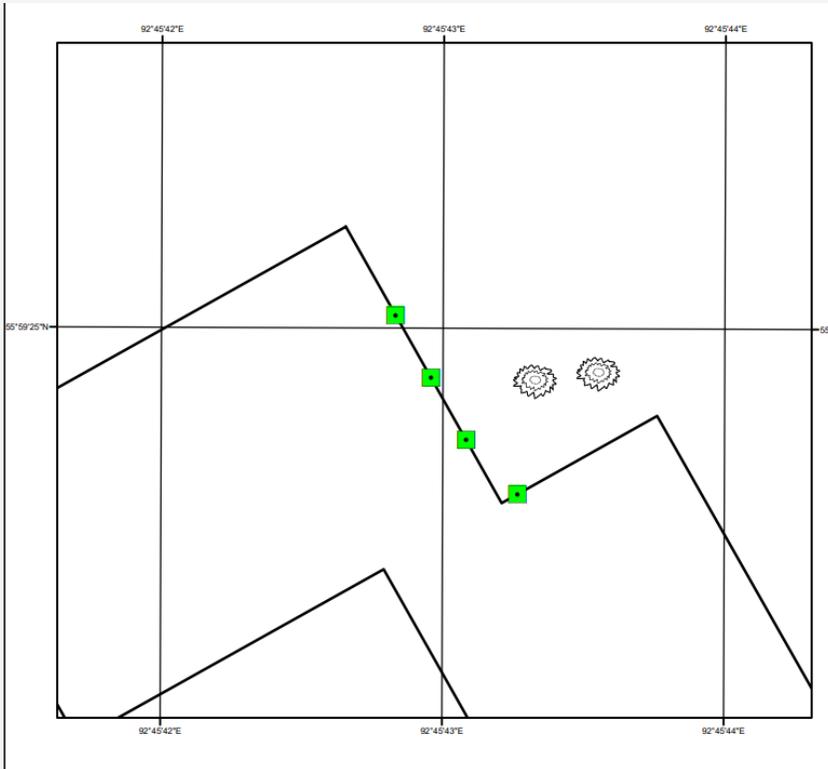


# Радиопросвечивание леса





# Тестовая площадка



- Использована аппаратура МРК-32Р с штатной антенной, принимающей сигнал с право круговой поляризацией и специализированный четырехканальный приемник - регистратор для измерений поляризационных характеристик прошедшего сигнала.
- Высота расположения антенны над уровнем почвы варьировалась в пределах высоты дерева. Продолжительность каждого сеанса непрерывной регистрации составляла 3 часа.
- Сигналы сканировали кроны елей в секторах углов азимута и возвышения НС 90° и 80° соответственно. Специализированный приемник обеспечил регистрацию сигналов НС GPS, ГЛОНАСС, Galileo, QZSS.



# Графики

### ГЛОНАСС 1 Амплитуда



### ГЛОНАСС 1 Азимут



### ГЛОНАСС 1 Угол места



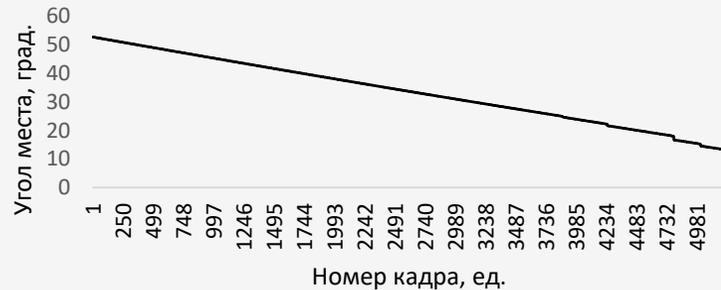
### GPS 5



### GPS 5 Азимут



### GPS 5 Угол места



### GPS 15 Амплитуда



### GPS 15 Азимут



### GPS 15 Угол места





## Итоги и выводы

- Проведен ряд сеансов регистрации ослабленных сигналов НС двух близко стоящих деревьев. Использована аппаратура МРК-32Р с штатной антенной, принимающей сигнал с право круговой поляризацией и специализированный четырехканальный приемник - регистратор для измерений поляризационных характеристик прошедшего сигнала. Высота расположения антенны над уровнем почвы варьировалась в пределах высоты дерева.
- Получены массивы данных о сигналах НС, просвечивающих кроны в различных сечениях.
- Выявлены информативные различия пространственно-временных зависимостей амплитуды сигналов в точке расположения приемной антенны от траекторий движения НС. Рассчитаны коэффициенты погонного ослабления.
- Вариации амплитуды регистрируемых сигналов связаны с пространственным распределением эффективной диэлектрической проницаемости дерева, зависящей от объемных долей и влажности древесинного вещества ствола и кроны. Использование «теневых» проекций радиопросвечивания в широком диапазоне азимута и углов возвышения НС имеет перспективу разработки восстановления объемной диэлектрической структуры кроны отдельного дерева.



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**