



НАУЧНЫЕ ДЕБАТЫ:

КАКОЙ ДОЛЖНА БЫТЬ НАЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА
ПУЛОВ УГЛЕРОДА И ПОТОКОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ
В НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ РОССИИ?

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ОТДЕЛЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ НАУК РАН
НАУЧНЫЙ СОВЕТ РАН ПО ЛЕСУ
НАУЧНЫЙ СОВЕТ РАН ПО ПОЧВОВЕДЕНИЮ
ЦЕНТР ПО ПРОБЛЕМАМ ЭКОЛОГИИ И ПРОДУКТИВНОСТИ ЛЕСОВ РАН



НАЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА КЛИМАТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ



НАЦИОНАЛЬНАЯ СЕТЬ ТЕСТОВЫХ ПОЛИГОНОВ ОЦЕНКИ ПУЛОВ УГЛЕРОДА В РАСТИТЕЛЬНОСТИ И ПОЧВАХ КАК ОСНОВА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БЮДЖЕТА УГЛЕРОДА НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ РОССИИ: ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЕТИ, ТИПЫ ПОЛИГОНОВ, ОСОБЕННОСТИ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НА ПОЛИГОНАХ ИНТЕНСИВНОГО УРОВНЯ

Ершов Д.В., Гаврилюк Е.А., Белова Е.И., Подольская Е.С., Князева С.В., Королева Н.В.,
Сочилова Е.Н., Ковганко К.А., Воробьев К.В., Труфанов А.В., Соколов А.Ю.

Лаборатория мониторинга лесных экосистем
Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов
Российской академии наук

г. Москва
9 ноября 2023 г.

ПЛАН ПРЕЗЕНТАЦИИ

1. Проектирование национальной сети мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов в наземных экосистемах
2. Состав данных на тестовых полигонах интенсивного уровня I типа
3. Методика проектирования сети наземных пробных площадей на тестовом полигоне интенсивного уровня I типа
(докладчик: Егор Александрович Гаврилюк)

1. Проектирование национальной сети мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов в наземных экосистемах

Методы и подходы, проект сети для разных сценариев
погрешности оценки пулов углерода

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕТИ

Разработать методику проектирования сети наземных тестовых полигонов для оценки бюджета углерода в наземных экосистемах на национальном уровне и получить проект размещения полигонов по территории России в трех вариантах:

(1) Вариант - ***пространственно распределенный*** с учетом разнообразия, обеспечивающий полную пространственную, типологическую и статистическую репрезентативность сети с учетом всего разнообразия локальных природных условий страны.

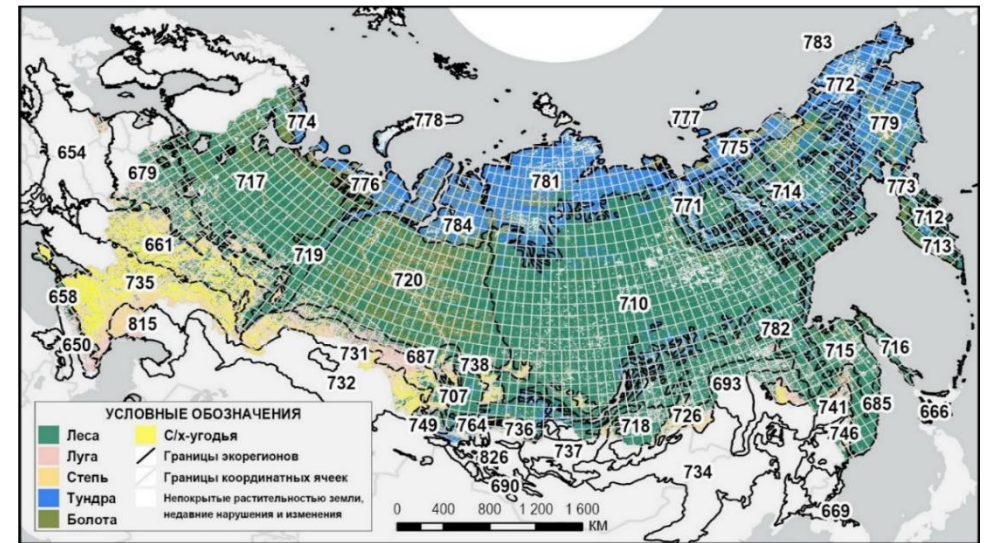
(2) Вариант - ***пространственный репрезентативный***, позволяющий значительно сократить общее число полигонов относительно первого варианта за счет отказа от их закладки в малопредставленных типах растительности наземных экосистем (для конкретной территории).

(3) Вариант - ***статистически репрезентативный***, подразумевающий сокращение общего количества полигонов до минимально необходимого объема выборки для достижения заданной погрешности последующих оценок общего пула углерода в наземных экосистемах страны. Третий вариант сохраняет типологическую и *статистическую репрезентативность*, однако не обеспечивает полного охвата территории по регулярной схеме, по сравнению с двумя предыдущими вариантами.

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕТИ

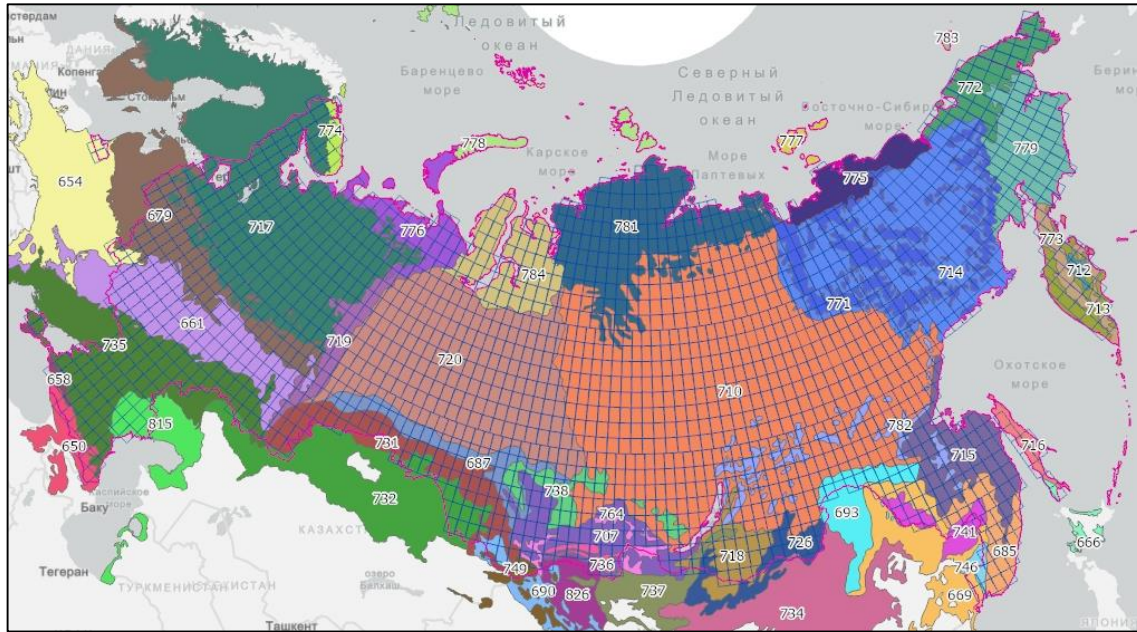
1. Определение мест размещения тестовых полигонов. Пространственный анализ пулов углерода растительности и почв в границах регулярной сети для определения потенциальных мест размещения тестовых полигонов в основных (характерных) типах наземной растительности
2. Оптимизация количества тестовых полигонов. Статистическая оценка оптимального количества тестовых полигонов на уровне России и типов наземной растительности для разных сценариев точности определения запасов углерода в растительности и почвах

Регулярная сетка переменного размера (1-4°)

