

Оценка и картографирование климаторегулирующих экосистемных услуг лесов на региональном уровне (Республика Карелия и Карельский перешеек)

Специальность: 4.1.6. «Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агролесомелиорация, озеленение, лесная пирология и таксация»

П.43. Моделирование поглощения, накопления, запаса и бюджета углерода в лесных экосистемах разного иерархического уровня.

27 апреля 2023



Аспирант 2 г. о., Нарыкова А.Н.
Научный руководитель
с. н. с., к. т. н. Плотникова А.С.

Обоснование темы в соответствии с паспортом специальности

Паспорт научной специальности 4.1.6. «Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агролесомелиорация, озеленение, лесная пирология и таксация»

Область науки: Сельскохозяйственные науки

П.43. **Моделирование** поглощения, накопления, **запаса** и бюджета **углерода** в **лесных экосистемах** разного иерархического уровня.

Тема: **Оценка и картографирование** климаторегулирующих экосистемных услуг **лесов** на региональном уровне (Республика Карелия и Карельский перешеек)

Оценка и картографирование ЛЭУ осуществляется за счет **моделирования** запасов почвенного органического углерода на основе интеграции данных дистанционного зондирования, тематических предикторов и наземных измерений.

В работе исследуется климаторегулирующая экосистемная услуга лесов – **аккумуляция почвенного органического углерода**

Объектом исследования являются почвы **лесных экосистем** Карелии и Карельского перешейка

Актуальность

1. Выгоды, которые люди получают от экосистем, как правило, не оценены должным образом, что вызывает неравномерное потребление экосистемных услуг и деградацию природных экосистем. Лесные ландшафты в основном воспринимаются только как источник древесины и топлива. В меньшей мере учитываются другие важные функции леса, такие как регулирование круговорота воды, цикла углерода и, соответственно, климата, естественное почвообразование, фотосинтез и др.
2. В настоящее время картографирование экосистемных услуг слабо развито и является относительно новым научным направлением в России, что подтверждается небольшим количеством работ и слабо разработанной методикой. Современные возможности спутниковых данных, такие как пространственный охват, высокая детальность и доступность, делают их наиболее удобным и объективным источником регулярно обновляемой информации для картографирования экосистемных услуг лесов на региональном уровне.
3. В настоящее время получили развитие высокопроизводительные облачные платформы (например, Google Earth Engine), объединяющие архивы разнородной спутниковой, почвенно-климатической, топографической и другой информации, а также инструменты и методы машинного обучения для их анализа.
4. Перспективным направлением является интеграция геопространственных предикторов, полученных на основе данных дистанционного зондирования Земли, и наземных измерений качественных и количественных характеристик лесов для оценки и моделирования экосистемных услуг.

Научная новизна ожидаемых результатов

1. Геопространственные модели запасов почвенного органического углерода Республики Карелия и Карельского перешейка, полученные посредством применения подхода цифрового почвенного картографирования.
2. Оценка влияния предикторов, характеризующих факторы почвообразования, на запасы почвенного органического углерода.

ЦЕЛЬ:

Оценка и картографирование запасов органического углерода в почвах лесов республики Карелия и Карельского перешейка с помощью методов машинного обучения на основе геопространственных предикторов и наземных измерений.

ЗАДАЧИ:

- 1) изучить существующие методы картографирования экосистемных услуг на различных пространственных уровнях;
- 2) найти и изучить пространственные данные, характеризующие факторы почвообразования;
- 3) подготовить тематические пространственные предикторы для построения регрессионных моделей в GEE;
- 4) построить и проанализировать регрессионные модели запасов углерода для подстилки и минеральных горизонтов почв с помощью разных алгоритмов машинного обучения (Случайный лес, Метод опорных векторов, Градиентный бустинг);
- 5) провести оценку качества моделирования (кросс-валидация);
- 6) представить результаты моделирования в виде цифровых карт и базы пространственных данных

An aerial photograph of a winter forest. The ground is covered in a thick layer of snow. The forest consists of a mix of evergreen trees, likely spruce or fir, and bare deciduous trees. The evergreens are dark green, while the deciduous trees are light brown and without leaves. The overall scene is serene and quiet.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Проанализировали более 50 отечественных и зарубежных публикаций, которые посвящены картографированию содержания и запасов почвенного органического углерода (ПОУ) на региональном и локальном уровнях.

Картографирование в основном осуществляется с использованием следующих подходов:

на основе почвенных карт и архивных данных

подготовка данных и предикторов посредством ГИС;
картографирование содержания и запасов ПОУ с учетом типа землепользования и классификационной принадлежности почвы.

Проверка результата носит экспертный характер и производится специалистами, знающими картографируемую территорию.

цифровое почвенное картографирование (ЦПК)

ЦПК подразумевает использование трех этапов:

1. Подготовка обучающей выборки и предикторов;
2. Моделирование пространственных зависимостей;
3. Оценка качества моделирования.

Подробно рассмотрены методы цифрового картографирования запасов и содержания углерода; собраны данные об используемых и наиболее информативных пространственных предикторах; выполнен анализ географии исследований, включенных в обзор.

Моделирование содержания и запасов ПОУ с помощью методов машинного обучения

Случайный лес - 24%*,
 Регрессионный кринг - 11%*,
 Метод опорных векторов - 7%*
 * от включенных в обзор исследований

Для оценки точности карт количественных признаков используются различные критерии: MAE, MSE, RMSE, MAPE и др.

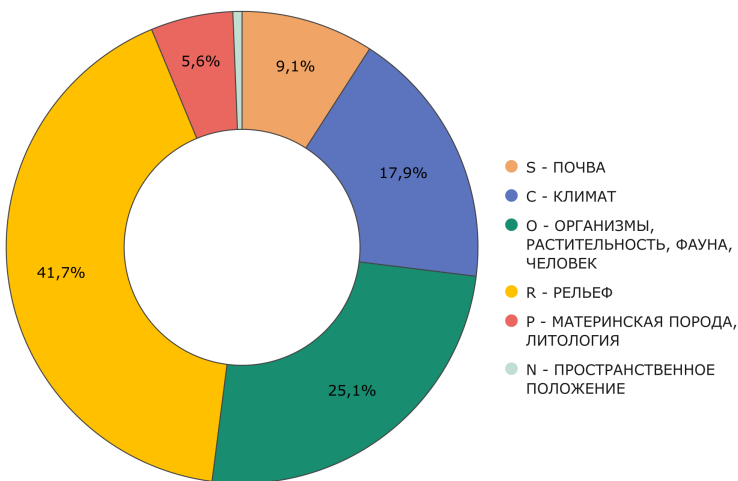
Наиболее часто для моделирования содержания и запасов ПОУ использовалось программное обеспечение R, для подготовки предикторов чаще использовались SAGA GIS, QGIS, ArcGIS, GEE.

