



МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ
РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



Министерство
экономического развития
Российской Федерации



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА КЛИМАТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ



Базовые принципы и подходы к проектированию национальной сети тестовых полигонов для оценки бюджета углерода в наземных экосистемах

Ершов Д.В., Гаврилюк Е.А., Подольская Е.С.

Лаборатория мониторинга лесных экосистем

Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов

Российской академии наук



г. Москва

1 - 2 ноября 2023 г.

МАГИСТРАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТА

1. Создание национальной сети мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов в наземных экосистемах
2. Разработка методов интеграции данных наземного мониторинга, ДЗЗ и математического моделирования
3. Создание единой информационно-аналитической системы бюджета углерода
4. Прогнозы динамики пулов углерода и потоков парниковых газов

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕТИ

Разработать методику проектирования сети наземных тестовых полигонов для оценки бюджета углерода в наземных экосистемах на национальном уровне, и по результатам её реализации 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 факторы формирования пулов углерода в наземных экосистемах*



➤ Климат Земли



➤ Главная почвообразующая (материнская) порода



➤ Рельеф местности



➤ Растительность

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ: тематические карты

Карта 46 экорегионов России

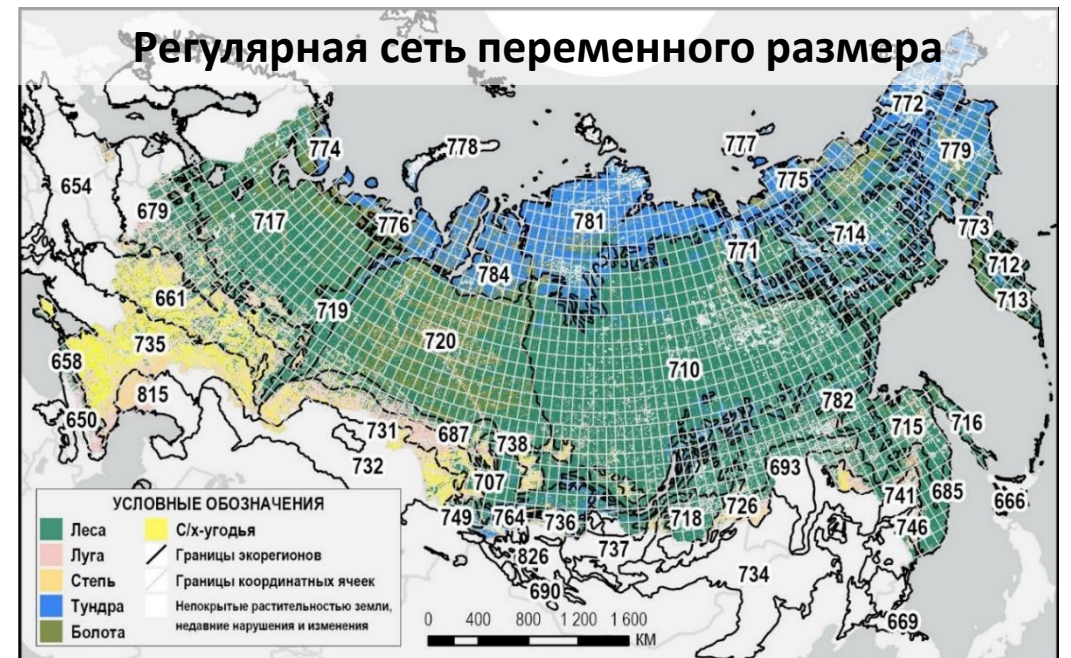


- Eric Dinerstein et al. An Ecoregion-Based Approach to Protecting Half the Terrestrial Realm, BioScience, Volume 67, Issue 6, June 2017, Pages 534–545, Ссылка: <https://doi.org/10.1093/biosci/bix014> (ссылка на интерактивную карту: <https://ecoregions.appspot.com/>)
- Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302. Ссылка: <http://smiswww.iki.rssi.ru/default.aspx?page=81&publicid=1024>

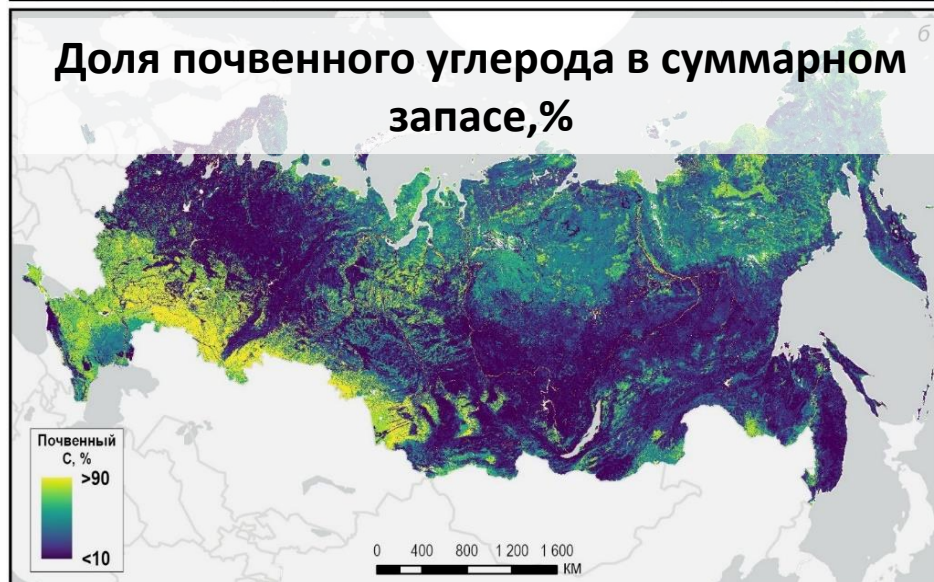
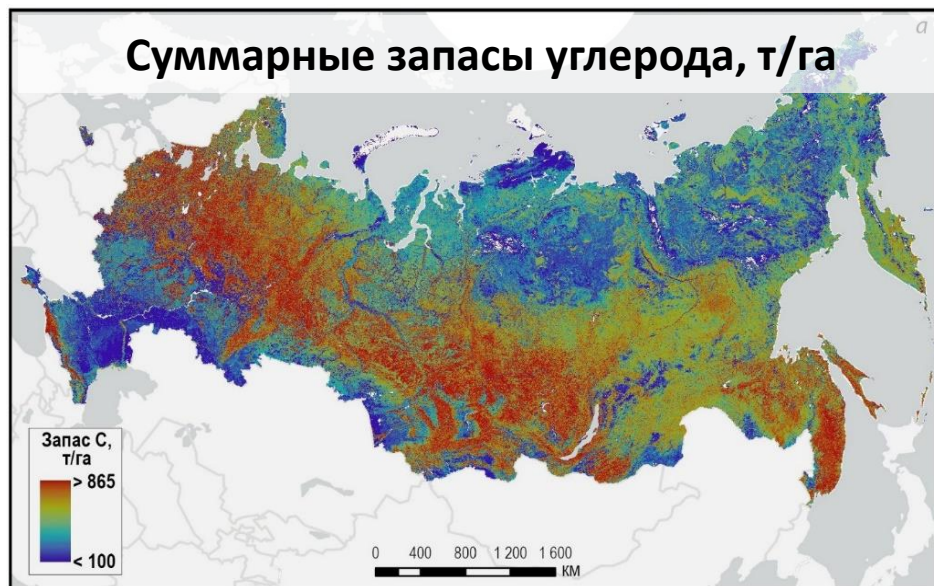
Карта типов наземной растительности России



Регулярная сеть переменного размера



ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ: карты пулов углерода



- Spawn, S.A., Sullivan, C.C., Lark, T.J. et al. Harmonized global maps of above and belowground biomass carbon density in the year 2010. Sci Data 7, 112 (2020).

Ссылка: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0444-4>

- Почвенно-географическая база данных России Чернова О.В., Голозубов О.М., Алябина И.О., Щепаченко Д.Г. Комплексный подход к картографической оценке запасов органического углерода в почвах России // Почвоведение, 2021, №3, с.273-286.

Ссылка: <https://soil-db.ru>

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕТИ

1. Определение мест размещения тестовых полигонов.