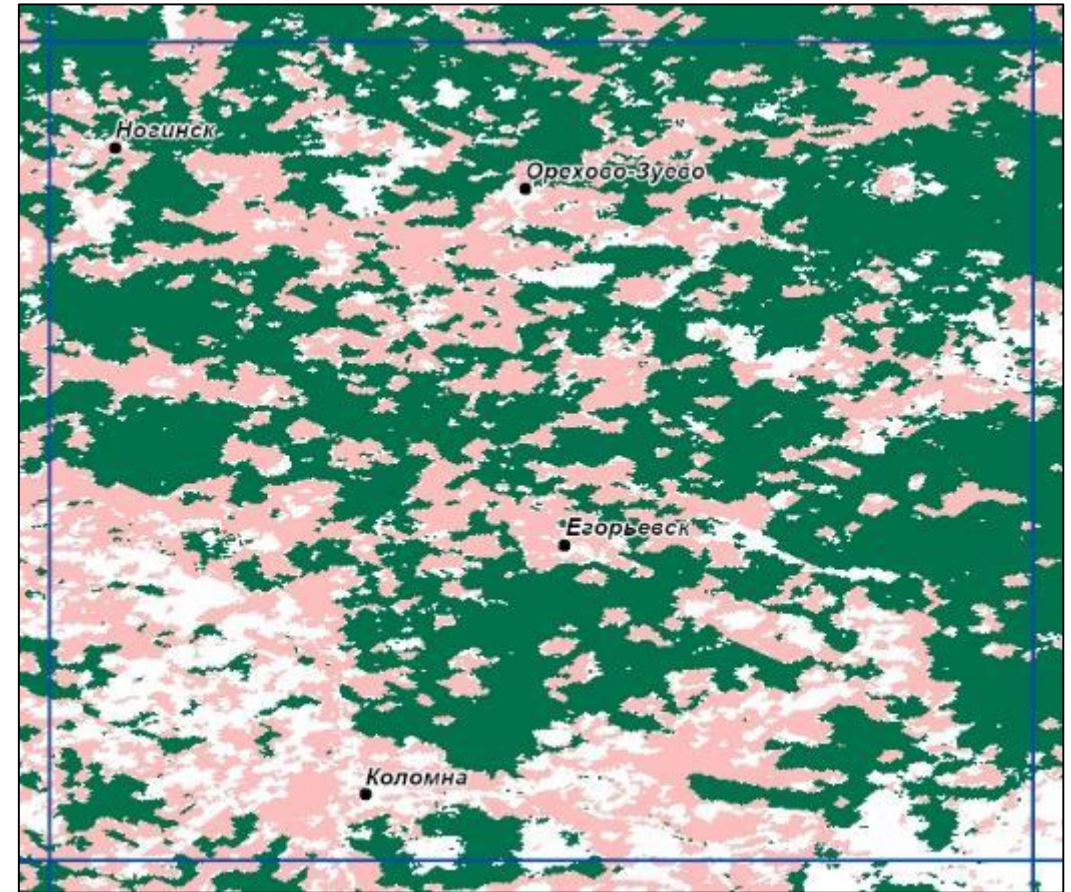


1.1 Определение и локализация характерных типов растительности

1) Привязка ячеек регулярной сети к экорегионам



3) Определение характерных типов растительности для каждой ячейки сети



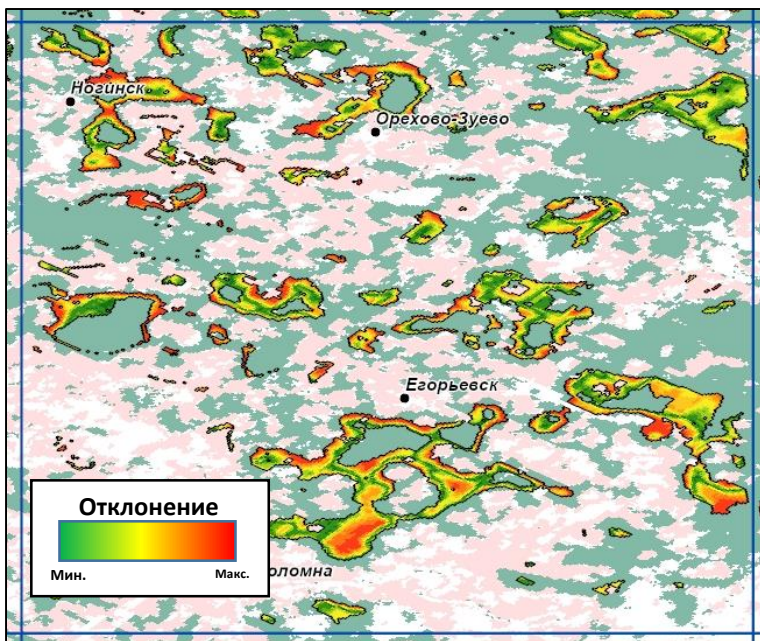
2) Определение характерных типов растительности для каждого экорегиона

ID	Название	Лес	Луг	Степь	Тундра	Болота	С/Х
...
717	Скандинавско-Русская тайга	+	+	-	-	+	-
735	Понтийская степь	-	+	+	-	-	+
774	Кольская тундра	-	-	-	+	+	-
...

Пример: ячейка №1524 (56° С.Ш. 38.4 В.Д.)
 Экорегион – **Сарматские смешанные леса**
 Характерные типы растительности: **леса, луга**
Класс болот исключены из-за площади (< 5%)

1.2 Оценка распределения углерода для каждого типа наземной растительности в ячейке сети

- 1) Определение значений среднего и коэффициента вариации для общего запаса углерода, а также доли почвенного углерода в общем запасе на уровне ячейки сети
- 2) Определение зон для расположения центров потенциальных тестовых полигонов (в границах квадратных участков площадью около 16 км²) с локальными характеристиками среднего запаса и доли почвенного углерода близкими к глобальным
- 3) Классификация участков (пикселей) выделенных зон по степени отклонения значений локального коэффициента вариации общего запаса углерода от интегрального значения в ячейке регулярной сети

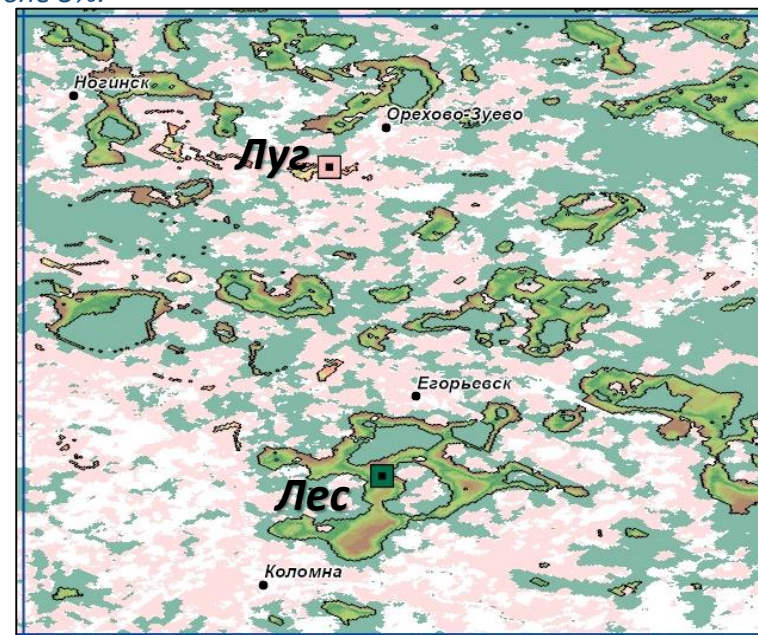


1.3 Определение формально наилучшего местоположения центра тестового полигона в ячейке

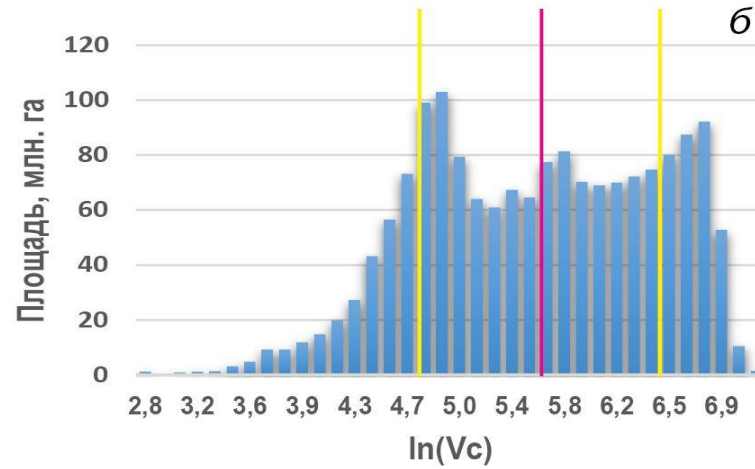
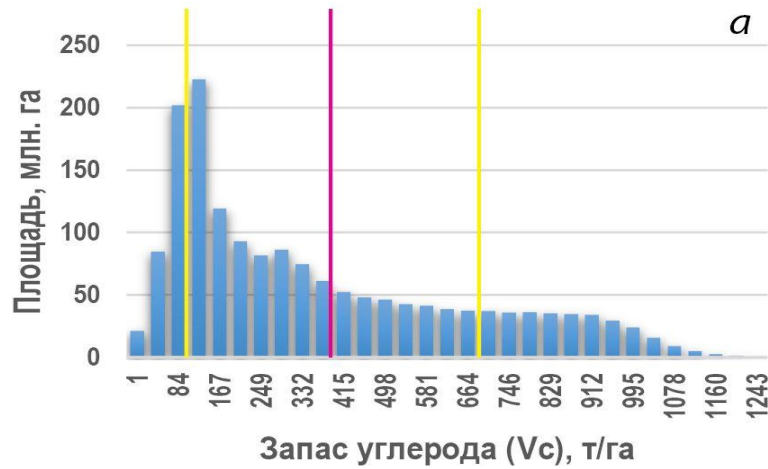
Критерии наилучшего местоположения:

- 1) Минимальное отклонение локального значения коэффициента вариации общего запаса углерода от его глобального значения на уровне ячейки.
- 2) Минимальная удаленность от ближайшего населенного пункта (но не ближе 3 км)

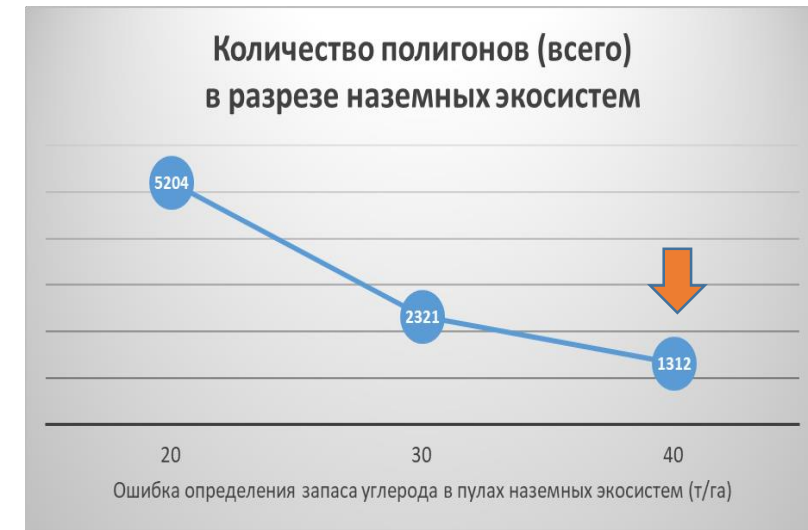
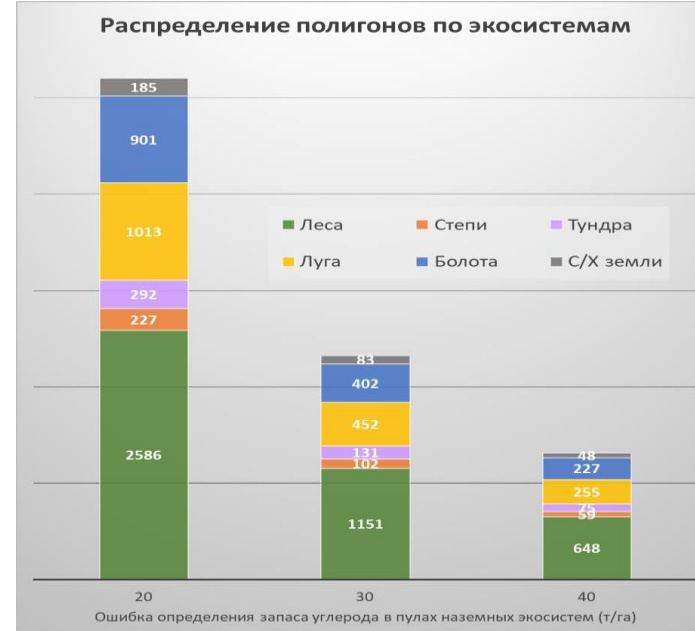
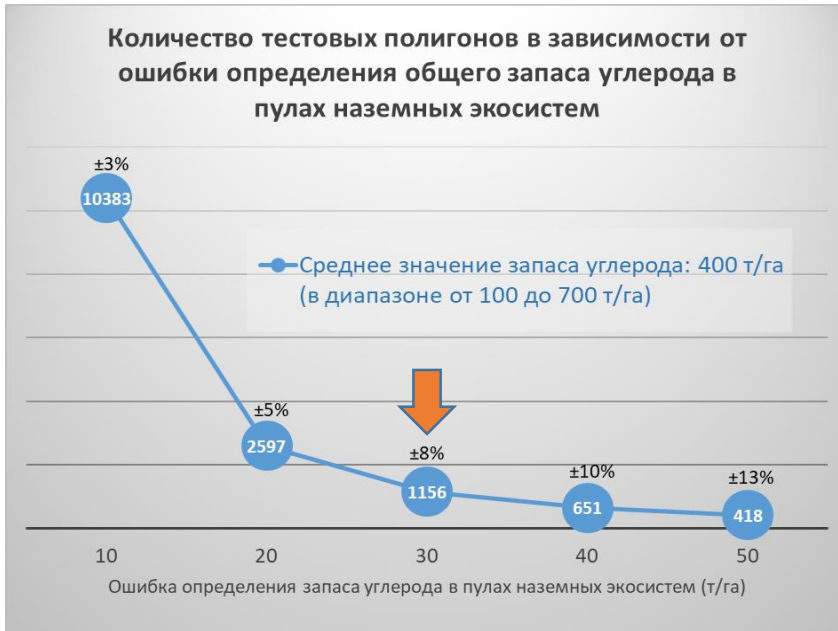
Применение изложенных выше шагов на первом этапе позволяет нам сформировать пространственно-распределенную псевдо-регулярную сеть, обеспечивающую охват всех экорегионов и типов растительности с учетом разнообразия локальных условий, т.е. **пространственный с учетом разнообразия**.
 Вариант 2 – **пространственный репрезентативный**. Для лесов, тундр, степей, лугов и сельхозугодий порог представленности (доли площади) на уровне 10%, а для болот на уровне 5%.



2. ОПТИМИЗАЦИЯ КОЛИЧЕСТВА ТЕСТОВЫХ ПОЛИГОНОВ



В границах России и наземных экосистем (характерных типов наземной растительности) для суммарного запаса всех пулов углерода проведены t-тесты мощности с целью определения необходимого числа измерений для оценки среднего показателя запасов углерода с заданной точностью (ошибкой)⁽¹⁾.



⁽¹⁾ Метод оценки количества измерений относительно среднего значения распределения показателя https://en.wikipedia.org/wiki/Sample_size_determination