Анализ используемых предикторов

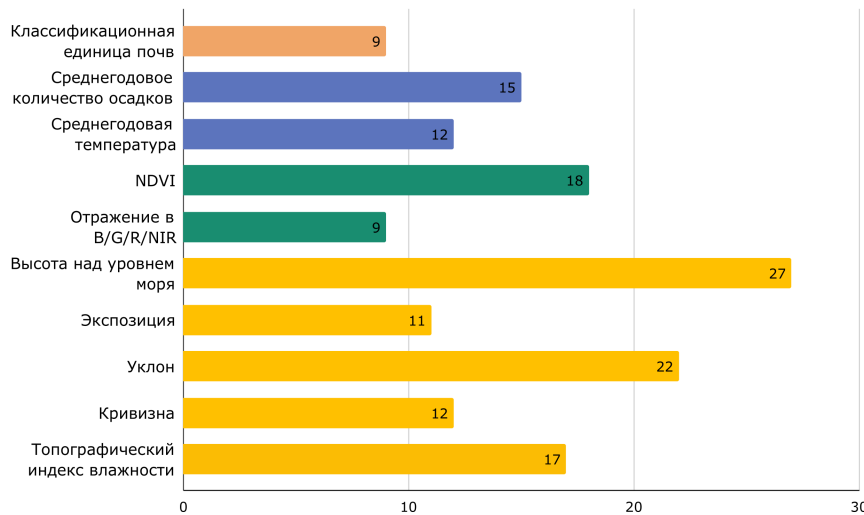
Пространственные **данные о рельефе (41,7%)** были одними из наиболее часто используемых предикторов, за которыми следовали переменные, представляющие растительность и климат

Наиболее часто используемые в картографировании содержания и запасов ПОУ являлись следующие предикторы: **высота над уровнем моря (27)**, уклон (22), NDVI (18) и др. (2)

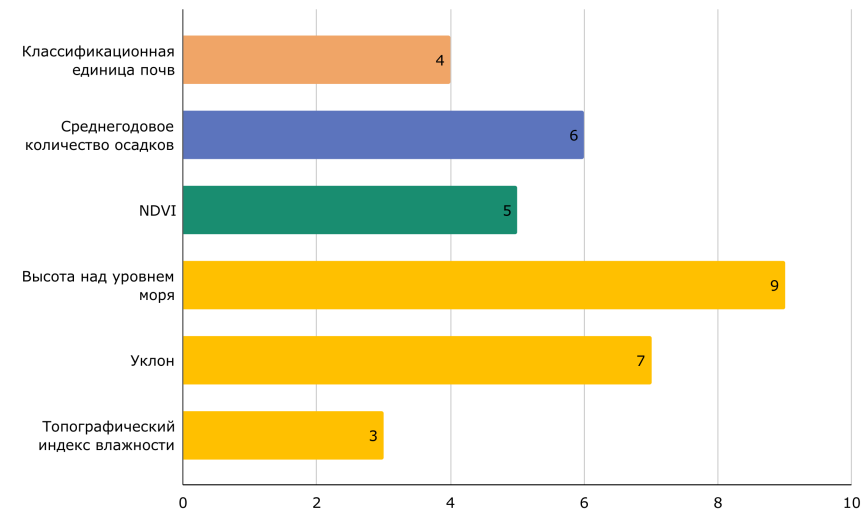
Наиболее информативными являлись следующие предикторы: классификационные единицы почв (4), среднегодовое количество осадков (6), NDVI (5), **высота над уровнем моря (9)**, уклон (7), топографический индекс влажности(3). (3)



Процентное соотношение предикторов, рассмотренных в литературном обзоре, в рамках модели SCORPAN



Наиболее часто используемые предикторы (10 из 91)

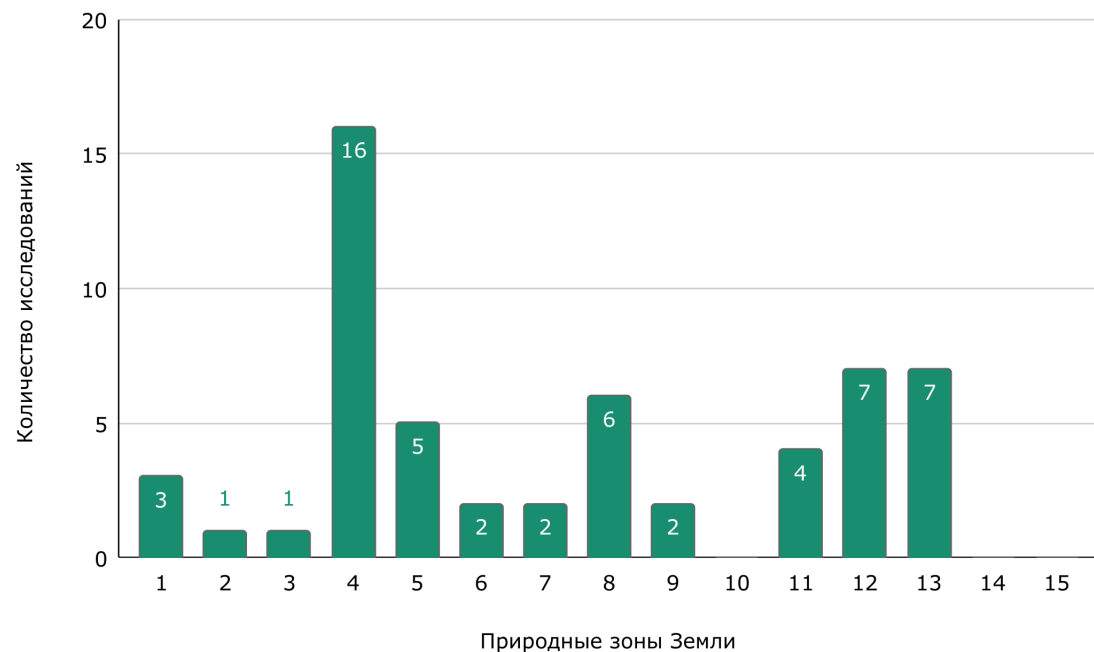


Наиболее информативных предикторов по мнению авторов исследований (6 из 28) 8

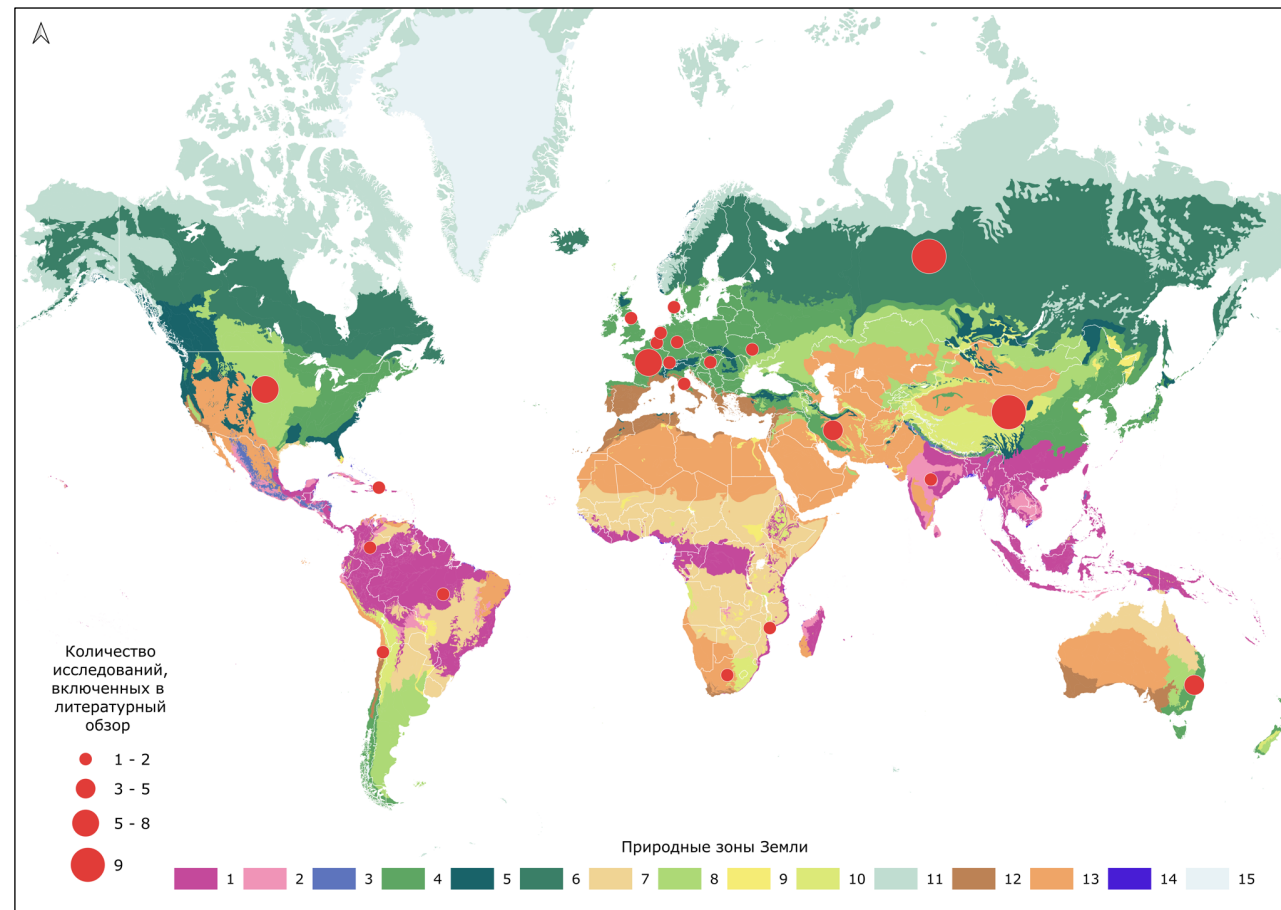
География исследований по странам и анализ опубликованных исследований в зависимости от природной зоны