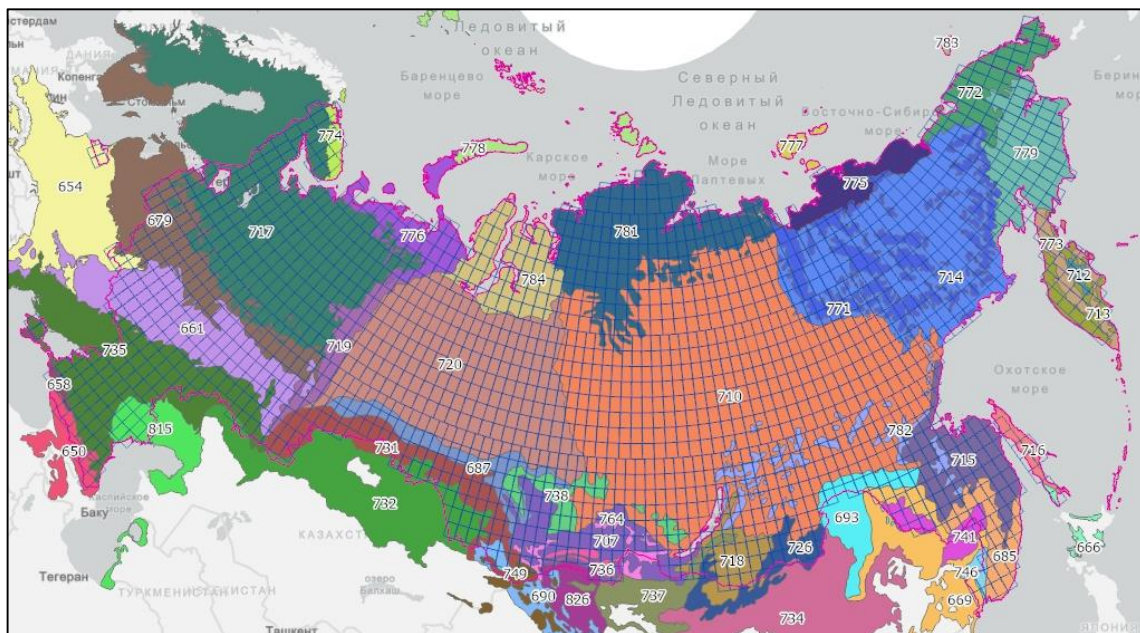
Пространственный анализ пулов углерода растительности и почв в границах регулярной сети для определения потенциальных мест размещения тестовых полигонов в основных (характерных) типах наземной растительности

2. Оптимизация количества тестовых полигонов.

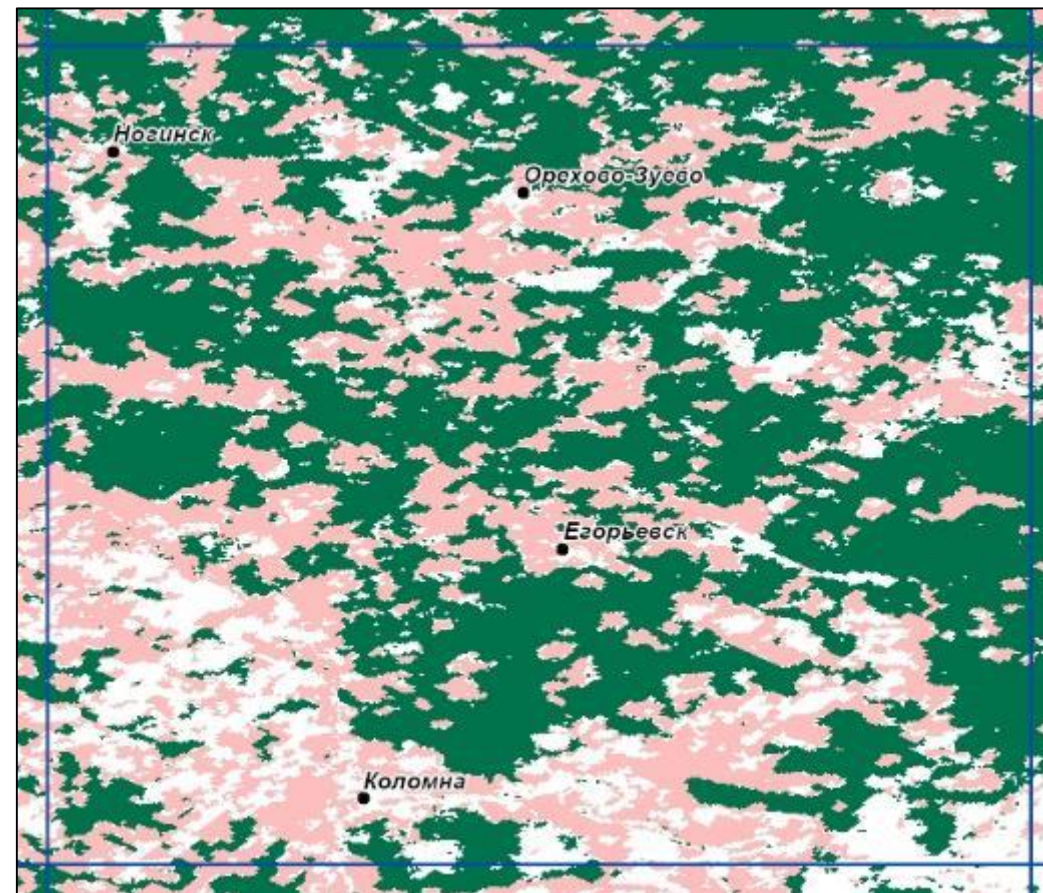
Статистическая оценка оптимального количества тестовых полигонов на уровне России и типов наземной растительности для разных сценариев точности определения запасов углерода в растительности и почвах

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	-	-	-	+	+	-
...

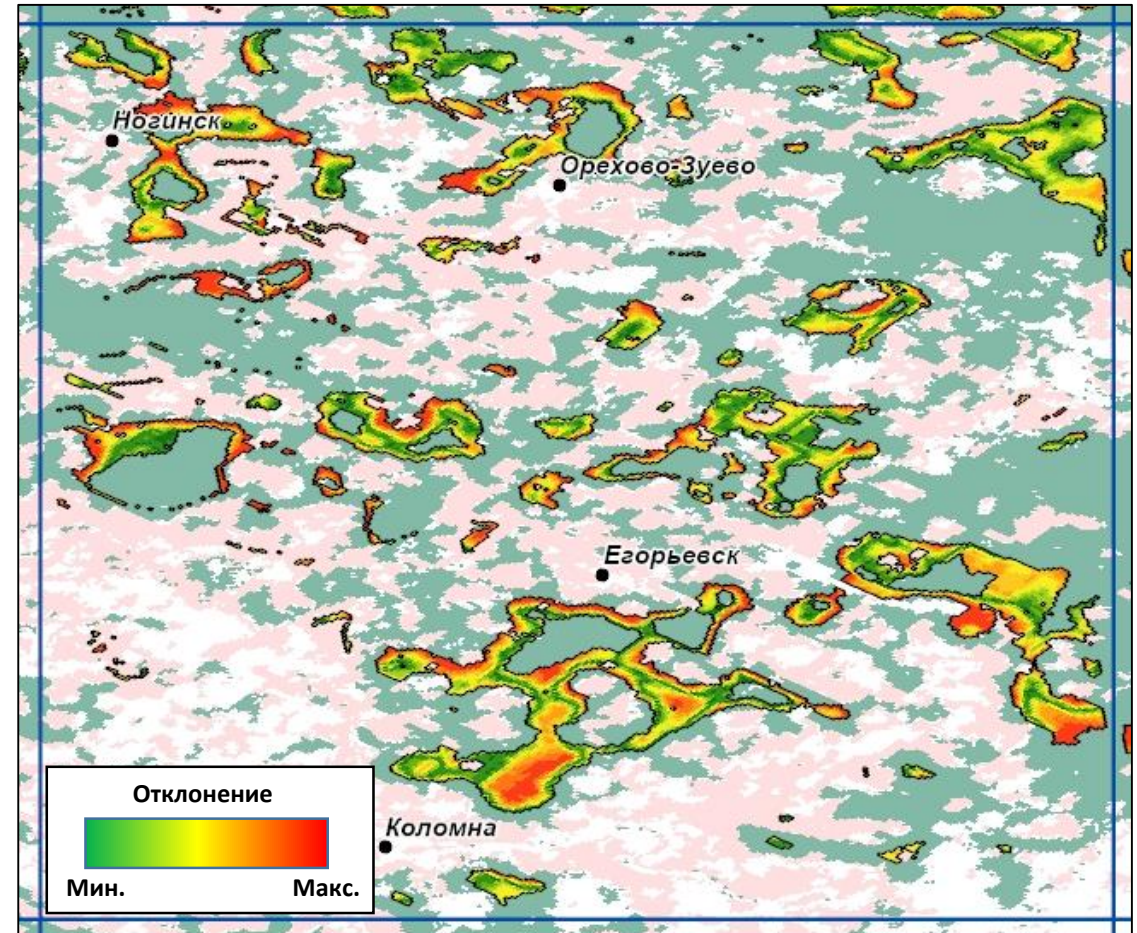
Пример: ячейка №1524 (56° С.Ш. 38.4 В.Д.)
Экорегион – **Сарматские смешанные леса**
Характерные типы растительности: **леса, луга**
Класс болот исключены из-за площади (< 5%)