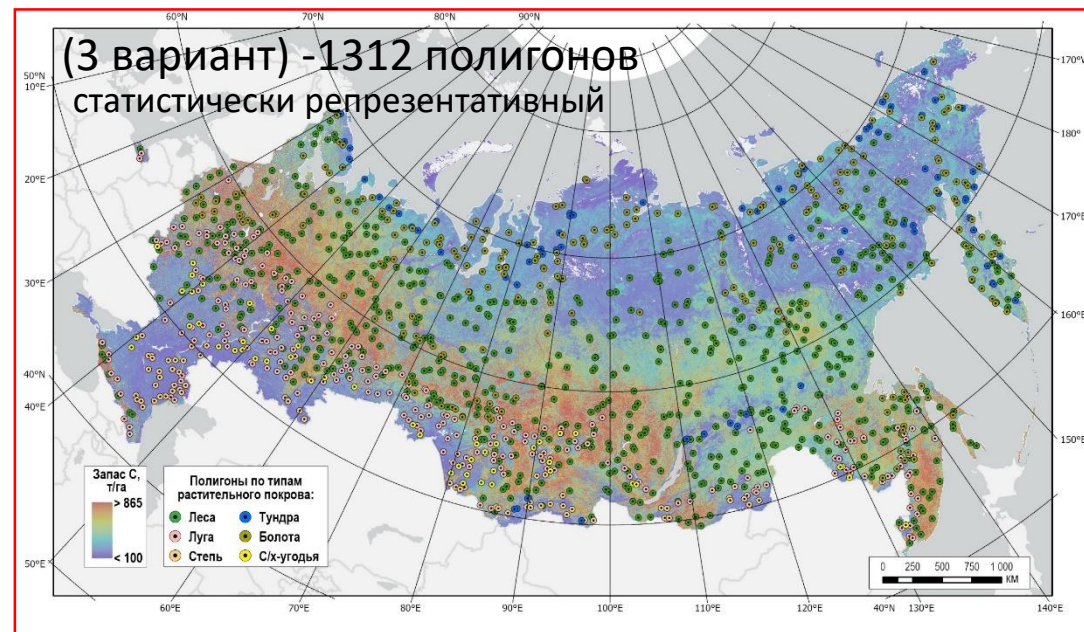
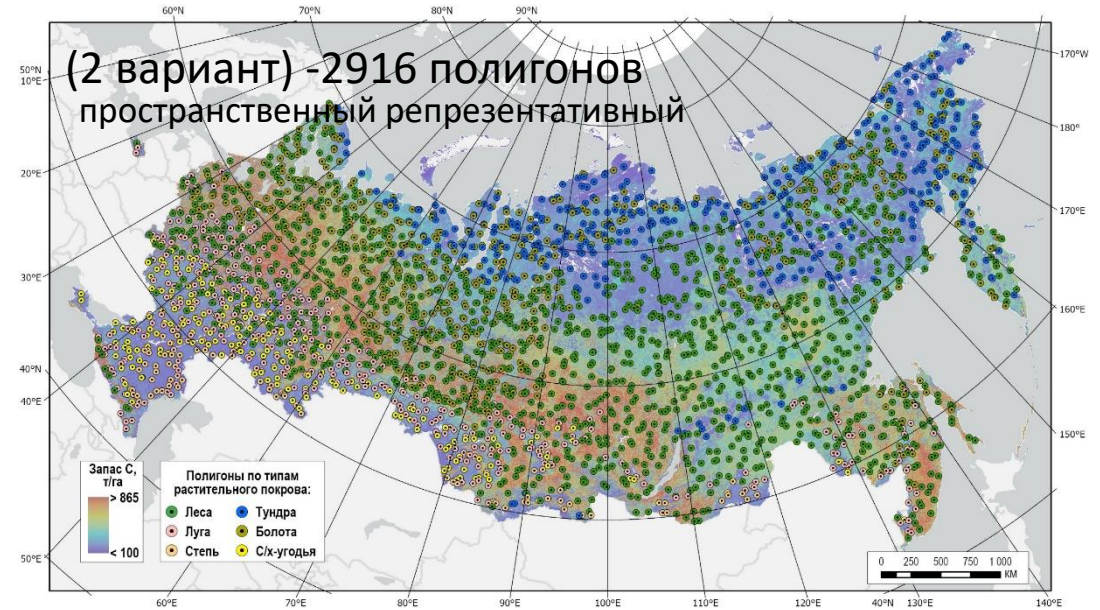
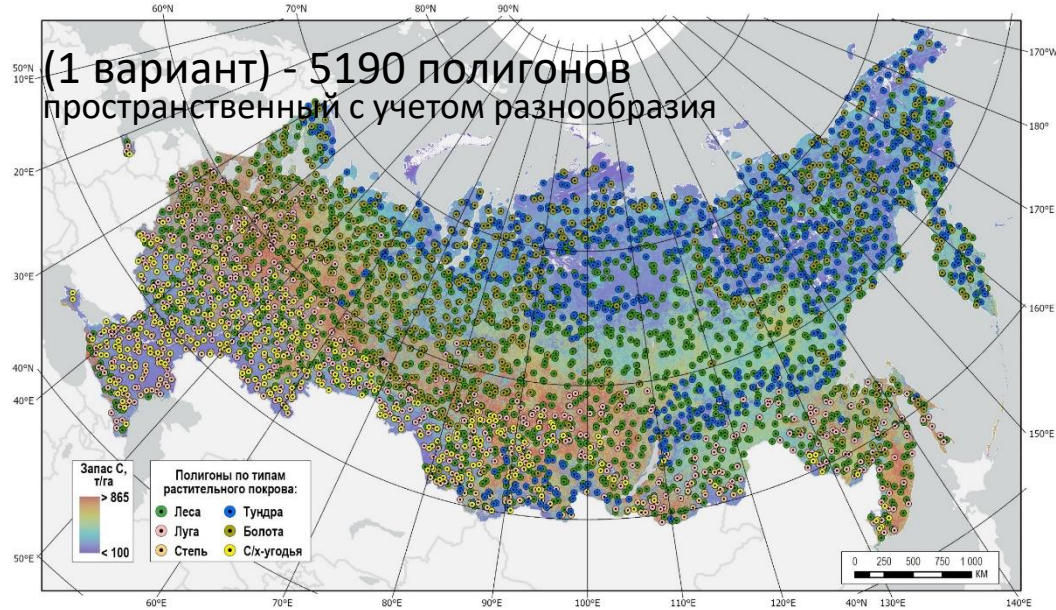
РЕЗУЛЬТАТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕТИ ТЕСТОВЫХ ПОЛИГОНОВ

- (1) Вариант (пространственный с учетом разнообразия): 5190 полигонов с точностью оценки общего пула углерода по стране не хуже **±20 т/га** (4.8% от среднего значения углерода)
- (2) Вариант (пространственный репрезентативный): 2916 полигонов (на 44% меньше, чем в первом варианте), которые обеспечивают точность на уровне **±27 т/га** (6.4%)
- (3) Вариант (статистически репрезентативный): 1312 полигонов, обеспечивающих погрешность **±42 т/га** (10%)

Распределение тестовых полигонов по основным типам растительного покрова

Вариант сети	Тип растительного покрова						Всего полигонов
	лес	тундра	луг	степь	с/х-угодья	болота	
1	1309	379	1506	249	256	1491	5190
2	1288	370	400	72	192	594	2916
3	648	75	255	59	48	227	1312

Три варианта размещения тестовых полигонов



ТЕСТОВЫЕ ПОЛИГОНЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ СЕТИ ПО УРОВНЯМ СБОРА ДАННЫХ

Полигон интенсивного уровня I типа
(пулы углерода)
создают участники консорциума

Полигон экстенсивного уровня
(пулы углерода)
*создает ФГБУ «Рослесинфорг»
участник консорциума*

Полигон интенсивного уровня
II типа – вышки (потoki)
*создают участники
консорциума*

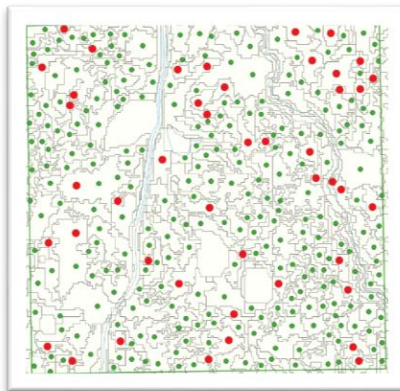


Сбор данных на полигоне:

- 1) Спутниковые данные (10-30 м)
- 2) АФС/МАФС и ВЛС данные
- 3) Экспресс оценка на 400 РКПП:
таксация, геоботаника, почвы
- 4) Детальная оценка на 30 ППП:
таксация, геоботанические и
почвенные изыскания



2 км



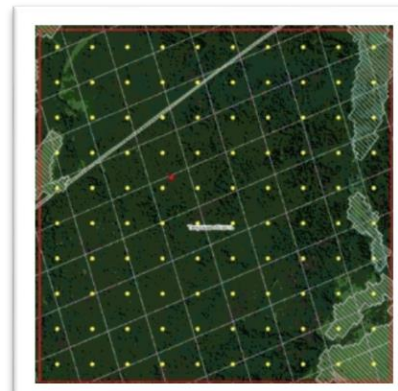
2 км

Сбор данных на полигоне:

- 1) Спутниковые данные (230 м)
- 2) Таксация на 100 РКПП
- 3) Детальная оценка на 1 ППП
(ГИЛ): таксация,
геоботанические и почвенные
изыскания



2 км



2 км

Постоянные пробные
площади (БГЦ) вне полигонов
с детальной таксацией,
геоботаникой и почвенными
изысканиями
*(создают участники
консорциума)*

