



# Исследование лесной растительности с использованием радиолокационных снимков

на примере ключевых участков на Кольском полуострове  
и в центральной Якутии

А. А. Созонтова (1), О. В. Тутубалина (1), П. Г. Михайлюкова (1), Г. Рис (2)

(1) МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

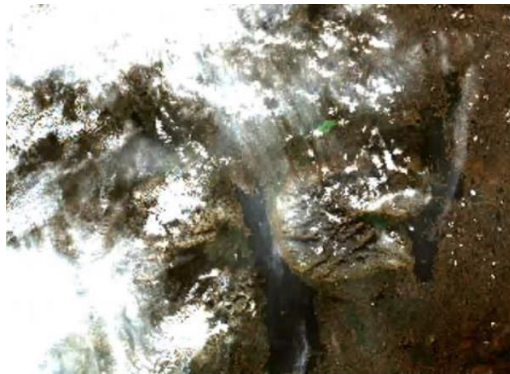
(2) University of Cambridge, Cambridge, UK

# Радиолокационные данные

Не зависят от облачности  
и освещения

Чувствительны  
к структуре растений и  
содержанию воды

Сложны в обработке и  
интерпретации



Sentinel-2 MSI



Sentinel-1 SAR

# Исследования леса

Выделение маски леса

Классификация пород

Оценка запасов  
древесины



Pinus Nigra



**X-band**  
 $\lambda = 3 \text{ cm}$

TerraSAR-X  
COSMO-SkyMed



**C-band**  
 $\lambda = 5 \text{ cm}$

Sentinel-1  
RADARSAT



**L-band**  
 $\lambda = 27 \text{ cm}$

PALSAR(-2)  
NISAR (2021)



**P-band**  
 $\lambda = 70 \text{ cm}$

BIOMASS (2021)

На разных длинах волн радиолокационный сигнал отражается от разных частей дерева (Le Toan, 2017)

# Выявление породного состава лесов

# Используемые материалы

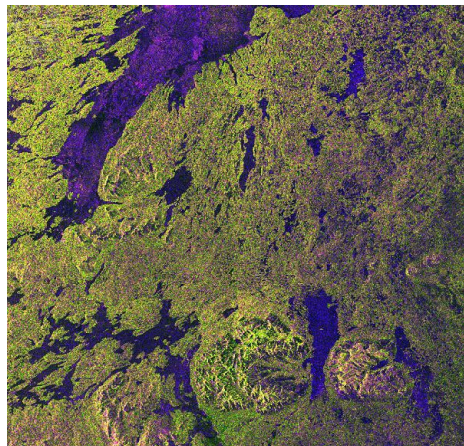
ФОТО: А. Азарова



КОЛЬСКИЙ П-ОВ

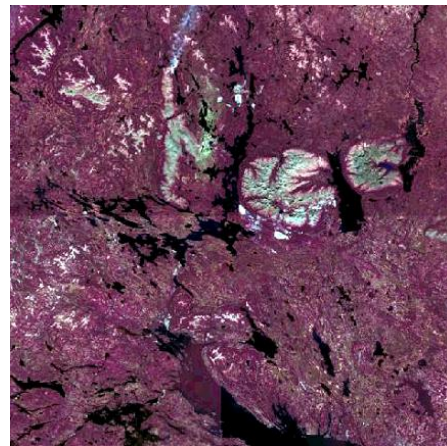


РЛ снимки  
Sentinel-1 SAR



10.2017 – 11.2018

Оптические  
снимки  
Sentinel-2 MSI



19.07.2018

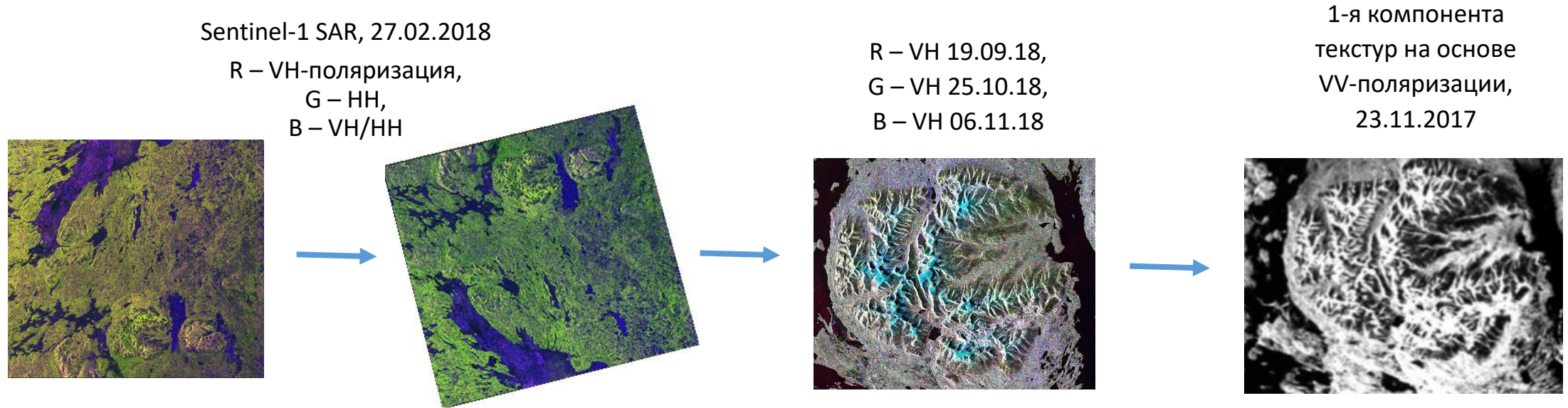
Полевые  
описания  
2018 г.