В зоне широколиственных и смешанных (хвойно-широколиственных) лесов умеренного пояса было проведено наибольшее количество исследований (16).

Далее следовали, в порядке убывания, зоны: жестколистных лесов и кустарников средиземноморского типа(7); пустынь, полупустынь и засушливых кустарников(7); степей и лесостепей, саванн и кустарниковых экосистем умеренного пояса (6)



Распределение исследований по картографированию содержания/запасов органического почвенного углерода по природным зонам (Olson et al., 2001) на региональном уровне



География включенных в обзор исследований по картографированию содержания/запасов почвенного органического углерода на региональном и локальном уровне.

Результаты работы будут опубликованы в журнале «Вопросы лесной науки»
Картографирование содержания и запасов углерода в естественных и антропогенно-преобразованных почвах на региональном и локальном уровнях: анализ современных методических подходов.

Н.В. Гопп, Ю.В. Мешалкина, А.Н. Нарыкова, А.С. Плотникова, О.В. Чернова.

An aerial photograph of a forest. The left side shows a dense stand of thin, bare deciduous trees. The right side shows a mix of evergreen trees, some of which are heavily laden with snow. The overall scene is a winter landscape.

СВЯЗЬ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА С НАИБОЛЕЕ ИНФОРМАТИВНЫМИ ПРЕДИКТОРАМИ

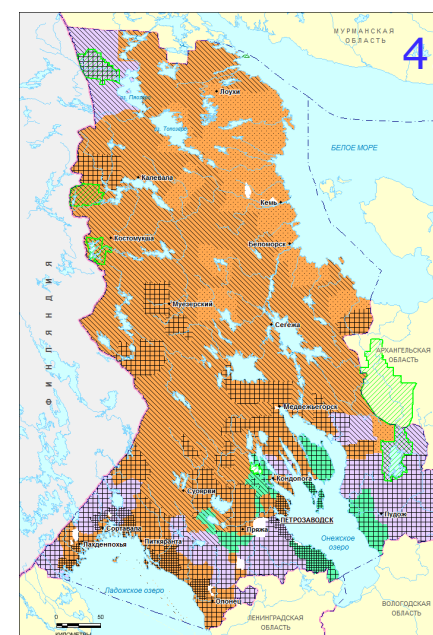
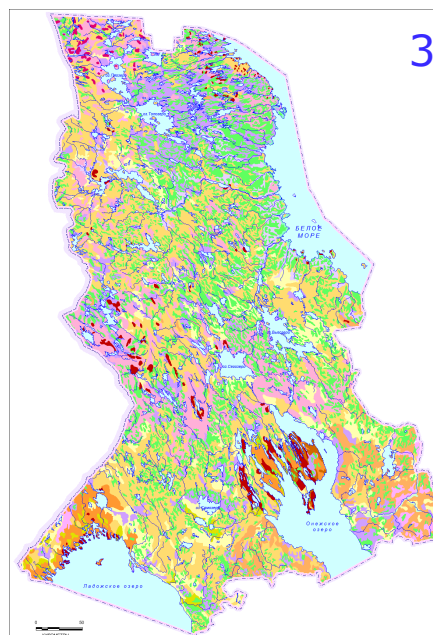
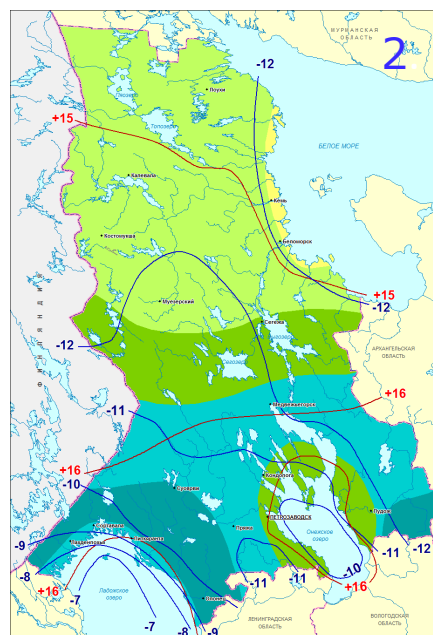
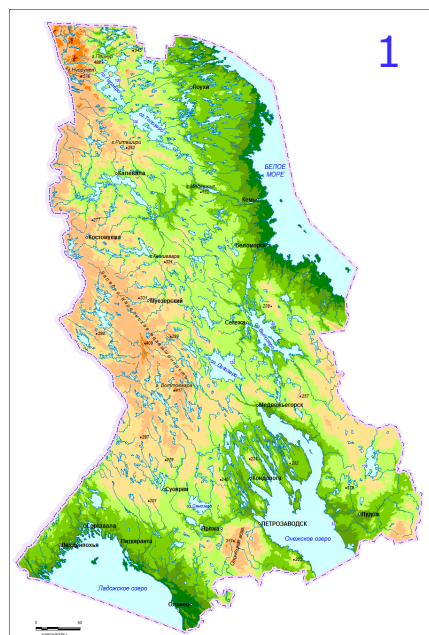
Республика Карелия

Территория Карелии поднимается над уровнем моря в среднем на 300-400 м. СЗ - южная часть водораздельного хребта Маанселькя (578 м). Рельеф этого участка сильно расчленен, заболоченность практически отсутствует. С СЗ на ЮВ - Западно-Карельская возвышенность. К З от Онежского озера расположена платообразная заболоченная Олонецко-Шокшинская возвышенность (до 300 м).

РК располагается на территории северной и средней тайги. В северной тайге господствуют сосновые леса (72%), в средней – сосновые и еловые (39 и 37%), возрастает доля березовых (24%). Основными лесообразующими породами в Карелии являются сосна обыкновенная и ель европейская, ель сибирская, из лиственных пород - береза пушистая, ольха серая, ольха черная.

Преобладают подзолы (Albic Podzols), подбуры (Entic Podzols) идентифицированы в северо-таежных ельниках черничных, березняке черничном, а также в средне-таежных сосняках брусничных, ельниках мелкотравных, ельниках черничных и березняке черничном. Также в березовых лесах на двух ППН идентифицированы подзолистые почвы, на одном ППН – дерново-подзолистые почвы (Albic Retisols). Республика Карелия отличается высокой неоднородностью почвообразующих пород. Преобладают почвообразующие породы легкого гранулометрического состава с низкой влагоемкостью, высокой водопроницаемостью, бедные элементами питания.