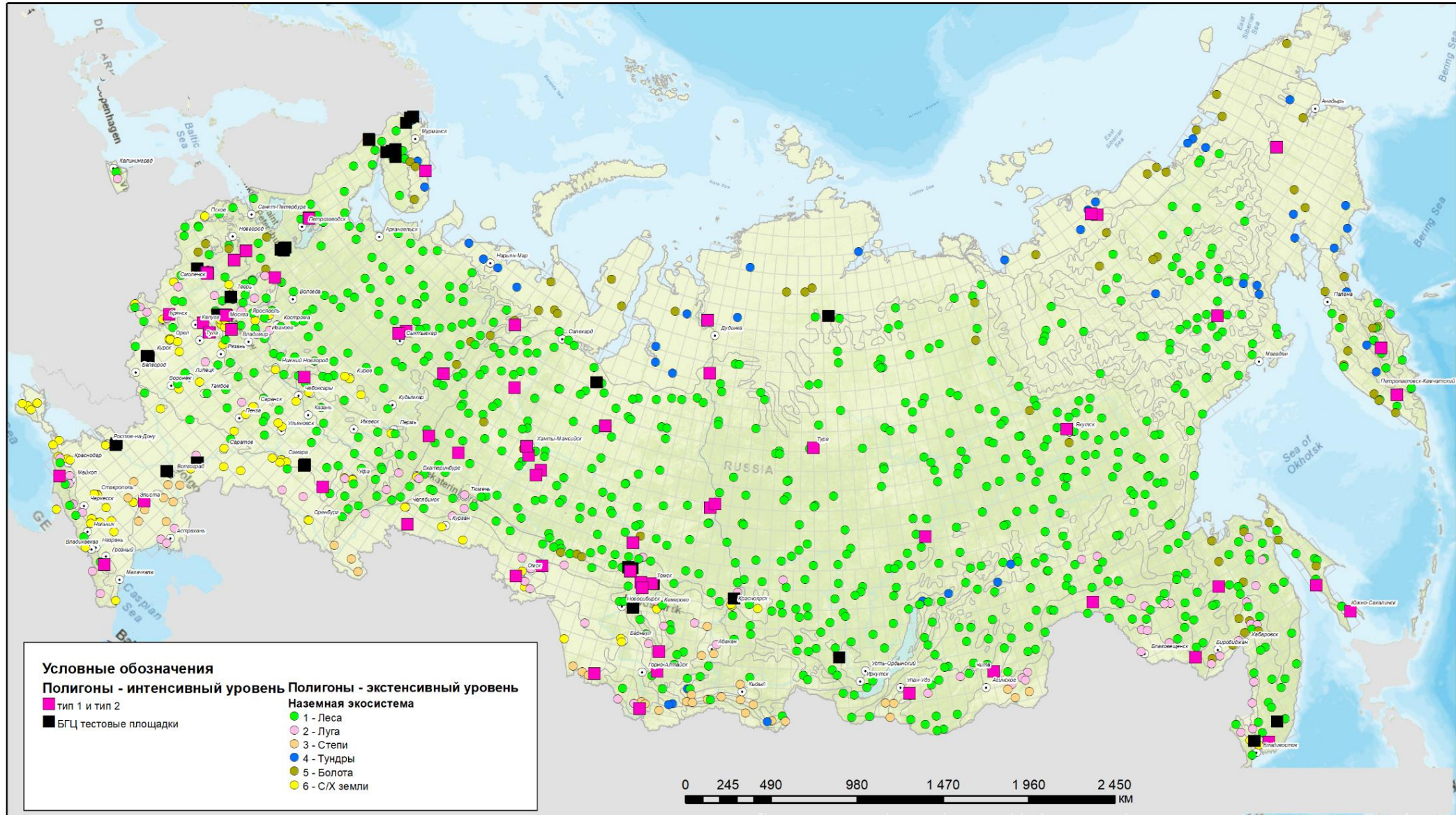


Распределение полигонов разного уровня по типам экосистем

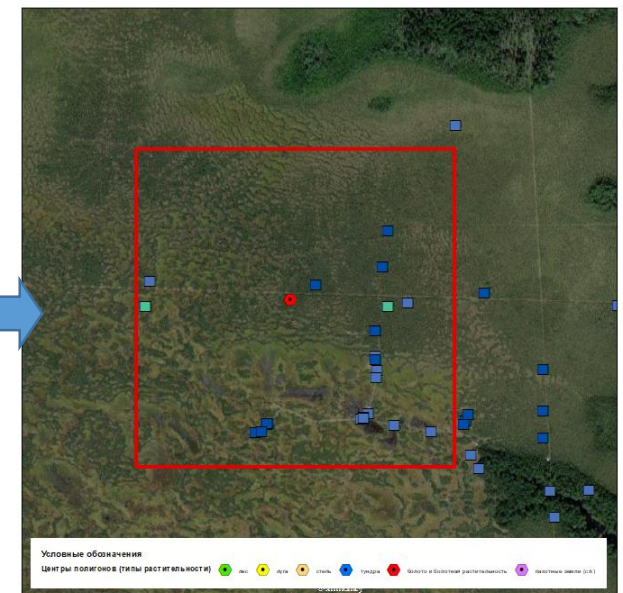
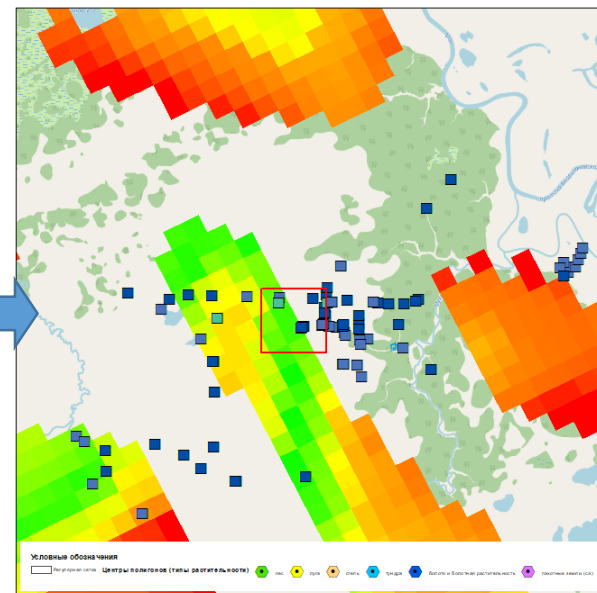
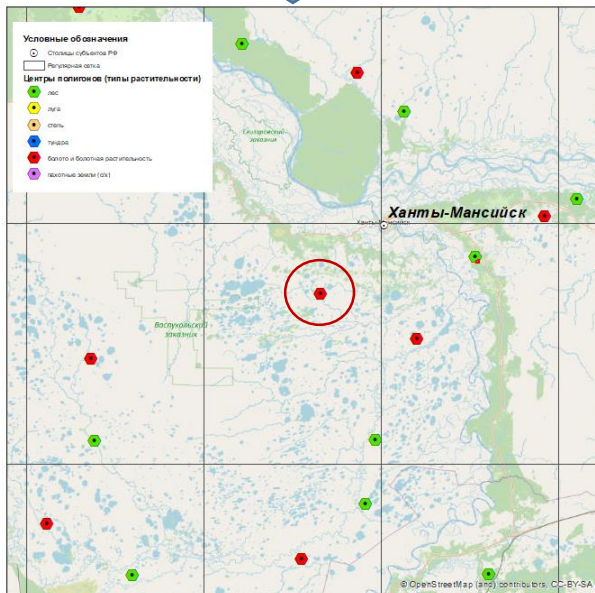
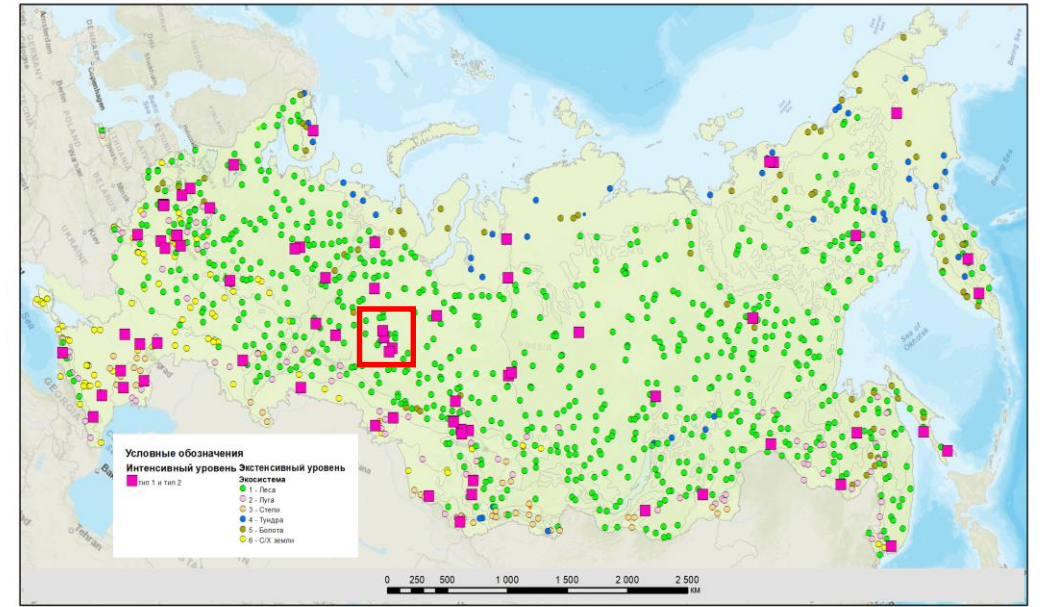
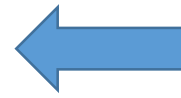
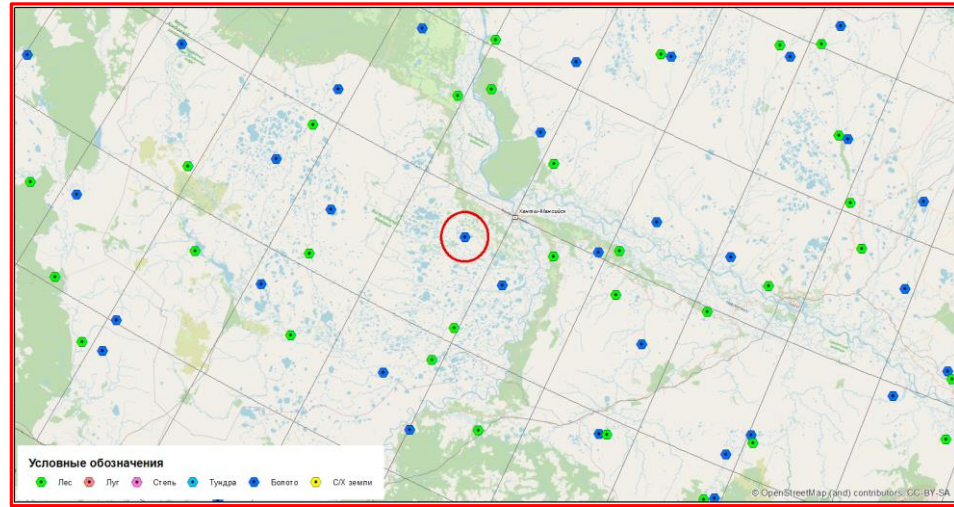
Тип экосистем	Углерод		Тестовые полигоны				Ошибка от среднего значения	
	Среднее, т/га	SD, т/га	Интенсивные	Экстенсивные	Вышки	Всего	Абсолютная, т/га	в % от среднего
Россия	394	283	50	1232	50	1332	28	7,1
Лес	542	282	29	720	22	791	36	6,6
Лес нарушенный	NA*	NA	0	242	0	242	NA	NA
Болота	293	166	5	70	12	87	65	22,2
Тундра	197	94	4	40	3	47	50	25,4
Луга	260	176	7	75	0	82	71	27,3
Степь	125	83	5	35	3	43	47	37,7
С/х	139	75	0	50	0	50	39	28,1
Урбан (Н/П)	NA	NA	0	0	3	3	NA	NA
Принадлежность полигона (вышки) к типу экосистемы не определена	NA	NA	0	0	7	7	NA	NA