| d+O24L6/ | plot's name | x (UTM36N) | y (UTM36N) | n   | Lat in dec.degree | Long in dec.de |
|----------|-------------|------------|------------|-----|-------------------|----------------|
| d        | Название    | x          | y          | Lat | Long              | Lin            |
| 1        | Kola1       | 508036.34  | 7496278    |     | 67.582            | 33.1888        |
| 2        | Kola2       | 507927.62  | 7496305    |     | 67.5823           | 33.1863        |
| 3        | Kola3       | 508317.58  | 7496514    |     | 67.5841           | 33.1955        |
| 4        | Kola4       | 508226.59  | 7497740    |     | 67.5951           | 33.1934        |
| 5        | Kola5       | 508441.04  | 7497498    |     | 67.593            | 33.1984        |
| 6        | Kola6       | 508355.25  | 7496968    |     | 67.5882           | 33.1964        |
| 7        | Kola7       | 508123.79  | 7496702    |     | 67.5858           | 33.1909        |
| 8        | Kola8       | 526469.67  | 7506386    |     | 67.6716           | 33.6243        |
| 9        | Kola9       | 526621.19  | 7506331    |     | 67.6711           | 33.6279        |
| 10       | Kola10      | 526951.29  | 7505787    |     | 67.6662           | 33.6356        |
| 11       | Kola11      | 536026.47  | 7493020    |     | 67.5507           | 33.8454        |
| 12       | Kola12      | 536137.39  | 7493066    |     | 67.5511           | 33.8481        |
| 13       | Kola13      | 554752.33  | 7487184    |     | 67.4955           | 34.2819        |
| 14       | Kola14      | 554611.79  | 7487429    |     | 67.4977           | 34.2788        |
| 15       | Kola15      | 541657.95  | 7489159    |     | 67.5153           | 33.9761        |
| 16       | Kola16      | 540905.08  | 7489267    |     | 67.5164           | 33.9585        |
| 17       | Kola17      | 497717.95  | 7502361    |     | 67.6367           | 32.9463        |
| 18       | Kola18      | 496602.21  | 7502526    |     | 67.6382           | 32.92          |
| 19       | Kola19      | 492746.17  | 7507184    |     | 67.6799           | 32.8288        |
| 20       | Kola20      | 488466.61  | 7501245    |     | 67.6265           | 32.7285        |
| 21       | Kola21      | 489744.33  | 7503306    |     | 67.645            | 32.7584        |
| 22       | Kola22      | 493283.10  | 7506044    |     | 67.6697           | 32.8416        |

Метеоданные

|               |        |      |     |
|---------------|--------|------|-----|
| 2018 04 08 18 | 1015.3 | -2.3 | 86  |
| 2018 04 09 00 | 1015.1 | -3.0 | 26  |
| 2018 04 09 06 | 1011.6 | -3.9 | 26  |
| 2018 04 09 12 | 1005.7 | -0.7 | 36  |
| 2018 04 09 18 | 1002.8 | -1.8 | 86  |
| 2018 04 19 00 | 1016.3 | -1.6 | 999 |
| 2018 04 19 06 | 1017.7 | 2.9  | 999 |
| 2018 04 19 12 | 1022.1 | 1.3  | 999 |
| 2018 04 19 18 | 1023.3 | -1.5 | 2   |
| 2018 04 20 00 | 1023.2 | -8.5 | 2   |
| 2018 04 20 06 | 1019.8 | -1.9 | 2   |
| 2018 04 20 12 | 1014.7 | -0.9 | 26  |
| 2018 04 20 18 | 1011.0 | -3.3 | 85  |
| 2018 04 21 00 | 1008.2 | -6.1 | 2   |
| 2018 04 21 06 | 1006.1 | -3.9 | 999 |
| 2018 04 21 12 | 1006.5 | -1.7 | 999 |
| 2018 04 21 18 | 1008.5 | -2.7 | 999 |
| 2018 05 01 00 | 1021.3 | -2.4 | 26  |
| 2018 05 01 06 | 1022.6 | 1.2  | 999 |
| 2018 05 01 12 | 1022.8 | 6.4  | 999 |
| 2018 05 01 18 | 1023.6 | 0.5  | 999 |
| 2018 05 02 00 | 1024.9 | -3.2 | 999 |
| 2018 05 02 06 | 1024.3 | 1.8  | 999 |
| 2018 05 02 12 | 1022.8 | 4.4  | 999 |
| 2018 05 02 18 | 1022.0 | 2.4  | 999 |
| 2018 05 03 00 | 1022.4 | -0.2 | 999 |
| 2018 05 03 06 | 1023.7 | 3.4  | 999 |
| 2018 05 03 12 | 1025.8 | 6.1  | 999 |