Около 30% площади республики занимают заболоченные земли и болота.



Атлас Карелии (2015)
1. Рельеф
2. Климат
3. Почвы
4. Леса

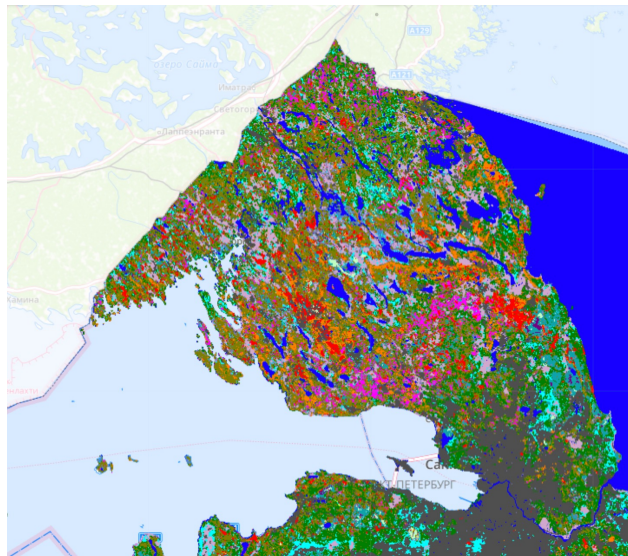
Карельский перешеек

Прибалтийская низменность занимает большую часть рассматриваемой территории и представляет собой полого наклоненную на север волнистую равнину с абсолютными высотами преимущественно от 50 до 100 м, пересеченную густой сетью рек.

Почвы Карельского перешейка в основном супесчаные, среднеподзолистые и подзолисто-болотные.

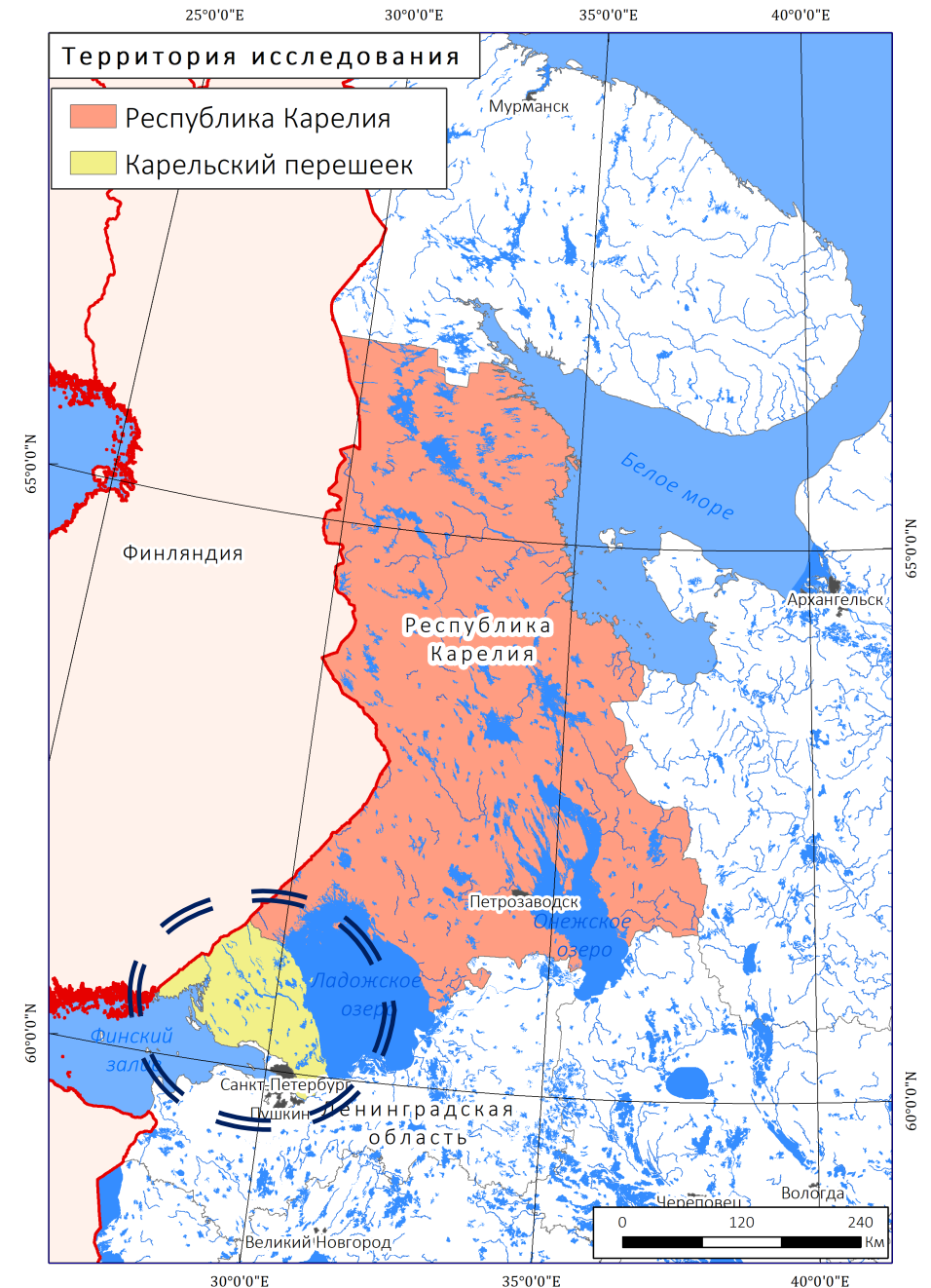
На Карельском перешейке преобладают сосновые леса (51%), в меньшей степени распространены ельники (29%) и березняки (16%). Около 60% территории занято лесом.

Карельский перешеек подвержен антропогенному воздействию, естественные местообитания значительно изменены хозяйственной деятельностью.



- 1 Forests dominated by dark-conifer species (spruce and fir)
- 2 Green moss pine forests (medium moisture)
- 3 Dry pine forests
- 4 Sphagnum pine forests (pine-forested wetlands)
- 5 Deciduous small-leaved forests
- 6 Mixed deciduous-coniferous forests
- 7 Sphagnum dominated bogs
- 8 Sedge and grass mires and fens, also with deciduous trees
- 9 Wet fens and mires (
- 10 Clearcut areas
- 11 Burned areas
- 12 Windfalls
- 13 Water
- 14 Sparse vegetation of tundra and mountains
- 15 Human converted areas with no vegetation
- 16 Croplands
- 17 Grasslands
- 18 Beaches, bare
- 19 Bare ground clearcuts (no overgrowth)

Фрагмент карты Ленинградской области «Растительный покров и антропогенные ландшафты» (<https://hcvf.ru/ru>)



Территория исследования

Исходные данные / обучающая выборка

ICP-Forests – международная программа по оценке и мониторингу влияния загрязнения воздуха на леса

Минеральные горизонты почв:

содержание углерода в элювиальном горизонте E (g/kg)
 содержание углерода в иллювиальном горизонте B (g/kg)
 содержание углерода в переходном к почвообразующей породе горизонте BC (g/kg)