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

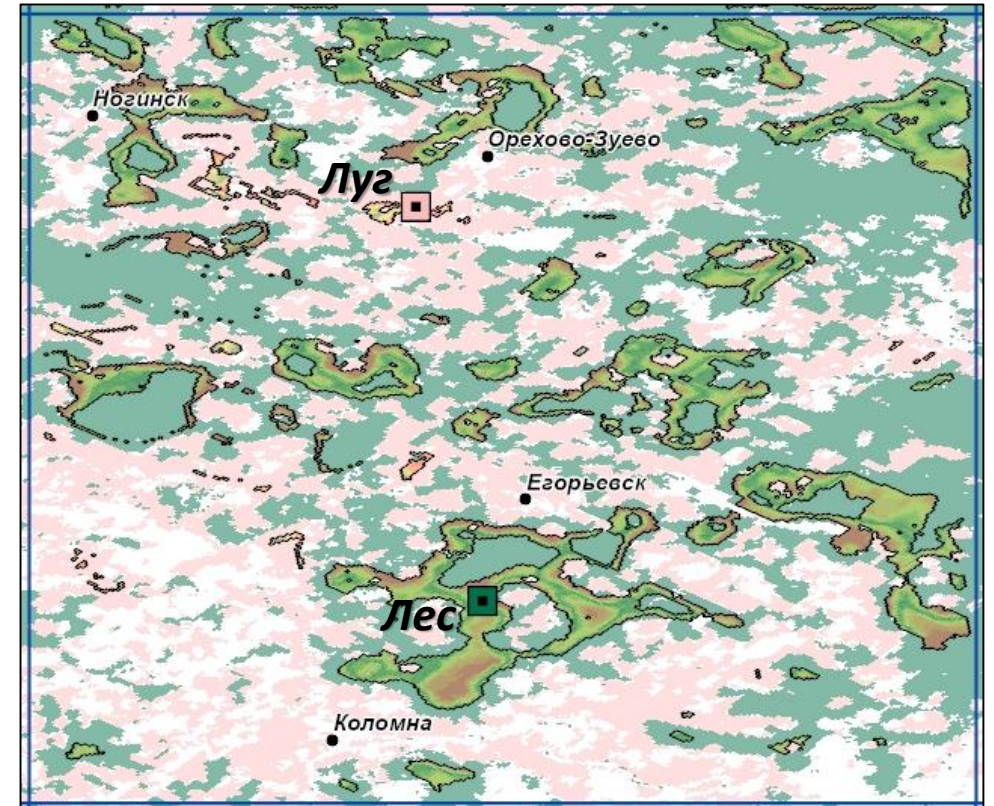
3) Классификация участков (пикселей) выделенных зон по степени отклонения значений локального коэффициента вариации общего запаса углерода от интегрального значения в ячейке регулярной сети



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)

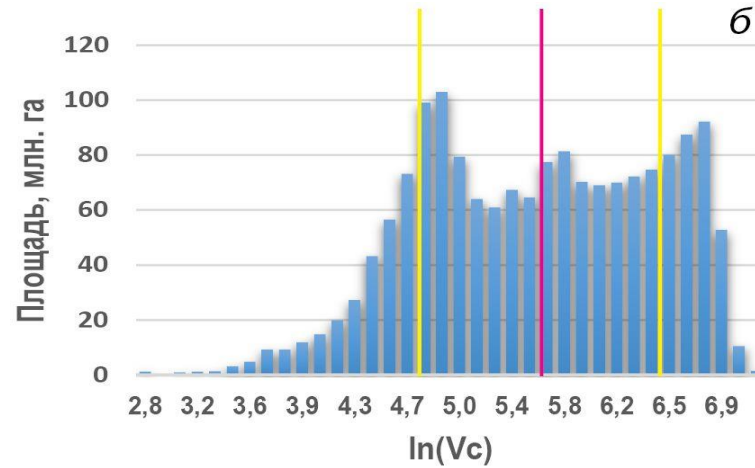
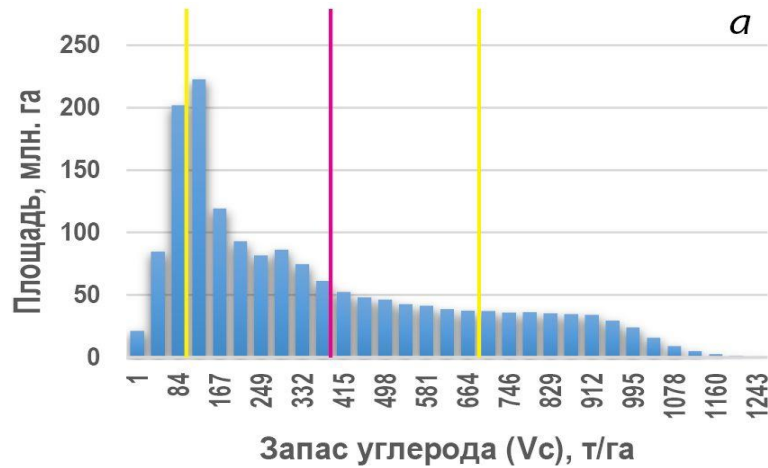


Применение изложенных выше шагов на первом этапе позволяет нам сформировать пространственно-распределенную псевдо-регулярную сеть, обеспечивающую охват всех экорегионов и типов растительности с учетом разнообразия локальных условий, т.е. **пространственный с учетом разнообразия**.

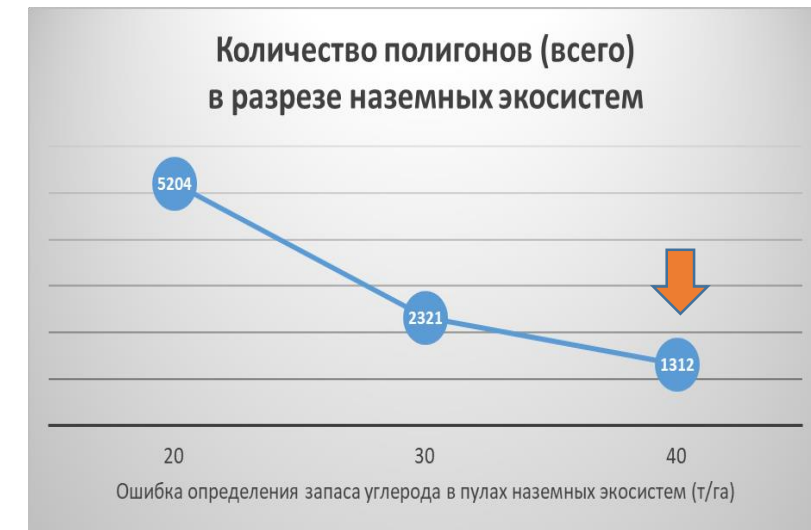
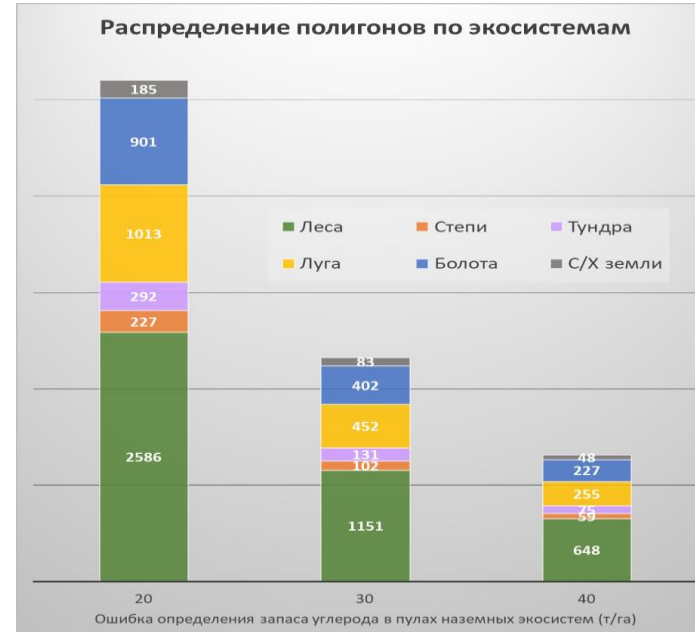
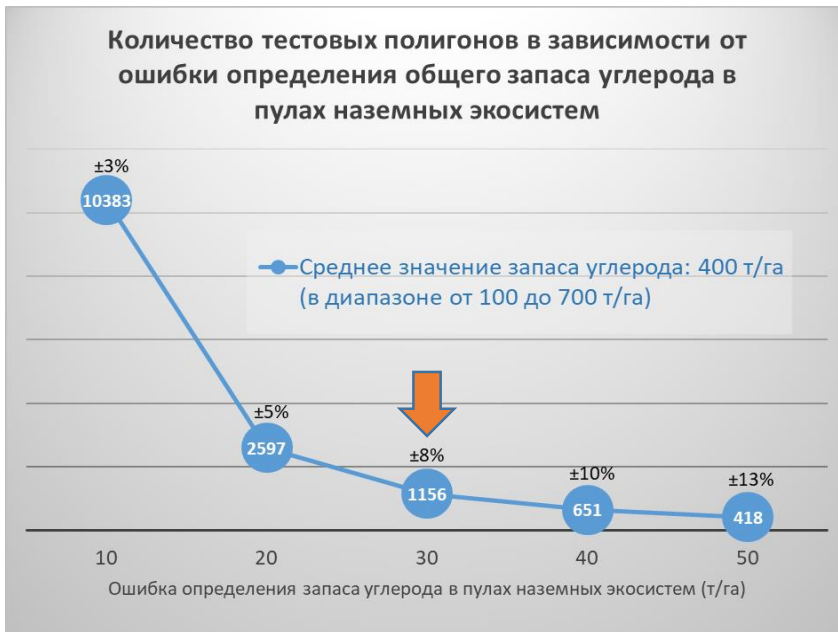
Первым и самым простым методом оптимизации количества тестовых полигонов является определение степени представленности типа растительности в каждой конкретной ячейке. За счет этого, мы сохраняем пространственный охват всей территории, при этом описывая наиболее типичные экосистемы в разных природно-климатических условиях.