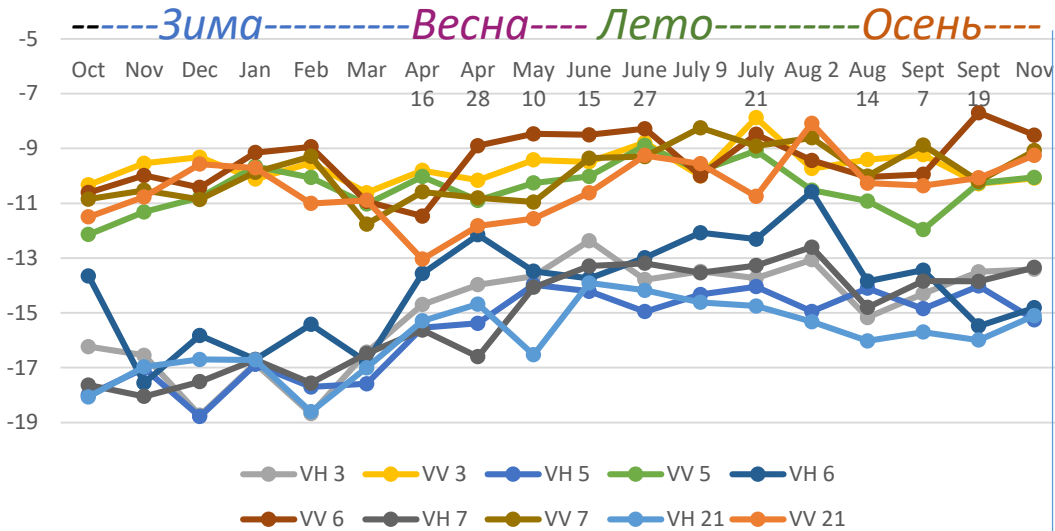
# Предварительная обработка



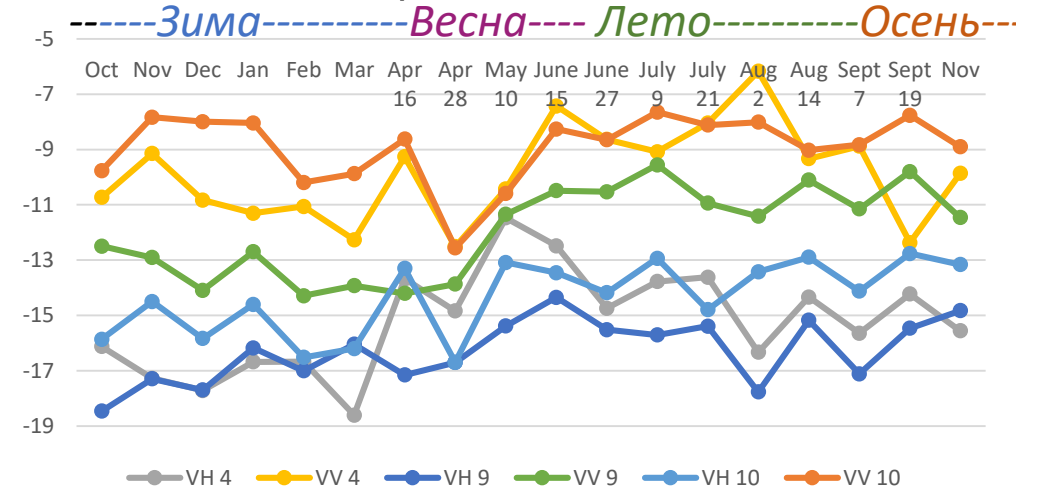
- Уточнение орбитальных данных
- Радиометрическая калибровка
- Некогерентное накопление
- Ортотрансформирование
- Корегистрация (17 дат)
- Фильтр спекл-шума
- Пересчет в дБ
- Построение текстурных изображений
- Анализ главных компонент

# Многовременные профили

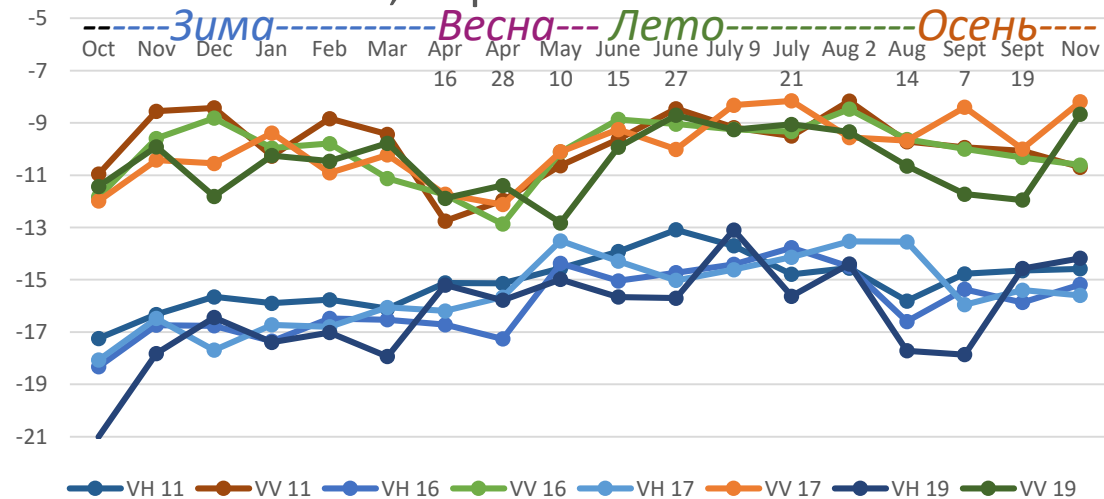
Сосновый лес



Берёзовый лес



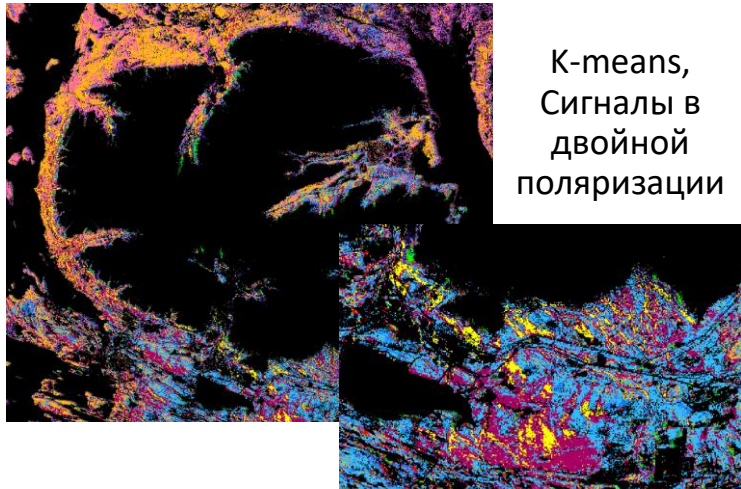
Еловый, берёзово-еловый лес



# Классификация данных

- Кластеризация и классификация с обучением многовременных снимков и производных продуктов (главных компонент от текстурных изображений, построенных на основе РЛ данных)