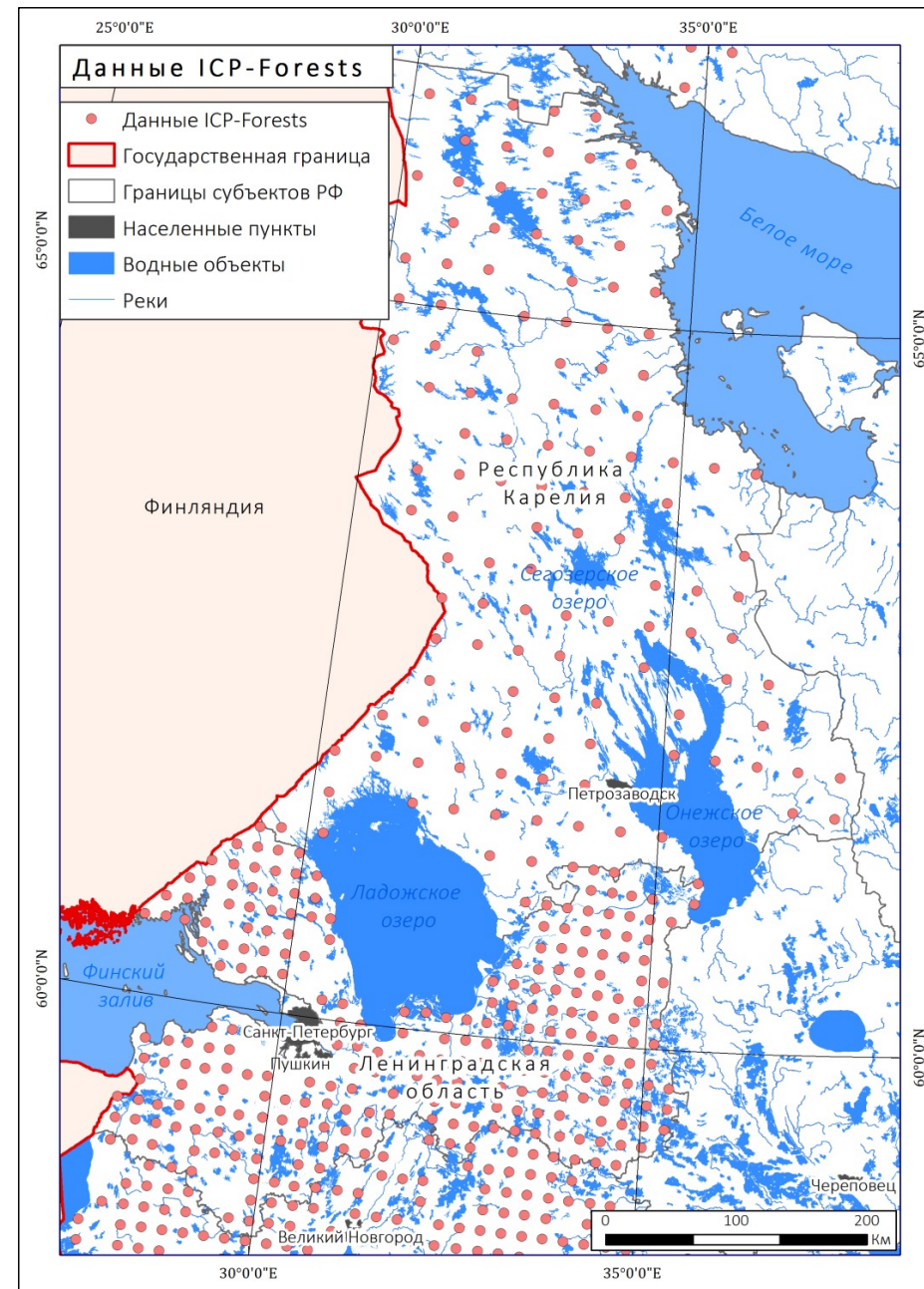
Запасы углерода в почвах =
содержание углерода x плотность x мощность горизонта
 /1000 чтобы привести к привычной единице измерения (кг/м²)

Лесная подстилка подстилка и гумусовый горизонт:

Запасы углерода в лесной подстилке =
содержание углерода x запас подстилки
 /1000 чтобы привести к привычной единице измерения (кг/м²)

POP_ID	Horizon	Horizon limits (cm)	Horizon limits (m)	Bulk density, kg/m ³⁽²⁾	Total Organic Carbon (g/kg)	Запасы C kg/m ²	Total Nitrogen (g/kg)
10016	A0	0-5	0,05	10,8	313,91	3,39	10,11
10016	E	5-11	0,06	1093	9,16	0,60	0,06
10016	B	11-39	0,28	1060	7,45	2,21	0,23
10016	BC	от 39	0,16	1060	7,45	1,26	0,05
10016	0-10					0,9166	
10016	0-20					1,7063	
10016	0-30					2,4960	
10016	0-50					4,0754	
10018	A0	0-5	0,05	16,3	451,18	7,33	15,30
10018	B	5-43	0,38	1236	95,25	44,74	2,43

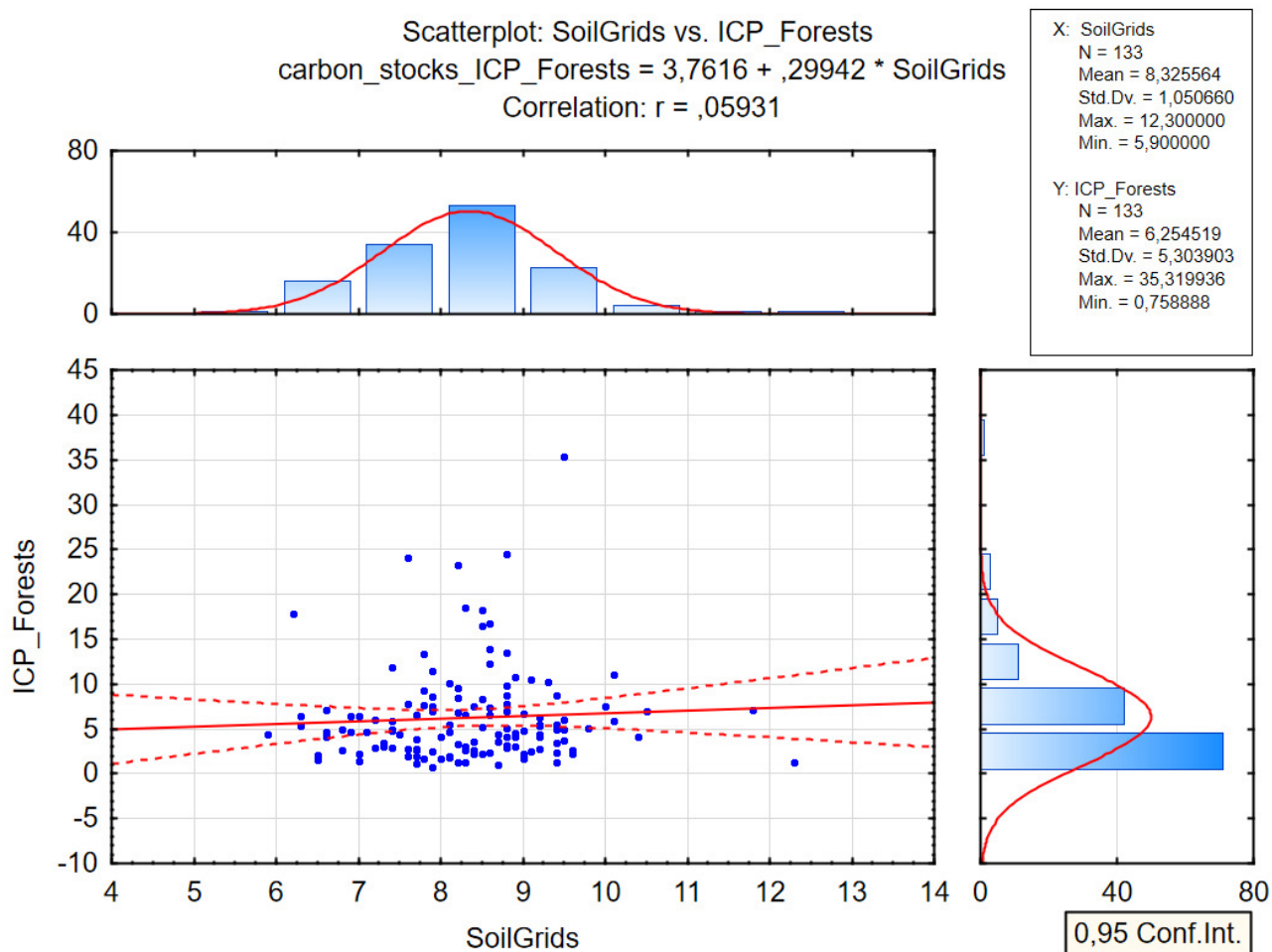
Фрагмент данных ICP-Forests



Распределение пунктов постоянного наблюдения (ППН)