В этом случае мы получаем вариант 2 – **пространственный репрезентативный**. Для этого мы применили 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

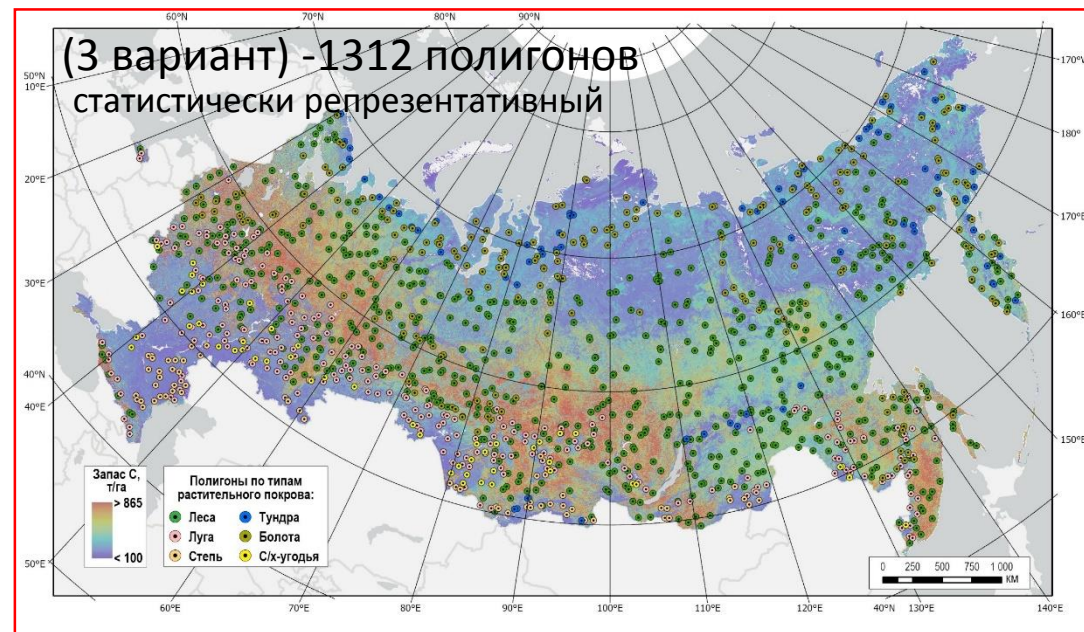
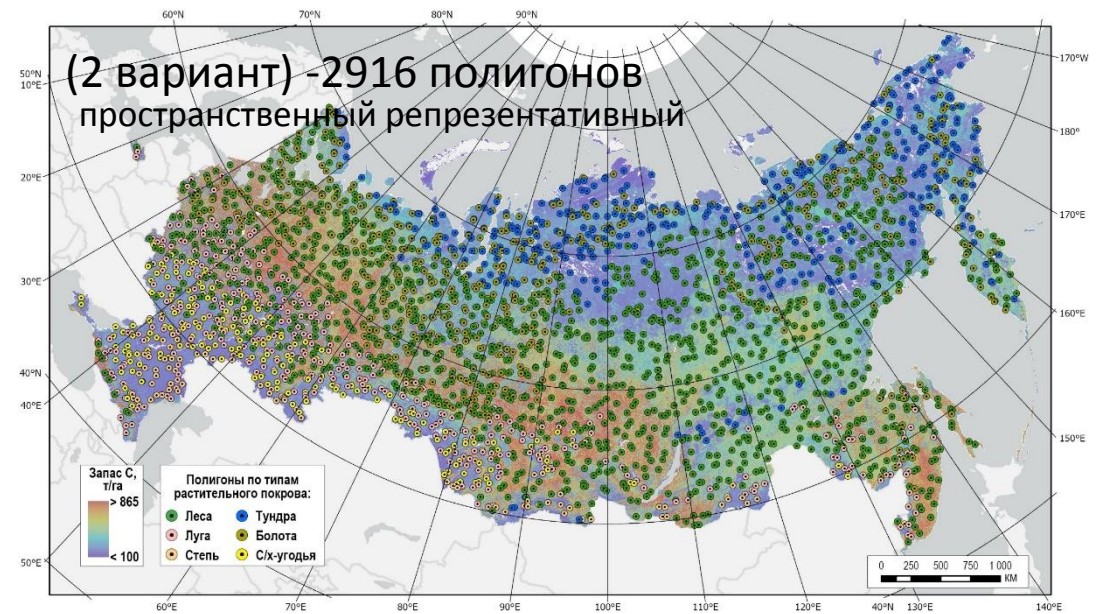
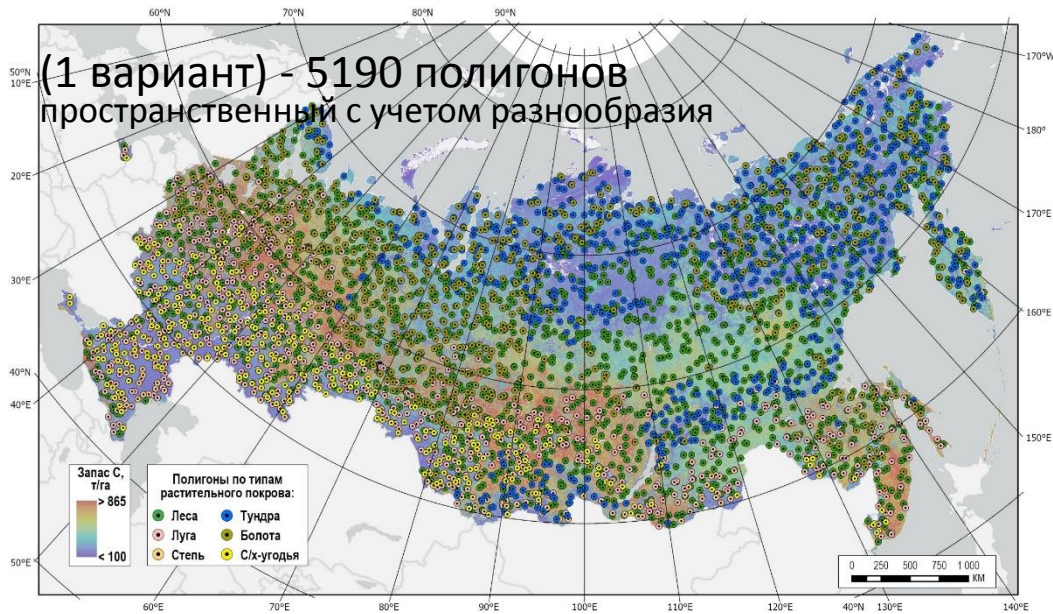
РЕЗУЛЬТАТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕТИ ТЕСТОВЫХ ПОЛИГОНОВ

- (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



ДЕЛЕНИЕ ТЕСТОВЫХ ПОЛИГОНАХ НАЦИОНАЛЬНОЙ СЕТИ ПО УРОВНЯМ

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

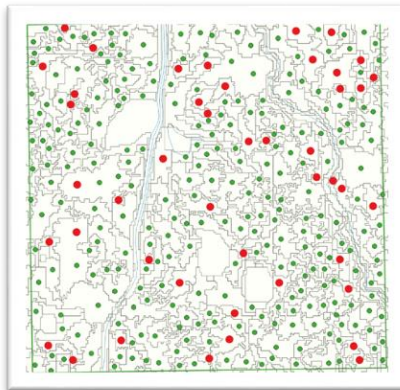


Сбор данных на полигоне:

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



2 км



2 км

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

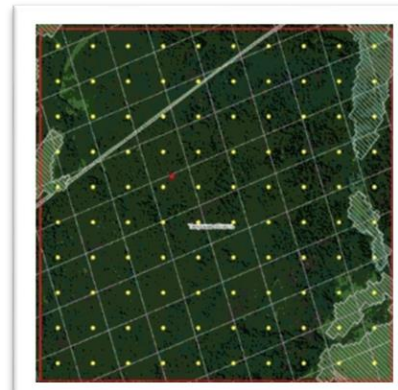


Сбор данных на полигоне:

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

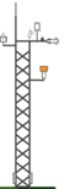


2 км



2 км

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



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

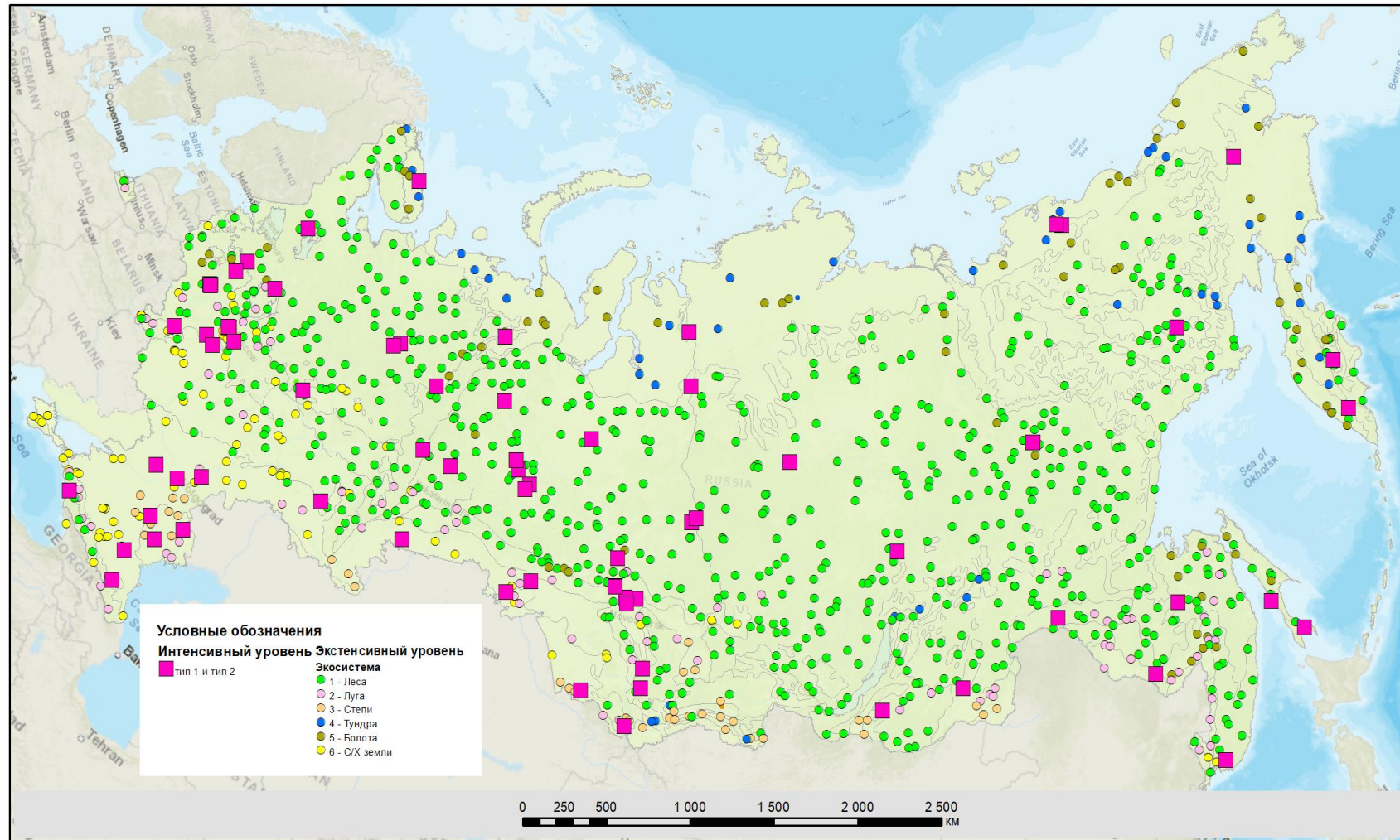


Распределение полигонов разного уровня по типам экосистем

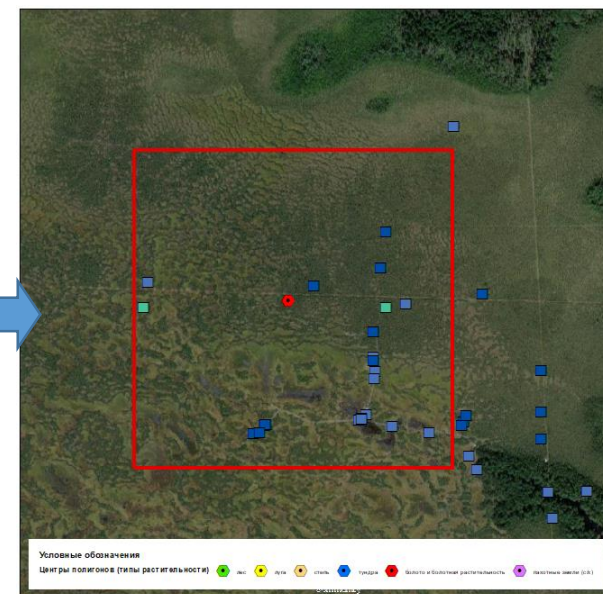
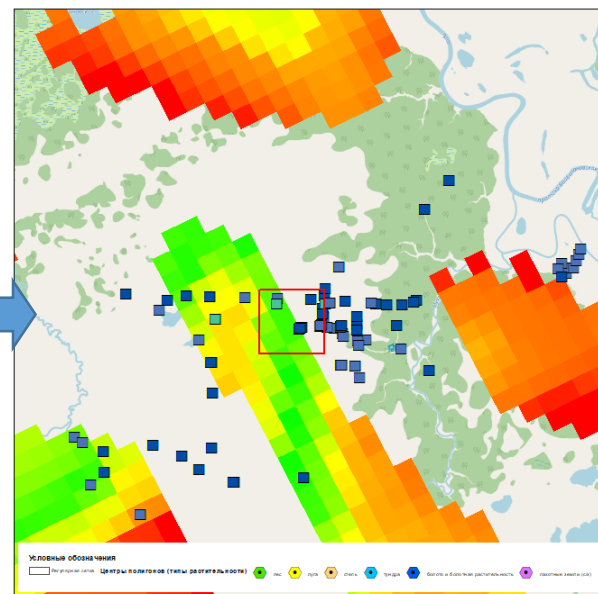
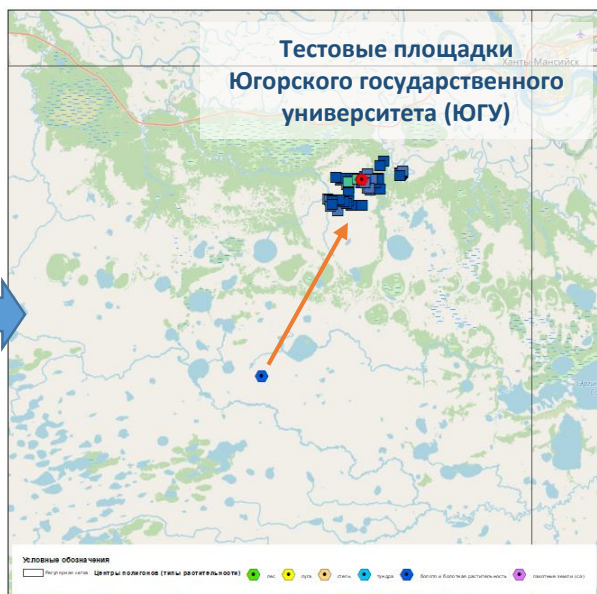
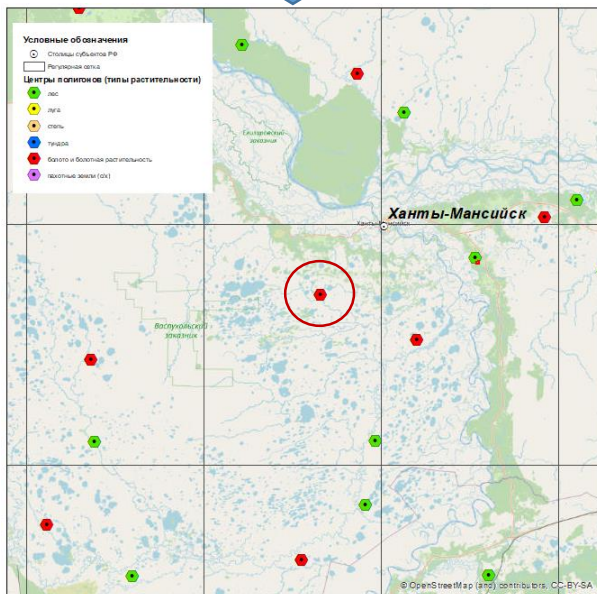
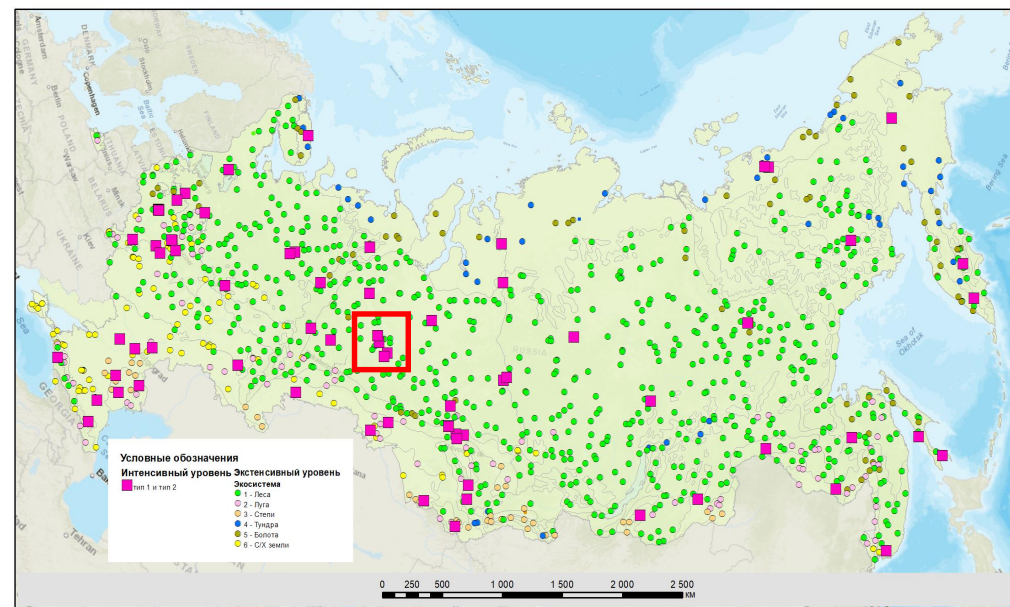
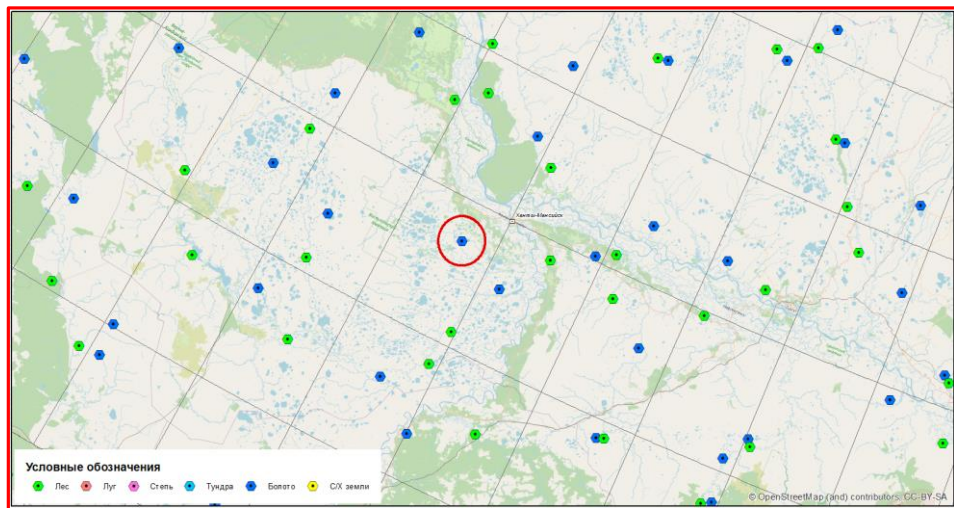
Тип экосистем	Углерод		Тестовые полигоны				Ошибка от среднего значения	
	Среднее, т/га	SD, т/га	Интенсивные	Экстенсивные	Вышки	Всего	Абсолютная, т/га	в % от среднего
Россия	394	283	50	1232	50	1332	28	7,1
Лес	542	282	29	740	22	791	36	6,6
Лес нарушенный	NA*	NA	0	222	0	222	NA	NA
Болота	293	166	5	70	12	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