Примечание. NA* – оценка ошибок определения запаса углерода не проводилась

Проект сети тестовых полигонов после определения их типа и уровня сбора данных



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОГО МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ТЕСТОВОГО ПОЛИГОНА



2. Состав данных на тестовых полигонах интенсивного уровня I типа

Цифровая и мультиспектральная аэрофотосъемка и воздушное лазерное сканирование полигона

Экспресс оценка растительности и почв на круговых площадках

Детальная оценка растительности и почв на постоянных пробных площадках

Аппаратура и параметры съемки

ГЕОСКАН 201-RedEdge-MX/ Sony-RX1



- Средняя высота полета: 210 м;
- Продольное и поперечное перекрытие $P_x = 80\%$ и $P_y = 80\%$;
- Разрешение аэрофотоснимков:
- в RGB диапазоне 2,8 см/пикс.,
- в мультиспектральном – 14,5 см/пикс.;
- Средняя скорость полета воздушного судна: 22 м/с;
- Количество вылетов: 5 шт.
- Среднее количество снимков на полигон
 - АФС: 4 500 шт. (3 канала RGB)
 - МАФС: 25 000 шт. (5 каналов RGB, RE, NIR)

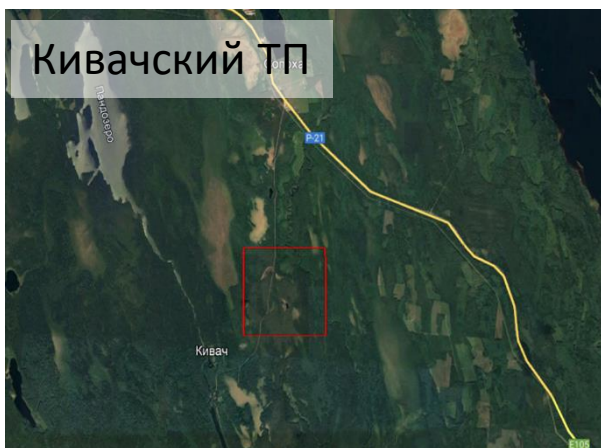
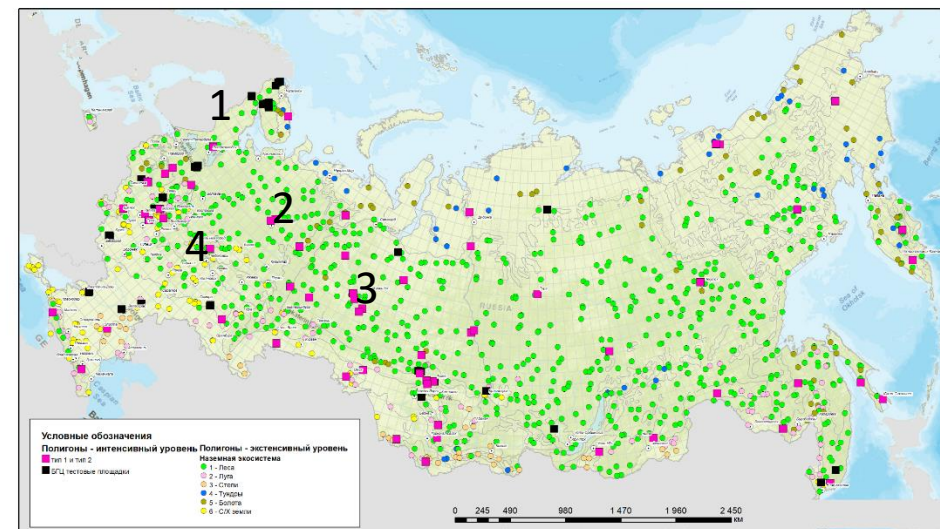
ГЕОСКАН 401-лидар (АГМ 1.2)



- Плотность точек: 20 - 60 шт./м²;
- Средняя высота полета: 100 м;
- FOV: 80°;
- Поперечное перекрытие: 20%;
- Базис: 180 м;
- Средняя скорость полета БВС: 10 м/с;
- Количество вылетов: 5 шт.

Полигоны и данные АФС/ВЛС 2023 года

Полигон	Субъект	Экосистема	Лето	Осень
1. Кивачский (ФИЦ КарНЦ РАН)	Карелия	Лес	АФС МАФС ВЛС	АФС МАФС
2. Ляльский (ИБ ФИЦ КомиНЦ РАН)	Коми	Лес		АФС МАФС ВЛС
3. Мухрино (ЮГУ)	ХМАО	Болото		АФС МАФС ВЛС
4. Шаранга (ЦЭПЛ РАН)	Нижегородская область	Лес		АФС МАФС ВЛС



Примеры продуктов АФС и ВЛС (Шарангский тестовый полигон)

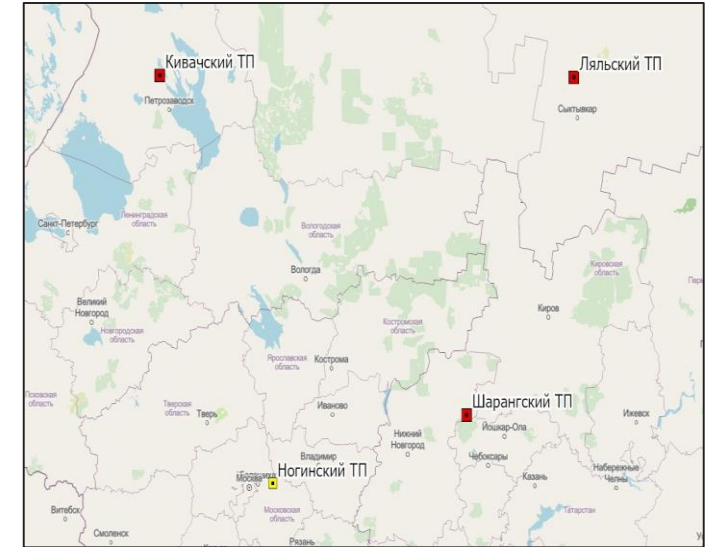
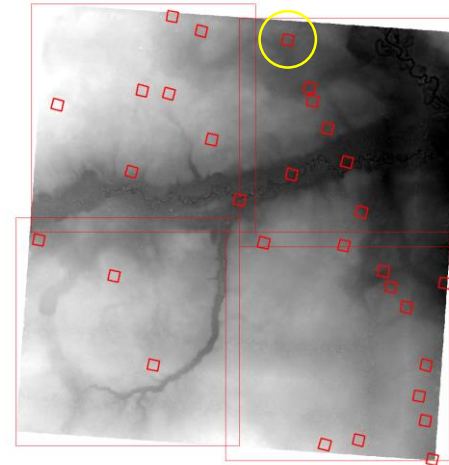
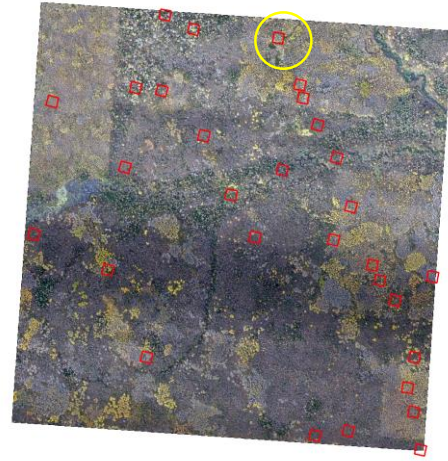
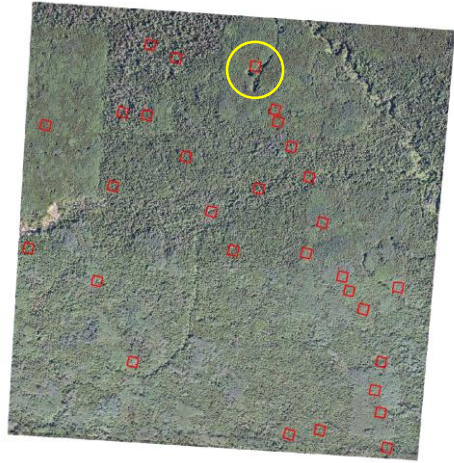
RGB ортофотопланы