Увеличение обучающей выборки

проведение корреляционного анализа между полевыми данными ICP-Forests и глобальными почвенными базами данных (например: **SoilGrids**, Harmonized World Soil Database, Global Soil Organic Carbon Map)



Связь полевых данных ICP-FORESTS (запасы углерода) с глобальной почвенной базой данных SoilGrids (www.soilgrids.org)

В анализе использовались данные модели SoilGrids (Soil organic carbon stock, 0-30 см, kg/m^2); запасы углерода в почве (0-30 см, kg/m^2), вычисленные на основе полевых данных ICP-Forests

слабая корреляционная связь
 $r=0,05931$

Диаграмма рассеяния, показывающая корреляционную связь между запасами углерода и глобальной почвенной базой данных SoilGrids

СВЯЗЬ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА С НАИБОЛЕЕ ИНФОРМАТИВНЫМИ ПРЕДИКТОРАМИ

рельеф, климат, растительность

1. Рельеф

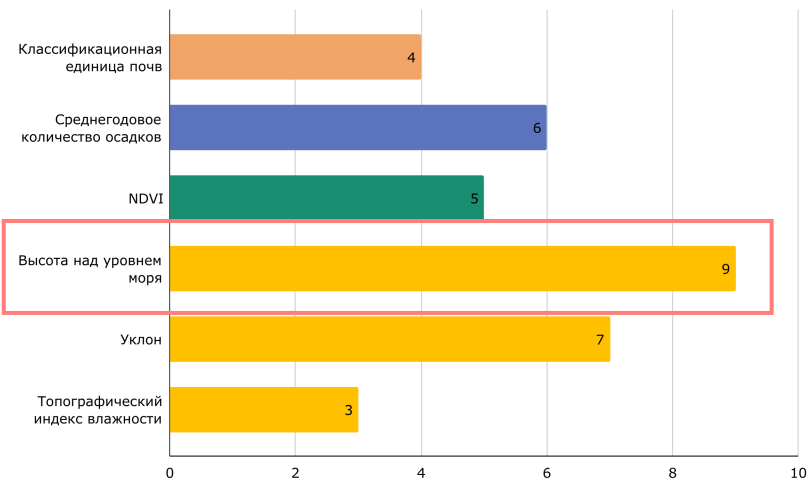
Работа со всей обучающей выборкой

Для выявления связи между запасами углерода и рельефом был проведен корреляционный анализ. Были использованы полевые данные ICP-Forests (запасы углерода в почве, слой 0-30 см (kg/m^2)) и информация о рельефе из ЦМР ArcticDEM - высота над уровнем моря.

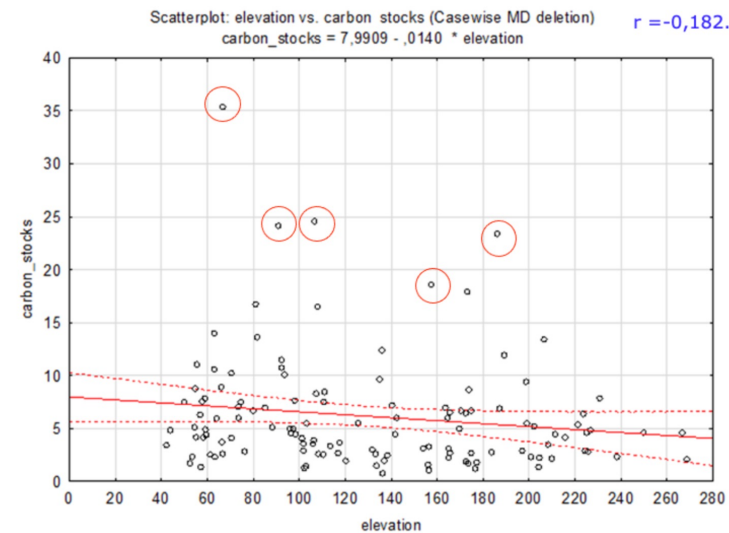
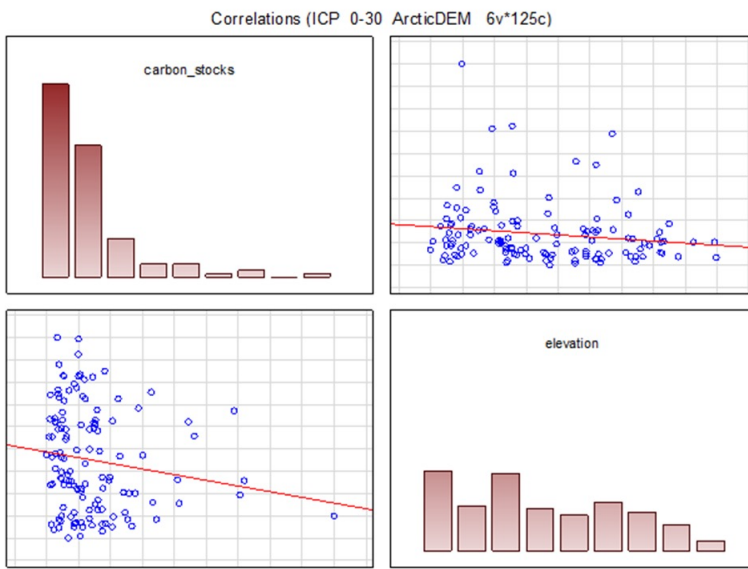
Из данных ICP-Forests было взято 125 значений из 139, т.к. ЦМР ArcticDEM имеет пропуски и артефакты.

Коэффициент корреляции Спирмена показал слабую значимую обратную зависимость - $r = -0,182$.

Чем ниже значение высот, тем несколько выше значение запасов углерода.