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Разработанная технология проектирования сети тестовых полигонов базируется на статистическом и пространственном анализе распределения пулов углерода в растительности и почвах наземных экосистем с учетом различных климатических, растительных и почвенных условий
- В результате проектирования получены три варианта сети: для *пространственно распределенного* с учетом всего разнообразия (5190 полигонов), *пространственно репрезентативного* (2916) и *статистически репрезентативного* (1312) 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
- Для каждого типа наземной экосистемы в зависимости от количества полигонов определена погрешность оценки пулов углерода относительно его среднего значения
- Местоположение лесных полигонов экстенсивного уровня, который реализует участник консорциума ФГБУ «Рослесинфорг», было пространственно определено относительно ближайших площадок государственной инвентаризации лесов. Для других экосистем в качестве критерия оценки доступности рассматривался сеть населенных пунктов.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Контакты

Ершов Дмитрий Владимирович

Заведующий лаборатории мониторинга лесных экосистем

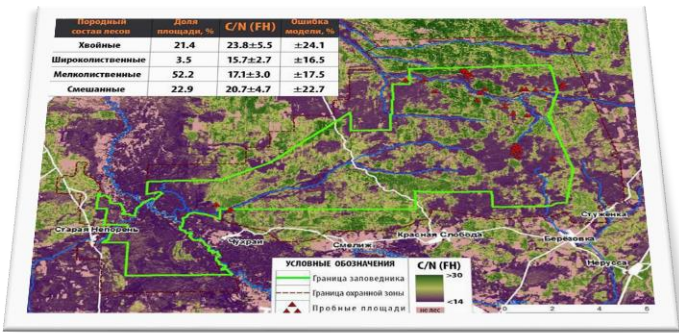
ЦЭПЛ РАН

Телефон +7(903) 795 82 46

E-mail: Ershov@ifi.rssi.ru

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

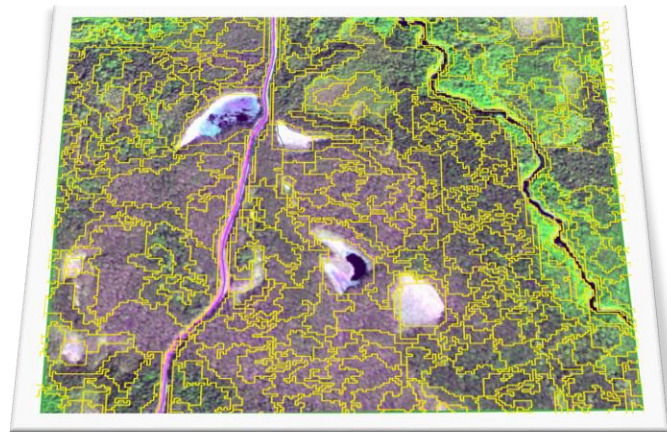




Пространственное моделирование пулов углерода по спутниковым и наземным данным региона



Спутниковые данные: сегментация и проектирование сети 400 РКПП и 30 ППП



Данные аэрофотосъемки: точные границы постоянных ПП, детальная оценка характеристик древостоя



ПОЛИГОН ИНТЕНСИВНОГО УРОВНЯ

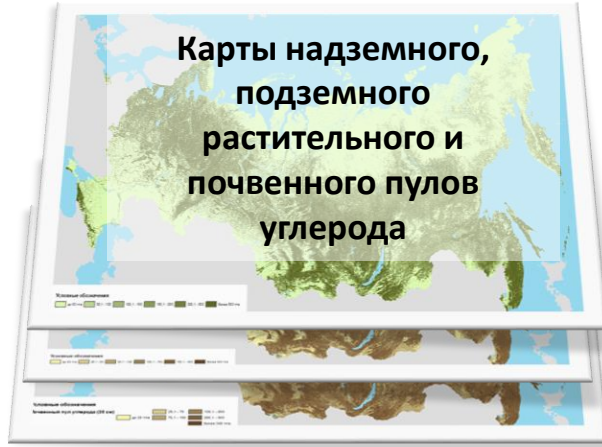


Экспресс оценка характеристик растительности и почв на временных 400 РКПП (зеленые точки)

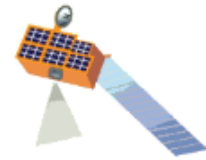


Детальная наземная оценка характеристик растительности и почв на 30 ППП (красные точки)