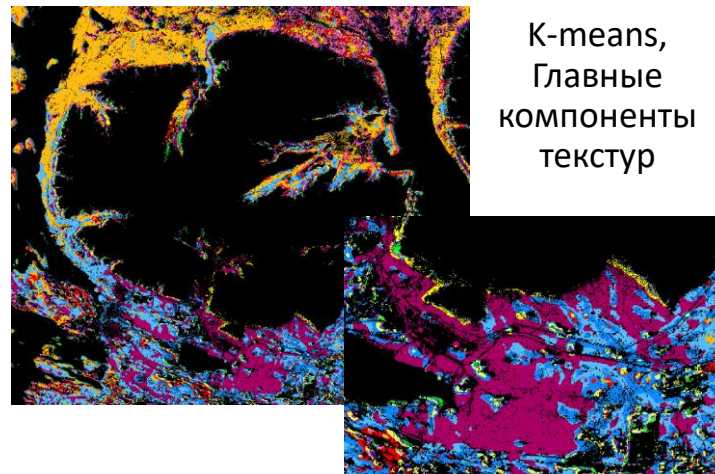
## КЛАСТЕРИЗАЦИЯ



K-means,  
Сигналы в  
двойной  
поляризации

Достоверность по  
ключевым участкам

**75%**

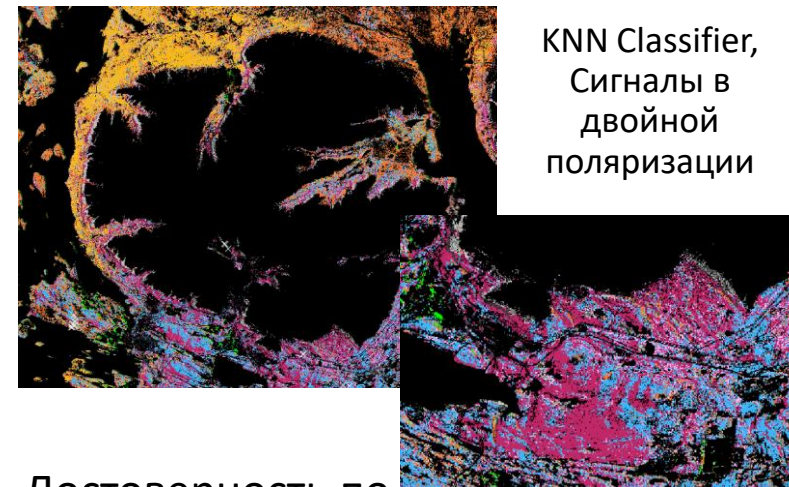


K-means,  
Главные  
компоненты  
текстур

Достоверность по  
ключевым участкам

**55%**

## КЛАССИФИКАЦИЯ С ОБУЧЕНИЕМ



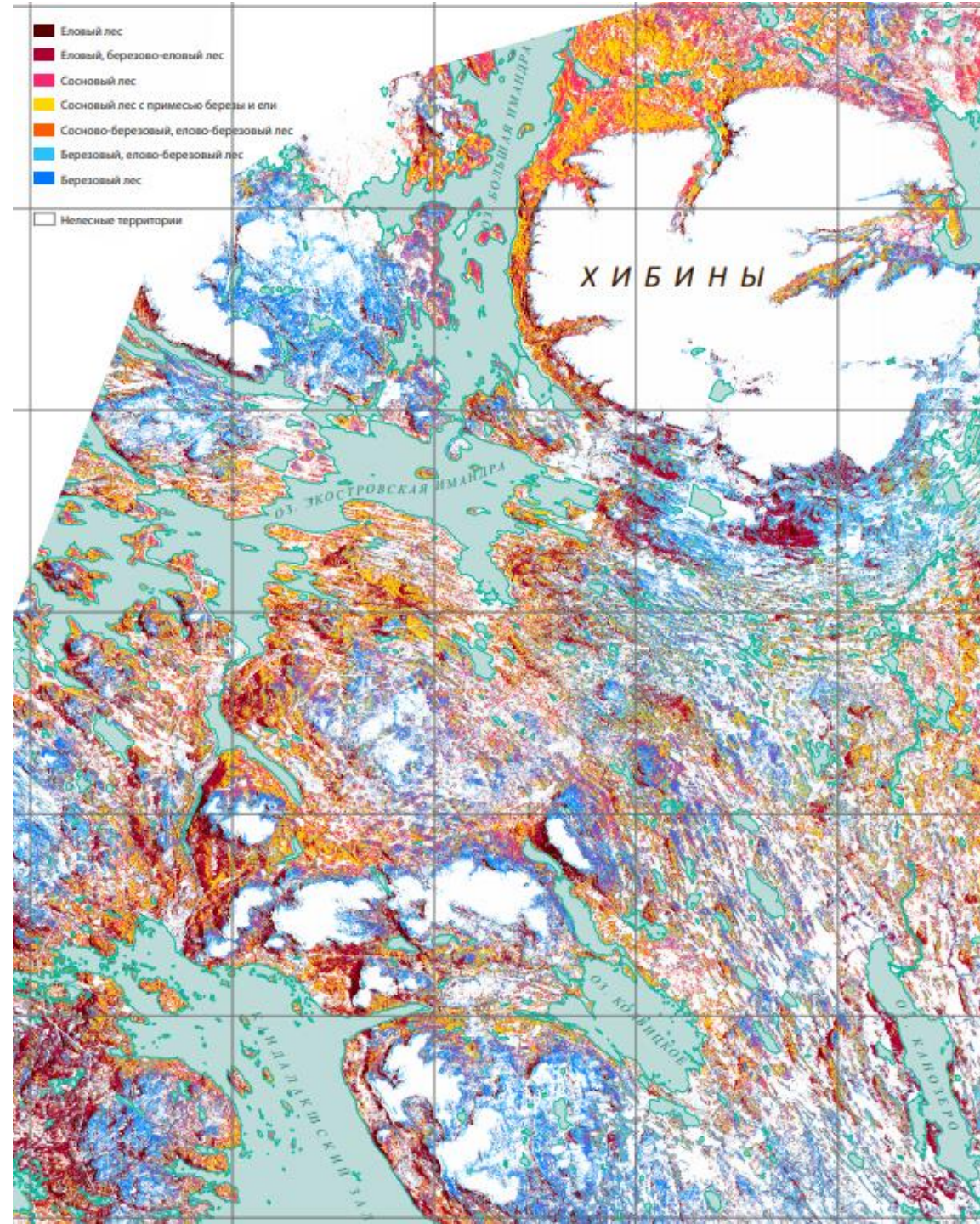
KNN Classifier,  
Сигналы в  
двойной  
поляризации