Наиболее информативных предикторов по мнению авторов исследований (6 из 28)

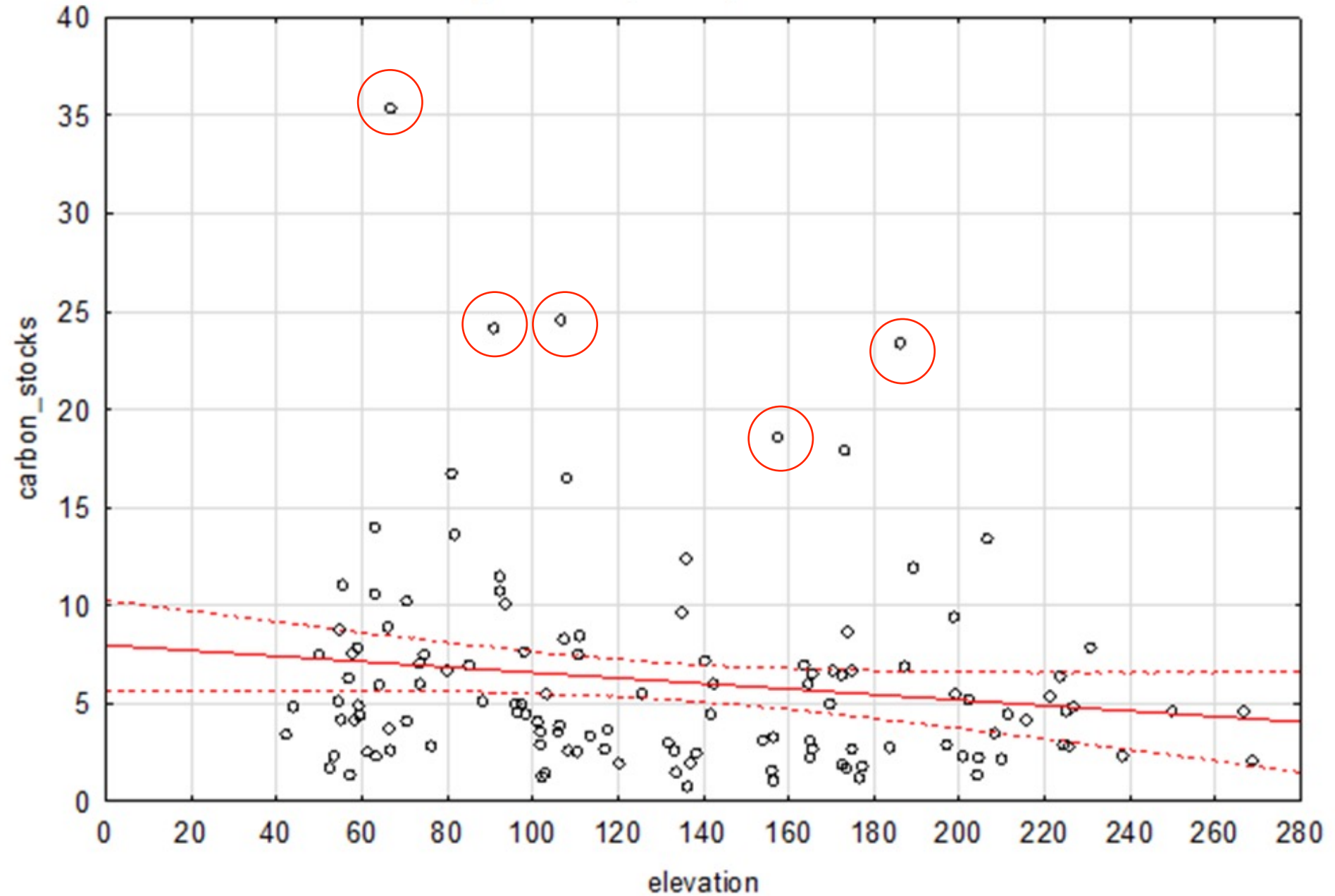


Диаграммы рассеяния, показывающие корреляционную связь между запасами углерода и высотой над уровнем моря

Scatterplot: elevation vs. carbon stocks (Casewise MD deletion)

$r = -0,182.$

$$\text{carbon_stocks} = 7,9909 - ,0140 * \text{elevation}$$



Рельеф-2

Предварительная подготовка данных перед проведением корреляционного анализа

Полевые измерения
ICP-Forests (2008 г.)



запасы углерода
в почве (kg/m²)
0-30 см

Автоморфные
условия

Северная тайга

Средняя тайга

Березовые леса

Сосновые леса

Еловые леса

Березовые леса

Сосновые леса

Еловые леса

Определение различных климатических
условий на всей исследуемой территории

Разделение по формациям

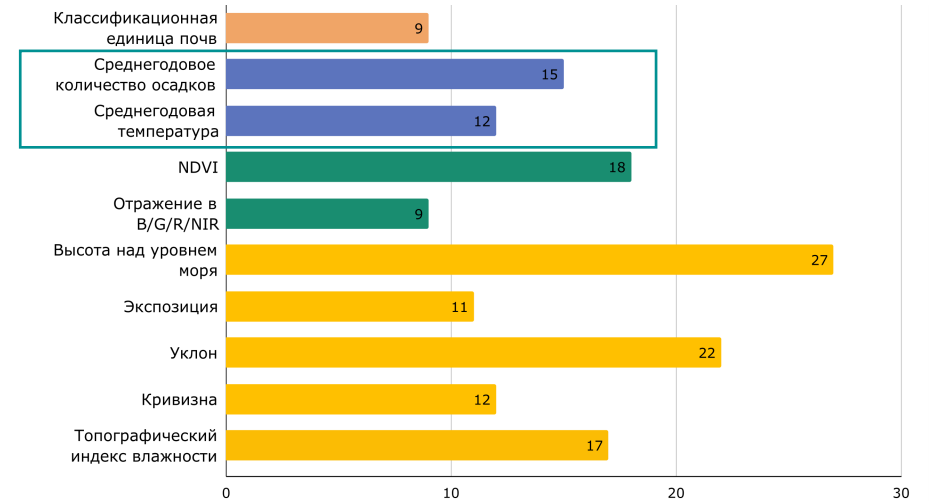
Климат

Работа со всей обучающей выборкой

Для выявления связи между запасами углерода и климатом будет проведен корреляционный анализ для всей выборки (139 значений)

В качестве информации о климате будет использован набор геопространственных данных **WorldClim** (Hijmans et al., 2005)

- Среднегодовая температура
- Среднегодовое количество осадков

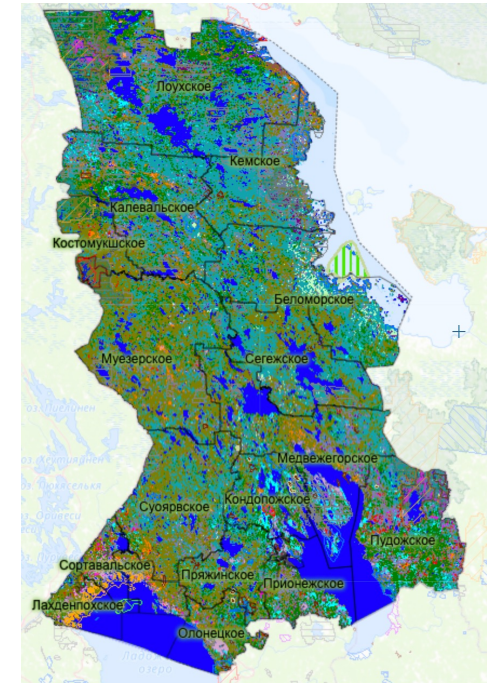


Наиболее часто используемые предикторы (10 из 91)

Растительность

Карта Растительный покров и антропогенные ландшафты Республики Карелия

Актуальность	2011 год
Авторство	НП "Прозрачный Мир"
Публикация	http://hcvf.ru/ru/publications/sohranenie-tsennih-prirodnih-territoriy-severo-zapada-rossii-analiz-representativnosti
Методика	на стр. 81 публикации
Легенда	<ul style="list-style-type: none">1 Forests dominated by dark-conifer species (spruce and fir)2 Green moss pine forests (medium moisture)3 Dry pine forests4 Sphagnum pine forests (pine-forested wetlands)5 Deciduous small-leaved forests6 Mixed deciduous-coniferous forests7 Sphagnum dominated bogs8 Sedge and grass mires and fens, also with deciduous trees9 Wet fens and mires (10 Clearcut areas11 Burned areas12 Windfalls13 Water14 Sparse vegetation of tundra and mountains15 Human converted areas with no vegetation16 Croplands17 Grasslands18 Beaches, bare19 Bare ground clearcuts (no overgrowth)
Примечания	Обновлено НП "Прозрачный мир" по данным 2011 года
Скачать	https://disk.yandex.ru/d/sHnAB2ys3PYgBe