Лето (АФС)

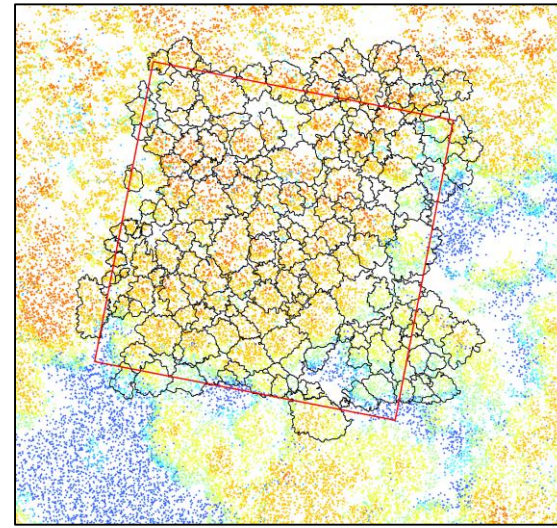
Осень (АФС)

ЦММ/ЦМР (лидар АГМ 1.2)

Расположение полигонов



Облако точек лазерного сканирования, классифицированные по высотам



- NE.las
- Data percentage: 0
- LAS point elevation
- 147,815 - 152,98
- 142,651 - 147,815
- 137,486 - 142,651
- 132,321 - 137,486
- 127,157 - 132,321
- 121,992 - 127,157
- 116,827 - 121,992
- 111,663 - 116,827
- 106,498 - 111,663

Рекогносцировка или наземная экспресс оценка характеристик древостоев методами производственной таксации

Сегменты (Sentinel-2, 10 м) и центры круговых площадок



Реласкопические площадки переменного радиуса

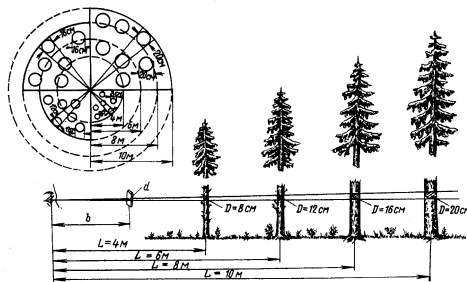
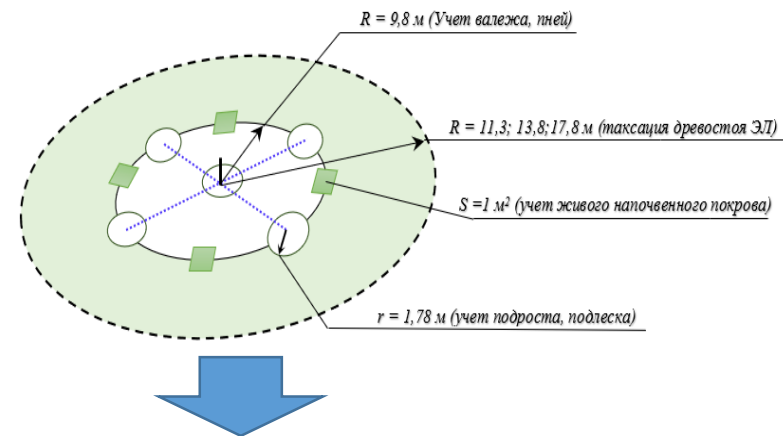
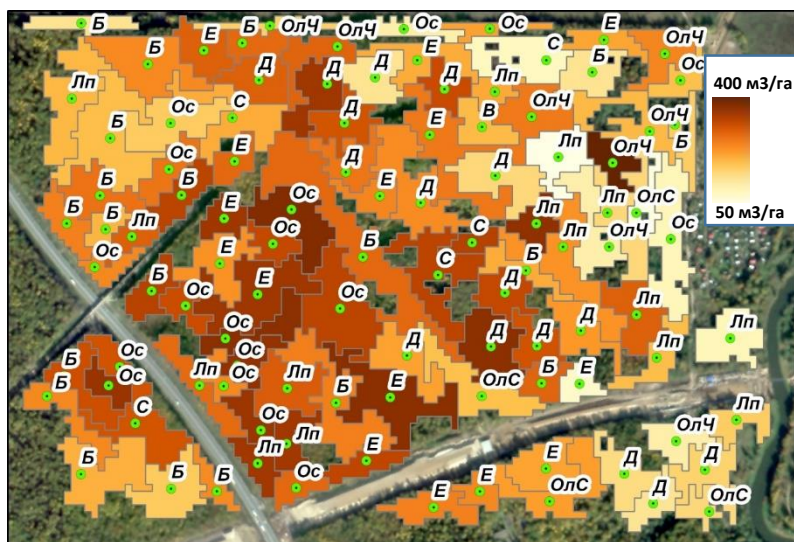


Схема учета растительности на площадке



Один из результатов: карта запасов древостоя в сегментах для проектирования постоянных пробных площадок



Учетные ведомости по элементам леса

Древесная порода	Количество жизнеспособного подроста по категориям крупности						А, лет
	до 0,5	0,6 - 1,5	1,6-2,5	2,6-3,5	3,6-4,5	4,6-5,5	
Е	1	3	6				15

Древесная порода	Количество (шт) по породам и высотам (м)						
	до 1,0	1,1 - 2,0	2,1 - 3,0	3,1 - 4,0	4,1 - 5,0	5,1 - 6,0	6,1 и >
Рб		3	2				
Мж		1					

Объект	Древесная порода	Длина, высота, м	Средний диаметр d [(d₁+d₂)/2], см	Диаметр гнилы, мм	Степень разложения	Тип гнили
в	Е	3	9	10	1 - слабая	заболонная
в	С	5	12	15	2 - средняя	твердая
в	Ос	10	20	20	3 - сильная	трухлявая
п	С	0,25	0	30	1 - слабая	заболонная
п	Е	0,40	0	0	2 - средняя	твердая
п	Б	0,35	0	55	3 - сильная	трухлявая

Элемент леса Сосна			Элемент леса Ель			Элемент леса Береза			
Средние значения модельных деревьев			Средние значения модельных деревьев			Средние значения модельных деревьев			
d13, см	h, см	A, лет	d13, см	h, см	A, лет	d13, см	h, см	A, лет	
40	29	140	20	21	90	48	29	80	
КТГ	Результаты измерений			Результаты измерений			Результаты измерений		
	1,0	0,5	Итого	1,0	0,5	Итого	1,0	0,5	Итого
Здоровые	1/6		6	1/5		5	1/3		3
Фаутные				1		0,5			
Дровяные	1		1	1		1	1		2
Сухостойные									
Итого	7		7	6	0,5	6,5	5		5

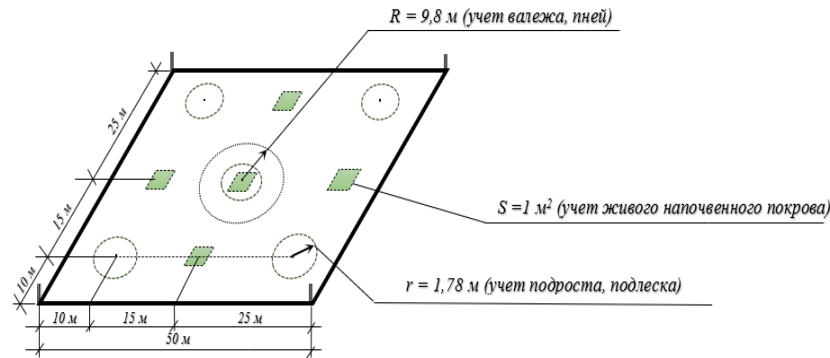
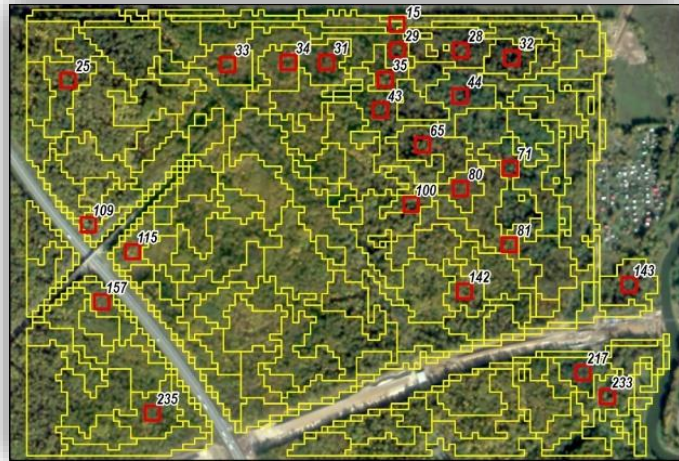
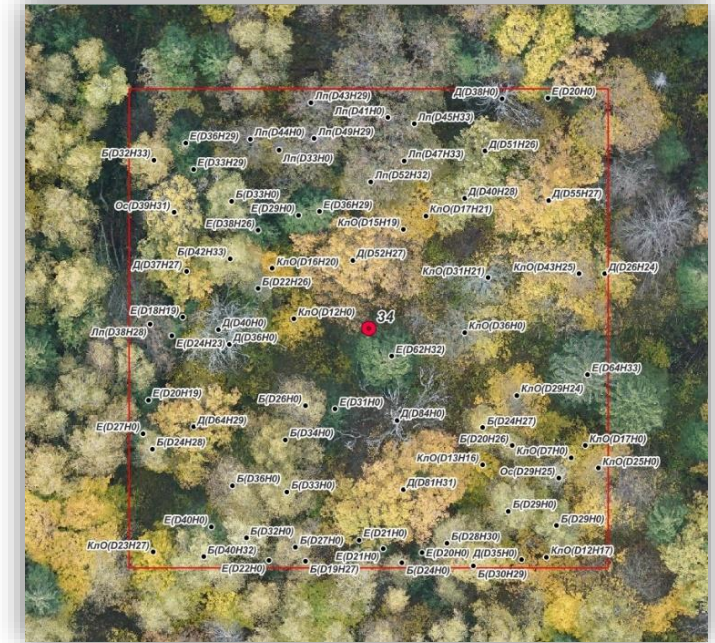
Методики полевых работ:
<https://ritm-c.ru/results/methods/>