Достоверность по  
ключевым участкам

**67%**



- Еловый лес
- Еловый, березово-еловый лес
- Сосновый лес
- Сосновый лес с примесью березы и ели
- Сосново-березовый, елово-березовый лес
- Березовый, елово-березовый лес
- Березовый лес
  
- Нелесные территории



# Результаты

- Многовременные открытые данные Sentinel-1 SAR с относительно высокой достоверностью позволяют проводить классификацию лесного покрова
- Чувствительность сигналов к рельефу может позволить косвенно выделять разные растительные сообщества на склонах разной экспозиции

# Оценка запасов древесины

# Используемые материалы

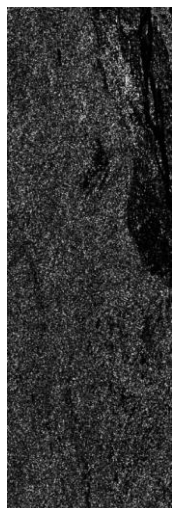
ФОТО: А. Азарова



Респ. Саха (Якутия)

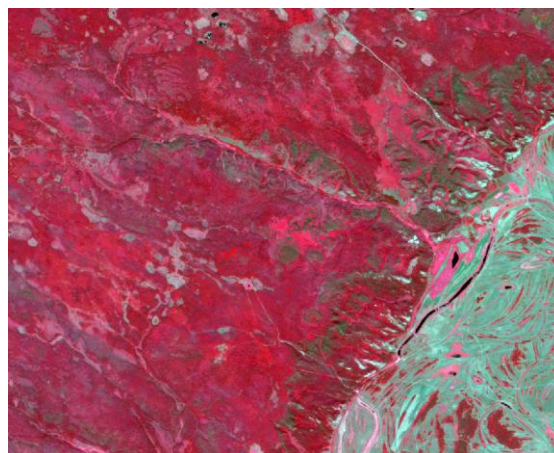


РЛ снимок  
ALOS-2 PALSAR



28.07.2019

Оптические  
снимки  
Sentinel-2 MSI

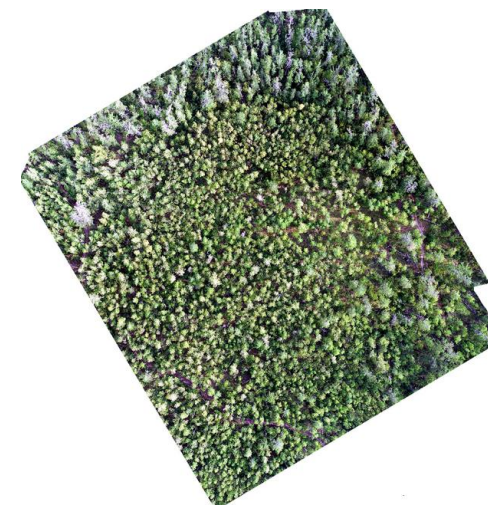


26.07.2019

Полевые  
описания  
2019 г.

| Описание  | дата               | номер      | Размер     | Площадь   |  |  |  |
|---|--------------------|------------|------------|-----------|--|--|--|
| S01   | 27.07.2019         |            | 20x20      | 20x20     |  |  |  |
| Рельеф  |                    |            |            |           |  |  |  |
| Слабонаклонная поверхность 3-4° речной террасы северо-северо-восточной экспозиции |                    |            |            |           |  |  |  |
| Древостой (лиственный лес 10Л)  |                    |            |            |           |  |  |  |
| Степень сомкнутости крон  |                    |            |            |           |  |  |  |
| 35%   |                    |            |            |           |  |  |  |
| Название ассоциации   |                    |            |            |           |  |  |  |
| Бруснично-арктоусовый шиповниковый лиственный лес с подростом                     |                    |            |            |           |  |  |  |
| Номер   | Количество стволов | Порода     | Диаметр, м | Высота, м |  |  |  |
| 1   | 1,0                | ольховник  | 2,1        | 3,7       |  |  |  |
| 2   | 4,0                | ольховник  | 1,8        | 3,9       |  |  |  |
|   |                    |            | 2,2        | 4,6       |  |  |  |
|   |                    |            | 2,4        | 3,9       |  |  |  |
|   |                    |            | 2,3        | 4,5       |  |  |  |
| 3   | 1,0                | лиственнич | 24,5       | 17,2      |  |  |  |
| 4   | 1,0                | лиственнич | 27,5       | 19,0      |  |  |  |
| 5   | 1,0                | лиственнич | 24,0       | 19,0      |  |  |  |
| 6   | 1,0                | лиственнич | 8,2        | 6,7       |  |  |  |
| 7   | 1,0                | лиственнич | 21,9       | 16,2      |  |  |  |
| 8   | 1,0                | лиственнич | 20,7       | 17,4      |  |  |  |
| 9   | 1,0                | лиственнич | 20,0       | 13,6      |  |  |  |
| 10  | 1,0                | лиственнич | 21,0       | 17,0      |  |  |  |
| 11  | 1,0                | ива        | 2,9        | 4,9       |  |  |  |
| 12  | 1,0                | ива        | 4,1        | 3,7       |  |  |  |
| 13  | 1,0                | ива        | 2,6        | 5,2       |  |  |  |
| 14  | 1,0                | береза     | 2,4        | 4,6       |  |  |  |
| 15  | 1,0                | береза     | 1,8        | 3,5       |  |  |  |