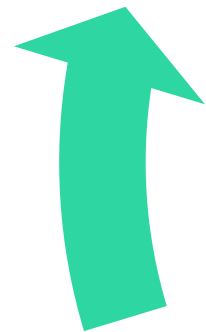




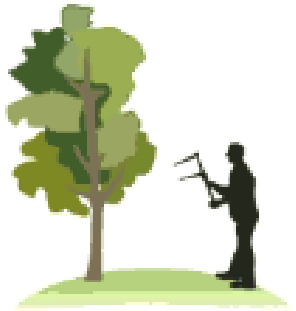
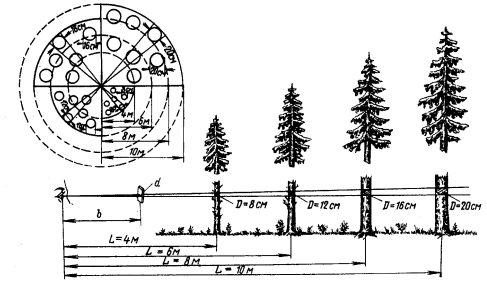
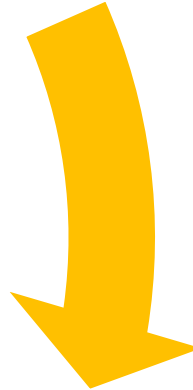
Пространственное моделирование пулов углерода по спутниковым и наземным данным на всей территории России



Спутниковые данные 230 м



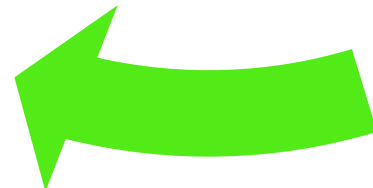
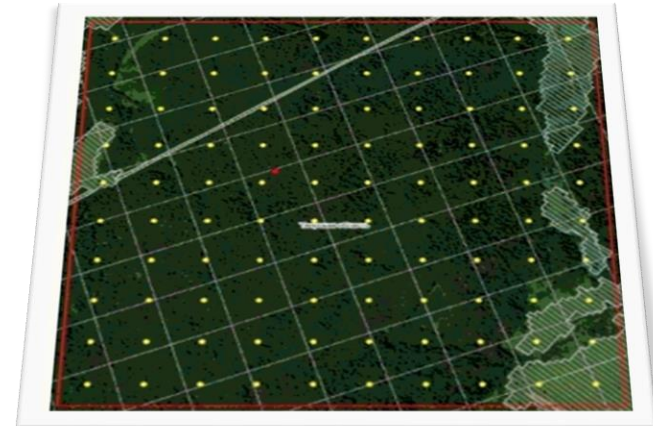
ПОЛИГОН ЭКСТЕНСИВНОГО УРОВНЯ



Детальная оценка характеристик растительности и почв на **одной площадке ГИЛ**



Оценка характеристик растительности на полигоне **100 РКПП** (регулярная сеть)



Рекогносцировка или наземная экспресс оценка характеристик древостоев методами производственной таксации

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



Реласкопические площадки переменного радиуса

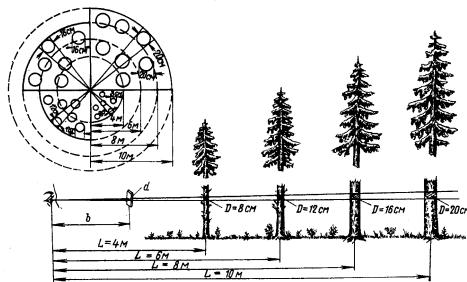
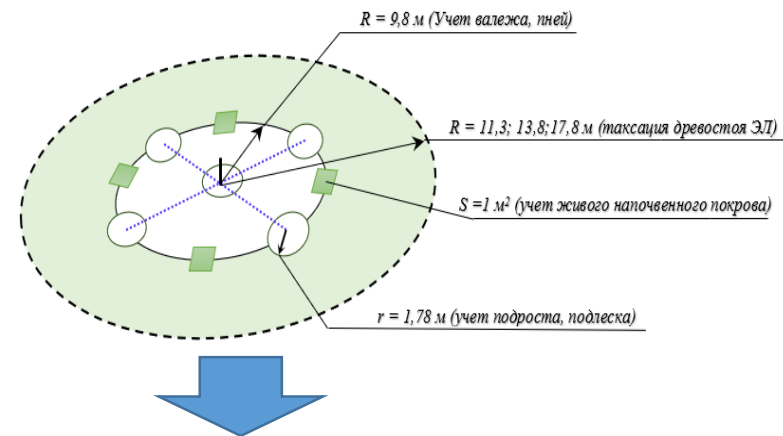
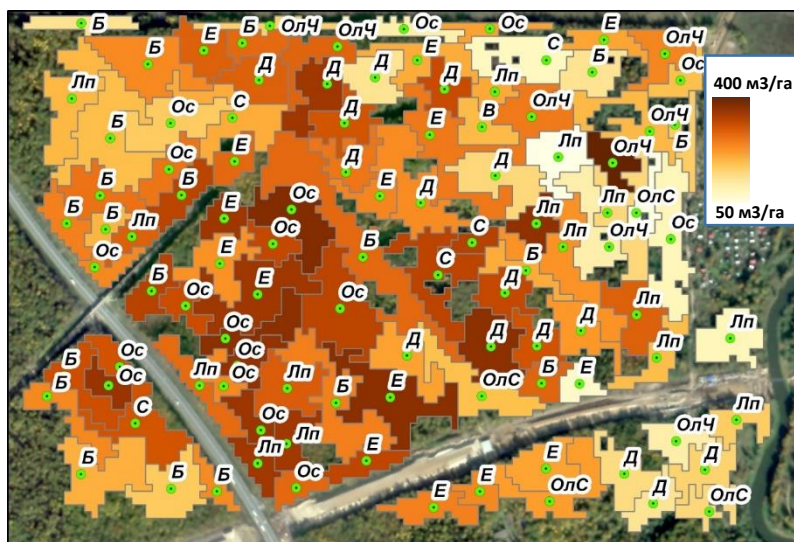


Схема учета растительности на площадке



Учетные ведомости по элементам леса

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



Ведомость учета подроста на площади							50 м²
Древесная порода	Количество жизнеспособного подроста по категориям крупности			крупный, м			А, лет
	мелкий, м	средний, м	крупный, м	до 0,5	0,6 - 1,5	1,6-2,5	
Е	1	3	6	2,6-3,5	3,6-4,5	4,6-5,5	5,6 и >
							15

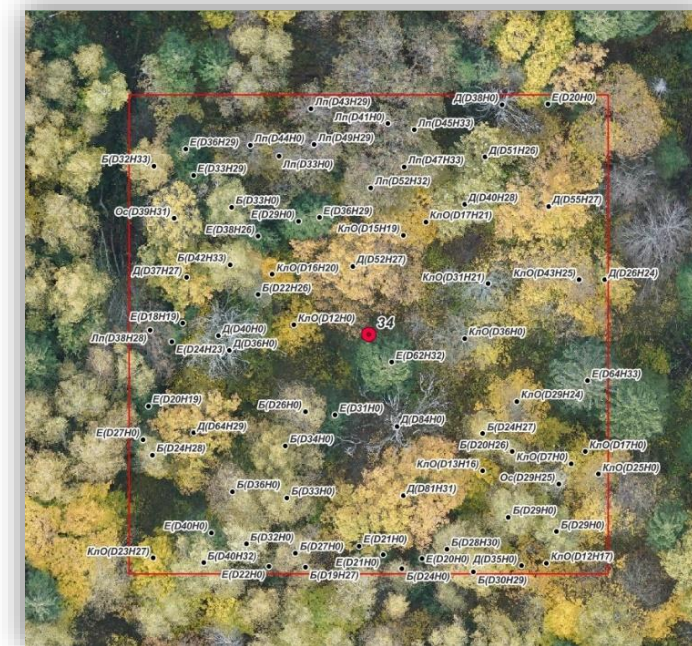
Ведомость учета подлеска на площади								50 м²
Древесная порода	Количество (шт) по породам и высотам (м)							
	до 1,0	1,1 - 2,0	2,1 - 3,0	3,1 - 4,0	4,1 - 5,0	5,1 - 6,0	6,1 и >	
Рб		3	2					
Мж		1						

Ведомость учета валежа и пней на площади					300 м²
Объект	Древесная порода	Длина, высота, м	Средний диаметр d [(d1+d2)/2], см	Диаметр гниля, мм	Тип гниля
в	Е	3	9	10	1 - слабая
в	С	5	12	15	2 - средняя
в	Ос	10	20	20	3 - сильная
п	С	0,25	0	30	1 - слабая
п	Е	0,40	0	0	2 - средняя
п	Б	0,35	0	35	3 - сильная