Полевые измерения древостоя на постоянной пробной площади

БПЛА снимок

Сегменты и места закладки ППП

Постоянные пробные площадки



Измеряемые параметры на ППП

Перечёт живых деревьев (диаметр от 6 см)

- Древесная порода
- Диаметр на высоте 1,3 м, см
- Высота деревьев, м (выборка)
- Средний возраст, лет (выборка)
- Подрост
 - Состав пород
 - Количество штук на га
 - Средняя высота, м
- Подлесок
 - Состав пород
 - Густота
 - Средняя высота, м

- Перечёт сухостоя (диаметр от 6 см)
 - Диаметр сухостоя на высоте 1,3 м
 - Категория состояния (1-4)
 - Высота сухостоя, м (всех с обломанной верхушкой)
- Перечёт валежа (диаметр от 1 см)
 - Порода
 - Диаметр каждого из двух концов, см
 - Длина, м
 - Категория разложения (1-4)
- Перечёт пней (диаметр более 6 см)
 - Порода
 - Диаметр в верхнем отрезе, см
 - Высота, см
 - Категория разложения (аналогично валежу)

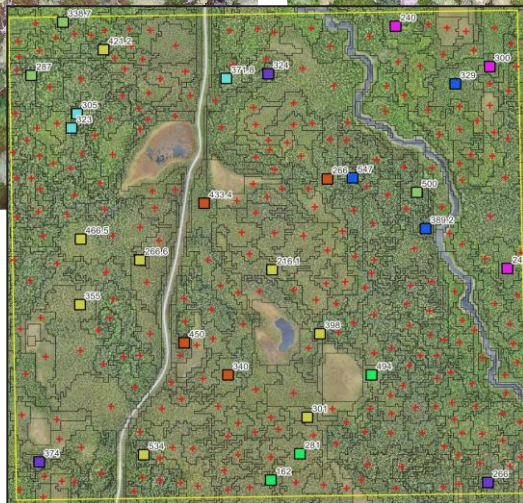
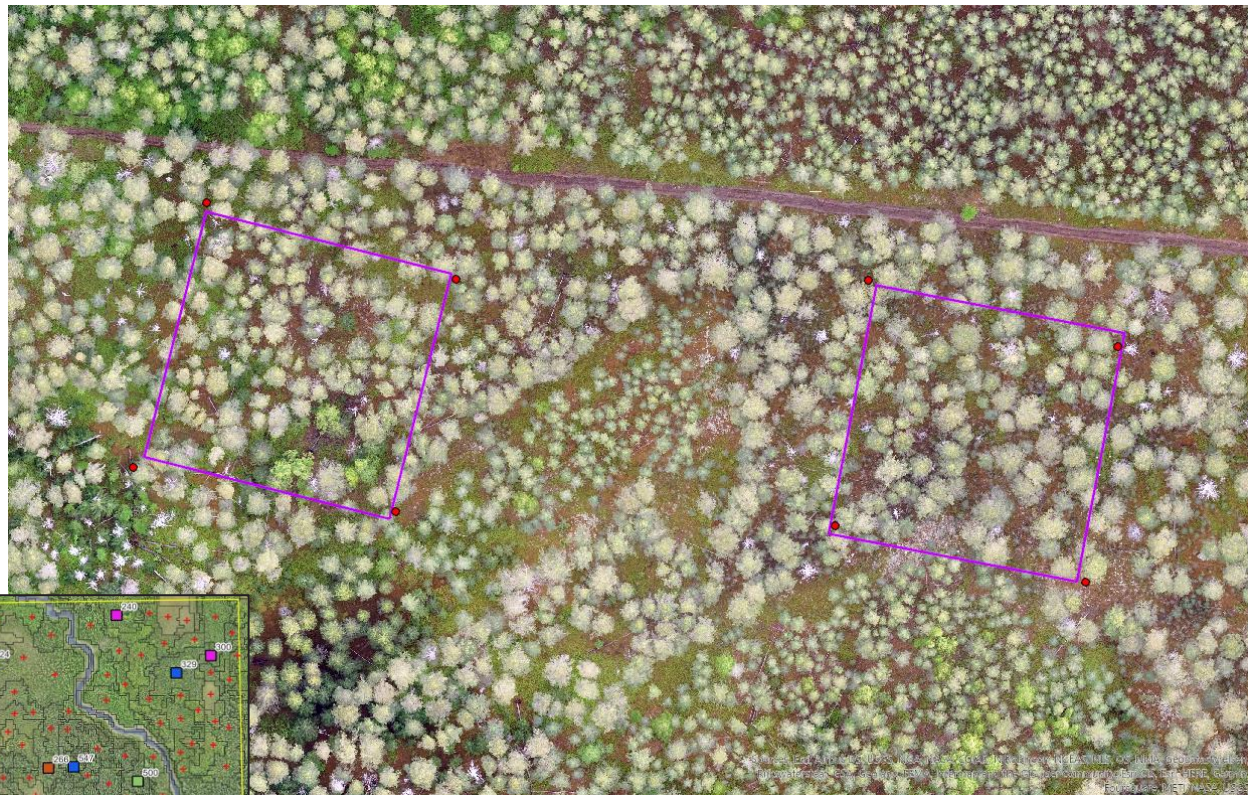
Перечетная ведомость

d _{1,3} , см	Элемент леса <u>Сосна</u>					h, м	Элемент леса <u>Береза</u>					h, м
	Число деревьев, шт.						Число деревьев, шт.					
	здоровых	фаульных	оревяных	шлого растущих	сухостойных		здоровых	фаульных	оревяных	шлого растущих	сухостойных	
8	•• /2		• /1	3 • /1		12,0					14,0	
12	☐ /7			7		16,0					16,5	
16	☒ • /11		• /1	12		19,5	• /1			1	18,0	
20				25		23,0	•• /3			3	19,5	
24	☒☒ /21	• /1		22 • /1		24,0	:1 /5	• /1		6 • /1	21,0	
28	☒☒ /17	• /1		18 • /1		26,5	☒ /10	• /1		11	22,5	
32	☒☒ /15			15		27,0	☒☒ /13	• /1	• /1	15 • /1	23,0	
....	и т д											

Особенности определения позиционирования ППП на местности

Троекратное измерение углов ППП обычным GPS приемником:
ошибка может достигать до 10 метров

Определение углов ППП с помощью базовой геодезической станции:
ошибка может достигать 1-5 метров



Сегменты и места закладки ППП Кивачского ТП (Карелия)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Получены три варианта сети :
 - *пространственно распределенный* с учетом всего разнообразия - 5190 полигонов;
 - *пространственно репрезентативный* - 2916 полигонов
 - *статистически репрезентативный* - 1312 полигонов с учетом разного сценария погрешности оценки пулов углерода в наземных экосистемах России
- На этапе реализации пилотной фазы проекта с учетом доступных ресурсов был выбран третий вариант сети, который был разделен на несколько уровней сбора информации
- Местоположение лесных полигонов экстенсивного уровня было пространственно определено относительно ближайших площадок государственной инвентаризации лесов. Для других экосистем в качестве критерия оценки доступности рассматривался сеть населенных пунктов
- Полигоны интенсивного уровня оснащены данными АФС/МАФС за два сезона и ВЛС за один сезон, экспресс оценки на 400 реласкопических площадках и на 30 ППП с детальными измерениями характеристик древостоя, геоботаническими исследованиями и почвенными образцами в нескольких повторностях.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Контакты

Ершов Дмитрий Владимирович

Заведующий лаборатории мониторинга лесных экосистем

ЦЭПЛ РАН

Телефон +7(903) 795 82 46

E-mail: Ershov@ifi.rssi.ru

<https://ritm-c.ru/>