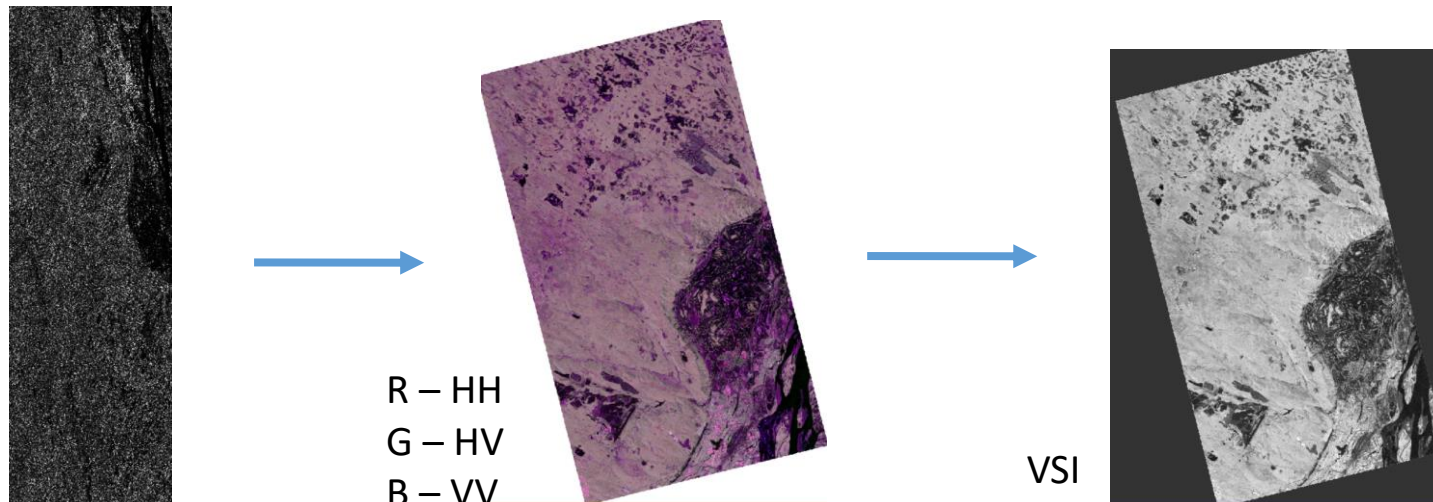
Данные  
съёмки с БПЛА



# ALOS-2 PALSAR

|             |                |
|-------------|----------------|
| Поляризации | HH, HV, VH, VV |
| Длина волны | L-band         |

## Предварительная обработка



- Уменьшение охвата
- Радиометрическая калибровка
- Пересчет в дБ
- Ортотрансформирование (с ArcticDEM, 10 м)
- Фильтр спекл-шума

- Расчет поляриметрических параметров (индексы и отношения)

$$RVI = \text{Radar Veg. Index} = \frac{8 \cdot HV}{HH + VV + 2 \cdot HV}$$

$$RFDI = \text{Radar Forest Degradation Index} = \frac{HH - HV}{HH + HV}$$

$$BMI = \text{Biomass Index} = \frac{HH + VV}{2}$$

$$CSI = \text{Canopy Structure Index} = \frac{VV}{VV + HH}$$

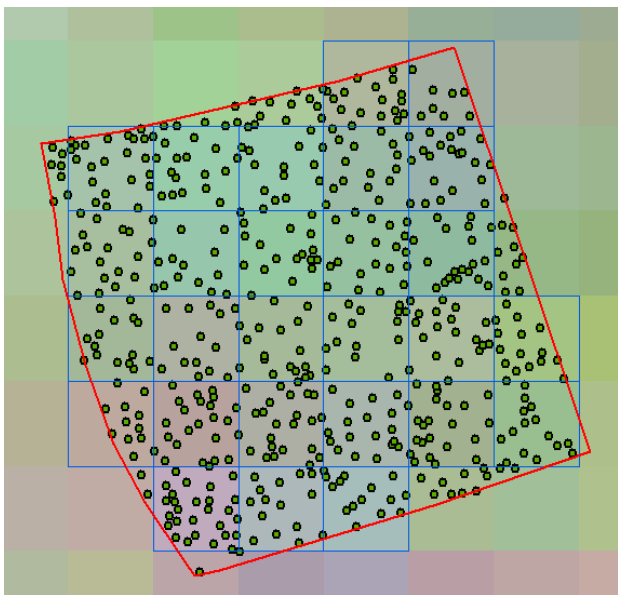
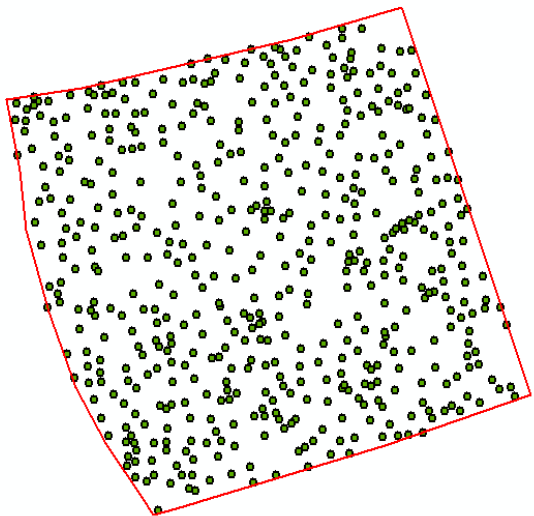
$$VSI = \text{Volume Scattering Index} = \frac{2 \cdot HV}{HH} + 2 \cdot HV + VV$$

HH/VV отношение

HH/HV отношение

VV/VH отношение

# Работа с БПЛА и наземными данными



- БПЛА: отдельные деревья и запасы древесины для каждого (на основе полевых измерений)
- РЛ данные: сигналы в 4 поляризациях, индексы и отношения