Перечетная ведомость круговой реласкопической площадки №								
Раствор полнотомера, мм		15	Козф. полнотомера		1	Значения суммы площадей сечений деревьев на высоте 1,3 м и средние значения модельных деревьев по древесным породам		
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
Результаты измерений			Результаты измерений			Результаты измерений		
КТГ	ΣG		ΣG		ΣG		ΣG	
	1,0	0,5	Итого	1,0	0,5	Итого	1,0	0,5
Здоровые	1/6	6	2/5	5	3/3	3		
Фаутовые			1/1	0,5				
Дровяные	1/1	1	1/1	1	2/2	2		
Сухостойные								
Итого	7	7	6	0,5	6,5	5		5

Полевые измерения древостоя на постоянной пробной площади

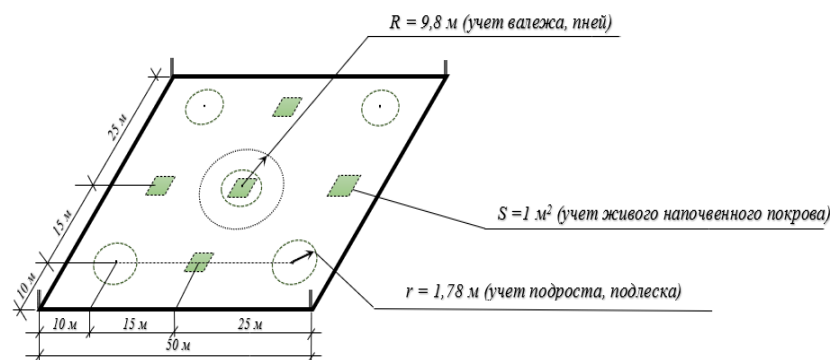
БПЛА снимок



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 разложения (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)

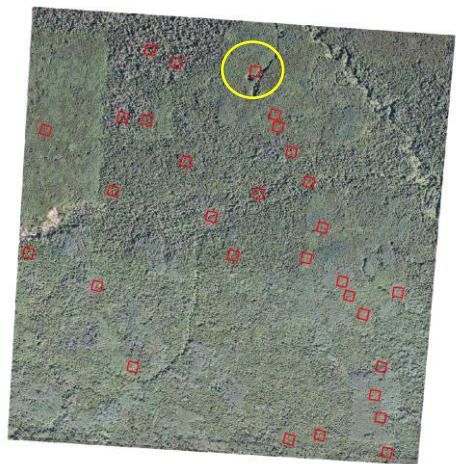
Перечетная ведомость

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											

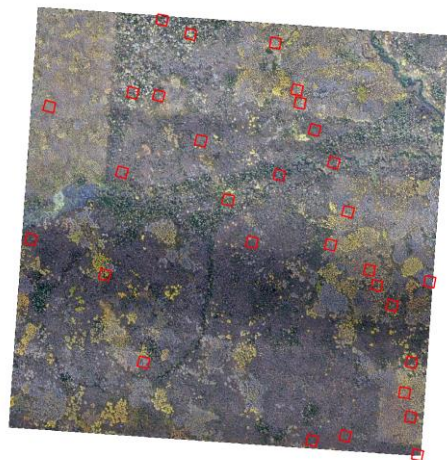
Данные АФС и ВЛС (Шарангский ТП)

RGB ортофотопланы

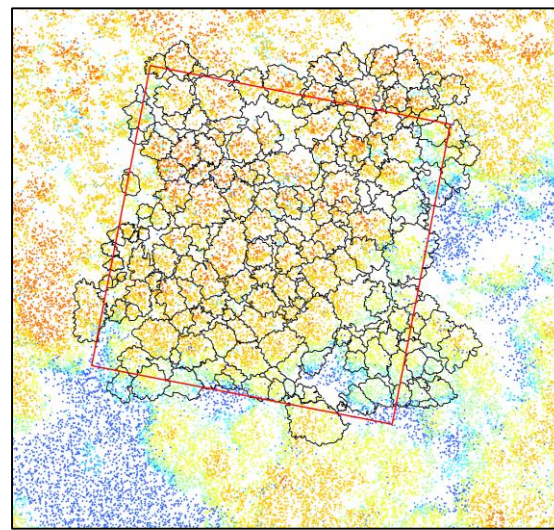
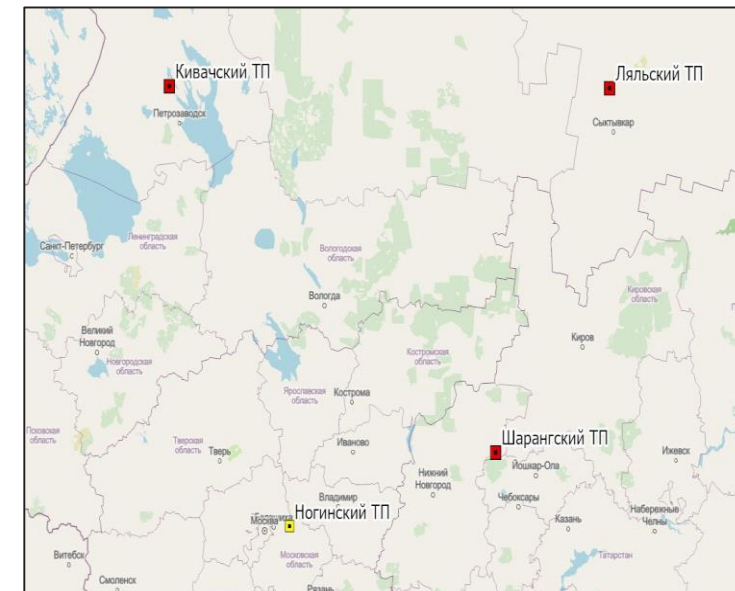
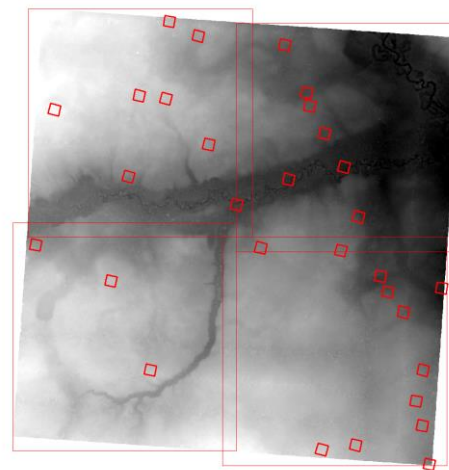
Лето



Осень



ЦММ/ЦМР (лидар)



- 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

Методы и алгоритмы геопространственного моделирования углерода: содержание запасов углерода (C) и азота (N) в лесной подстилке

Методы и алгоритмы:

Настройка и применение регрессионной модели выполняется ансамблевым алгоритмом машинного обучения «Случайный лес» (*Breiman L. Random forests // Machine Learning. 2001. V. 45. № 1. P. 5–32*), основанный на использовании большого числа (ансамбля) деревьев решений, каждое из которых строится по неполной выборке, получаемой из исходной с помощью бутстрепа (случайной выборки с возвращением), а для расщепления вершин используется фиксированное число переменных, случайно отбираемых из полного набора.

Последовательность обработки данных: (1) Формирование набора мультиспектральных спутниковых изображений на территорию интереса; (2) преобразование исходных значений пикселей в каналах спутниковых изображений в производные спектральные переменные-предикторы (индексы и т.п.); (3) формирование набора дополнительных геопространственных переменных для моделирования (характеристики рельефа и т.п.); (4) извлечение значений признаков в местах расположения эталонных участков, входящих в обучающую выборку, с известными характеристиками лесных экосистем; (5) Обучение классификационной или регрессионной модели по извлеченным значениям переменных; (6) Применение обученной модели ко всем пикселям на тестовом полигоне для создания тематического изображения, характеризующего пространственное распределение моделируемого показателя (например, углерода в лесной подстилке)

Входные данные: (1) разносезонные мультиспектральные спутниковые изображения тестового полигона; (2) цифровая модель рельефа; (3) полевые опорные данные пробных площадок для обучения модели классификации

Выходные данные: тематические карты тестового полигона в растровом формате с пиксельной оценкой запасов углерода в лесной подстилке; средние показатели с характеристиками запасов на уровне сегментов (однородных участков растительного покрова) тестового полигона

Программное обеспечение: алгоритмы запрограммированы в программной среде R в пакетах Caret (Kuhn M. Classification and Regression Training. R package version 6.0–84. <https://CRAN.R-project.org/package=caret>) и Ranger (Wright M.N., Ziegler A. A Fast Implementation of Random Forests for High Dimensional Data in C++ and R // J. Statistical Software. 2017. V. 77. № 1. P. 1–17. <https://doi.org/10.18637/jss.v077.i01>)

Показатель	C:N		Запас C		
	L	FH	L	FH	0-10 см
Подгоризонт / слой					
R ²	0.71	0.83	0.61	0.37	0.34
RMSE	2.7	2.1	0.7 т/га	1.9 т/га	11 т/га
RMSE _%	13%	11%	40%	49%	39%