**Регулярная сетка Fishnet,**  
1 ячейка = 1 пикс (10 м)

- Суммирование запасов внутри каждой ячейки

# Регрессионный анализ

| Площадка | Формула  |
|----------|----------|
| S01      | 10 Л     |
| S02      | 10 Б + Л |
| S03      | 5 Л 5 Б  |
| S04      | 10 С + Л |
| S05      | 10 Л + Б |

Количество  
наблюдений: 140

- без разделения по породам

|          | R2    | p-value <0,05 |
|----------|-------|---------------|
| HH_GSV   | 0,119 | +             |
| HV_GSV   | 0,029 | +             |
| VH_GSV   | 0,017 | -             |
| VV_GSV   | 0,039 | +             |
| RVI_GSV  | 0,050 | +             |
| RFDI_GSV | 0,216 | +             |
| BMI_GSV  | 0,010 | -             |
| CSI_GSV  | 0,142 | +             |
| VSI_GSV  | 0,031 | +             |
| HHVV_GSV | 0,140 | +             |
| HHHV_GSV | 0,211 | +             |
| VVH_GSV  | 0,010 | -             |

\*p-value «+» это p-value < 0,05

Зависимость невысока

# Регрессионный анализ

| Площадка | Формула  |
|----------|----------|
| S01      | 10 Л     |
| S02      | 10 Б + Л |
| S03      | 5 Л 5 Б  |
| S04      | 10 С + Л |
| S05      | 10 Л + Б |

- По площадкам

Количество наблюдений:  
16-17 на каждую площадку

| s1s5    |       |         | s1      |       |         | s5       |       |         |
|---------|-------|---------|---------|-------|---------|----------|-------|---------|
| 10 Л    | R2    | p-value | 10 Л    | R2    | p-value | 10 Л + Б | R2    | p-value |
| hh_gsv  | 0,002 | -       | hh_gsv  | 0,009 | -       | hh_gsv   | 0,114 | -       |
| HV_GSV  | 0,013 | -       | HV_GSV  | 0,121 | -       | HV_GSV   | 0,269 | +       |
| VH_GSV  | 0,002 | -       | VH_GSV  | 0,142 | -       | VH_GSV   | 0,198 | -       |
| VV_GSV  | 0,011 | -       | VV_GSV  | 0,035 | -       | VV_GSV   | 0,153 | -       |
|         |       |         |         |       |         |          |       |         |
|         |       |         |         |       |         |          |       |         |
| s2      |       |         | s3      |       |         | s4       |       |         |
| 10 Б    | R2    | p-value | 5Л 5Б   | R2    | p-value | 10 С + Л | R2    | p-value |
| hh_gsv  | 0,096 | -       | hh_gsv  | 0,001 | -       | hh_gsv   | 0,367 | +       |
| HV_GSV  | 0,056 | -       | HV_GSV  | 0,392 | +       | HV_GSV   | 0,082 | -       |
| VH_GSV  | 0,010 | -       | VH_GSV  | 0,490 | +       | VH_GSV   | 0,035 | -       |
| VV_GSV  | 0,004 | -       | VV_GSV  | 0,343 | +       | VV_GSV   | 0,049 | -       |
| VSI_GSV |       |         | VSI_GSV | 0,099 | -       | VSI_GSV  |       |         |
|         |       |         |         |       |         |          |       |         |

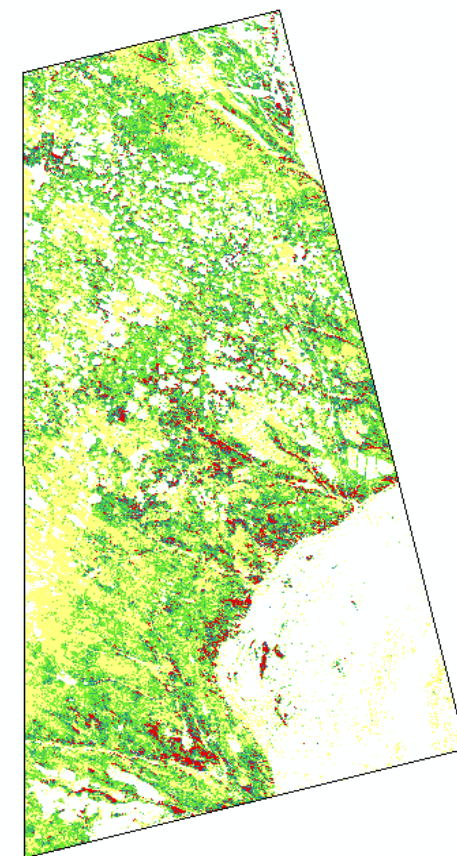
\*p-value «+» это p-value < 0,05

Зависимость невысока



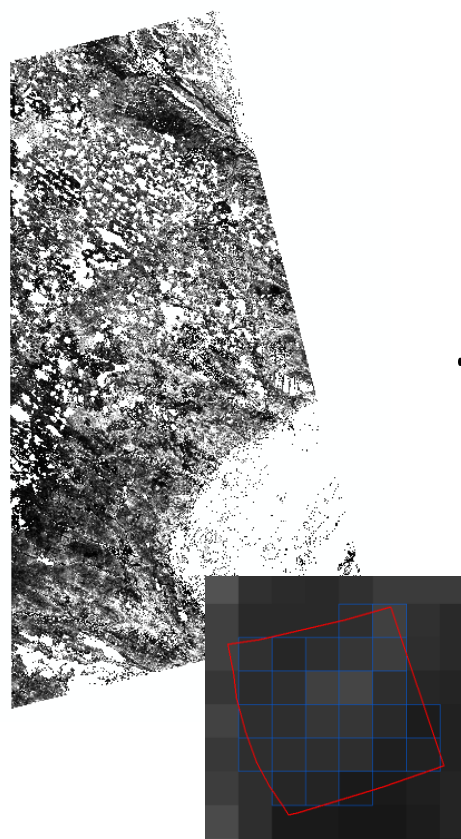
# Запасы древесины на основе S2

- Снимки Sentinel-2 MSI за зимний и летний периоды (17.04.2018, 2.07.2018) – классификация по породам
- Полевые измерения запасов древесины
- Поиск модели регрессионной зависимости между запасами древесины и каналами летнего изображения и индексами
- Вычисление раstra запасов древесины



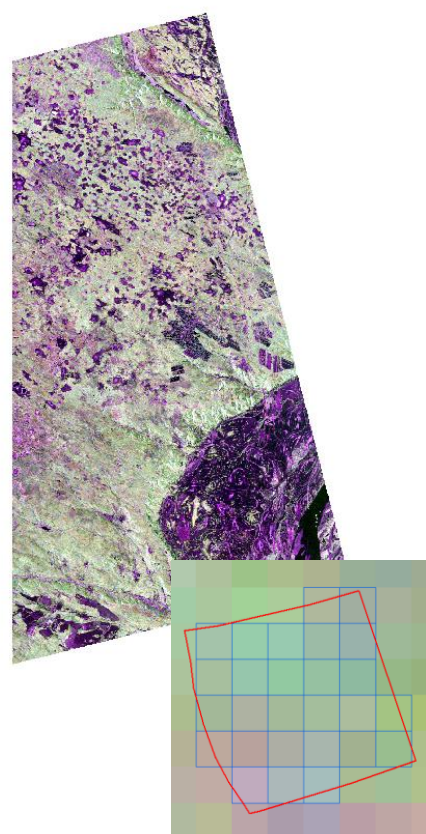
$$R^2 = 0,68$$

# Работа с растром запасов древесины



Запасы  
древесины

+



ALOS-2 PALSAR

=



Совмещение



Регрессионный  
анализ

# Регрессионный анализ

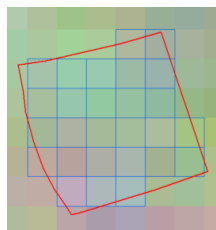
| Площадка | Формула  |
|----------|----------|
| S01      | 10 Л     |
| S02      | 10 Б + Л |
| S03      | 5 Л 5 Б  |
| S04      | 10 С + Л |
| S05      | 10 Л + Б |

Количество  
наблюдений: 140

- без разделения по породам

|          | R2    | p-value <0,05 |
|----------|-------|---------------|
| HH_GSV   | 0,154 | +             |
| HV_GSV   | 0,134 | +             |
| VH_GSV   | 0,159 | +             |
| VV_GSV   | 0,001 | -             |
| RVI_GSV  | 0,003 | -             |
| RFDI_GSV | 0,026 | -             |
| BMI_GSV  | 0,093 | +             |
| CSI_GSV  | 0,068 | +             |
| VSI_GSV  | 0,137 | +             |
| HHVV_GSV | 0,076 | +             |
| HHHV_GSV | 0,028 | +             |
| VVVH_GSV | 0,042 | +             |

\*p-value «+» это p-value < 0,05



Зависимость невысока

# Регрессионный анализ

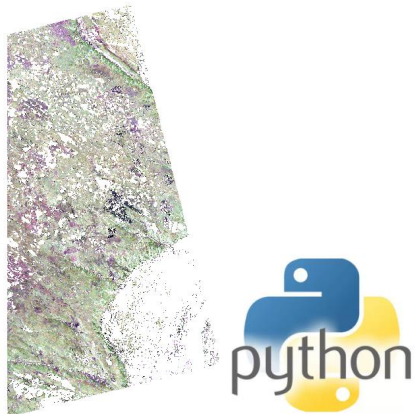
| Площадка | Формула  |
|----------|----------|
| S01      | 10 Л     |
| S02      | 10 Б + Л |
| S03      | 5 Л 5 Б  |
| S04      | 10 С + Л |
| S05      | 10 Л + Б |

Количество наблюдений:  $\approx 5,5$  млн

- без разделения по породам

|          | R2           | p-value <0,05 |
|----------|--------------|---------------|
| HH_GSV   | 0,180        | +             |
| HV_GSV   | <b>0,312</b> | +             |
| VH_GSV   | <b>0,311</b> | +             |
| VV_GSV   | 0,125        | +             |
| RVI_GSV  | 0,034        | +             |
| RFDI_GSV | 0,000        | -             |
| BMI_GSV  | 0,173        | +             |
| CSI_GSV  | 0,012        | +             |
| VSI_GSV  | 0,045        | +             |
| HHVV_GSV | 0,000        | -             |
| HHHV_GSV | 0,000        | -             |
| VVHV_GSV | 0,081        | +             |

\*p-value «+» это p-value < 0,05



Зависимость невысока

# Результаты

- Регрессионная зависимость между запасами древесины и сигналами радиолокационного снимка довольно низка
- На степень зависимости на уровне площадок может оказывать значимое влияние спекл-шум
- Низкие значения могут быть связаны с разреженностью леса (сомкнутость крон – 30-50%): деревья не единственные участники формирования отраженного сигнала
- Ищем новые решения: многовременные данные, использование оптических данных сверхвысокого разрешения



# Спасибо!

Работа выполнена по российско-британскому проекту «Мультиплатформенный дистанционный мониторинг воздействия изменения климата на северные леса России». Проект финансируют Британский Совет (грант Institutional Links № 352397111) и Министерство науки и высшего образования РФ (уникальный идентификатор проекта RFMEFI61618X0099)

Отдельная благодарность всем, кто участвовал в полевом сборе данных и последующей их обработке, Г. Маршаллу за предоставление метеоданных для Кольского полуострова, Р. Автару за предоставление снимка ALOS-2 PALSAR и А. Гизатуллину за помощь в обработке данных