Карта Растительный покров и антропогенные ландшафты Республики Карелия (<https://hcvf.ru/ru>)

An aerial photograph of a forest in winter. The ground is covered in a layer of snow, and the trees are mostly bare, with some evergreens still visible. The overall tone is muted and wintry.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАПАСОВ ПОЧВЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА
С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА RANDOM FOREST**

Представление предикторов на основе модели SCORPAN, которая активно используется в цифровом почвенном картографировании (McBratney et al., 2003)

$$Sc = f(s, c, o, r, p, a, n) \text{ и } Sa = f(s, c, o, r, p, a, n)$$

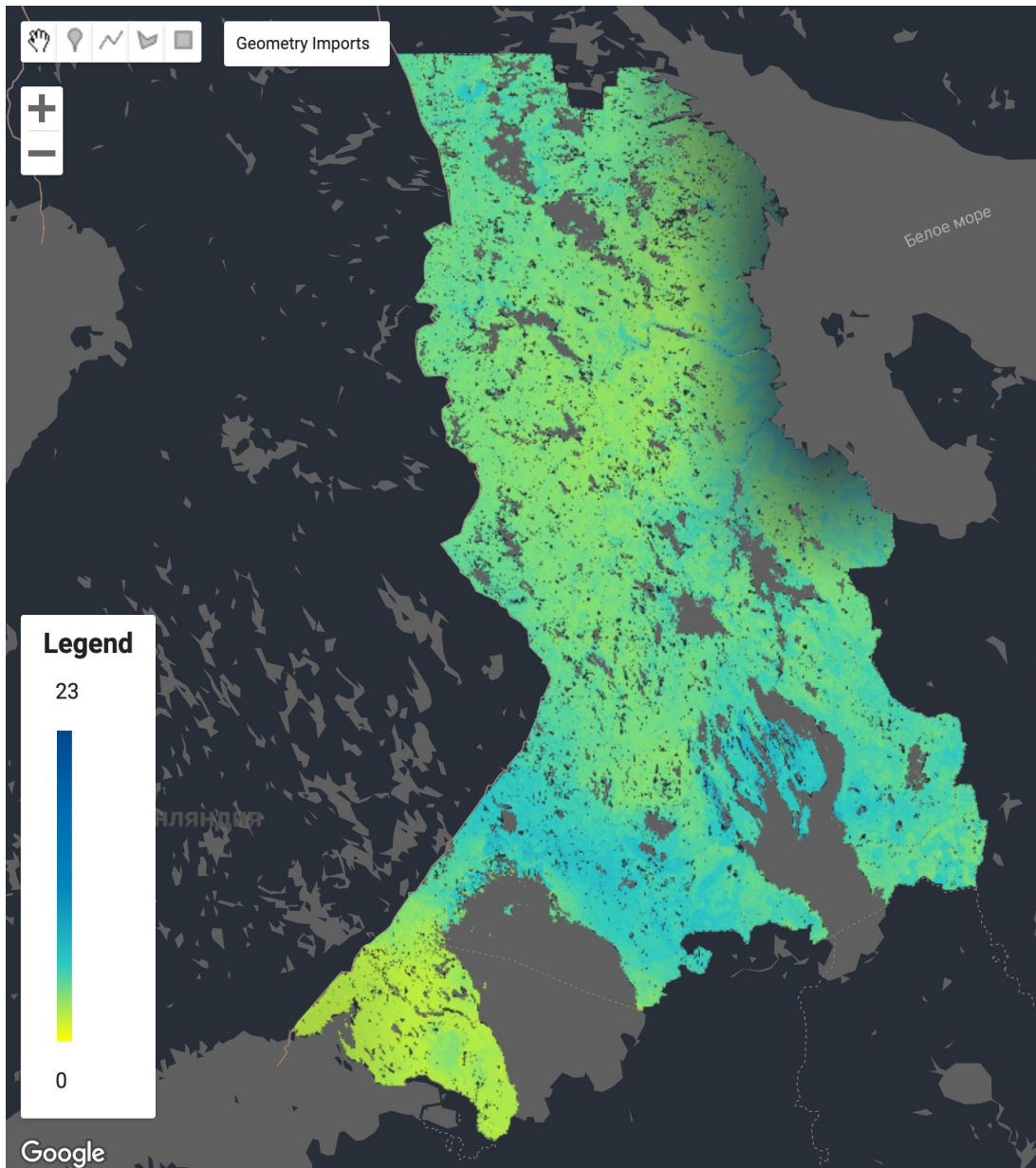
пространственное положение



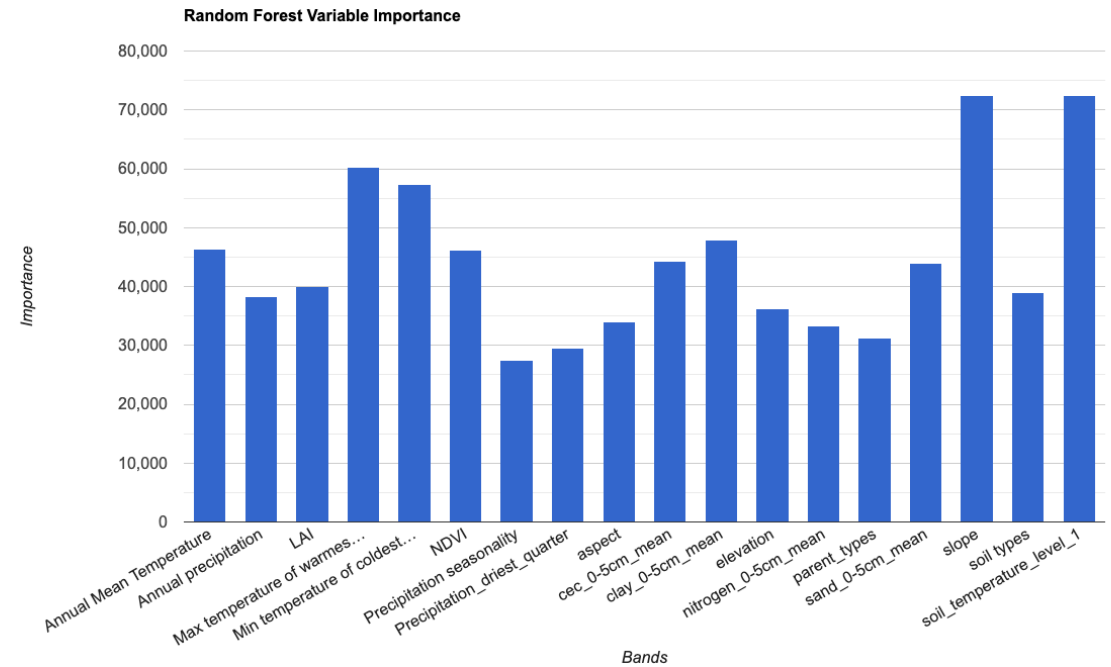
где Sc – почвенные таксономические единицы; Sa – количественная характеристика почвы; s – почва (другие характеристики почвы); c – климат (климатические характеристики); o – организмы, растительность, фауна, человек; r – рельеф (ЦМР и морфометрические величины); p – материнская порода, литология; a – возраст, время, повторность при мониторинге; n – пространственное положение.

Моделирование запасов углерода в лесной подстилке с помощью алгоритма Random Forest

```
ee.Classifier.smileRandomForest  
.setOutputMode('REGRESSION')
```



Запасы углерода в лесной подстилке (A0)



Информативность использованных пространственных предикторов

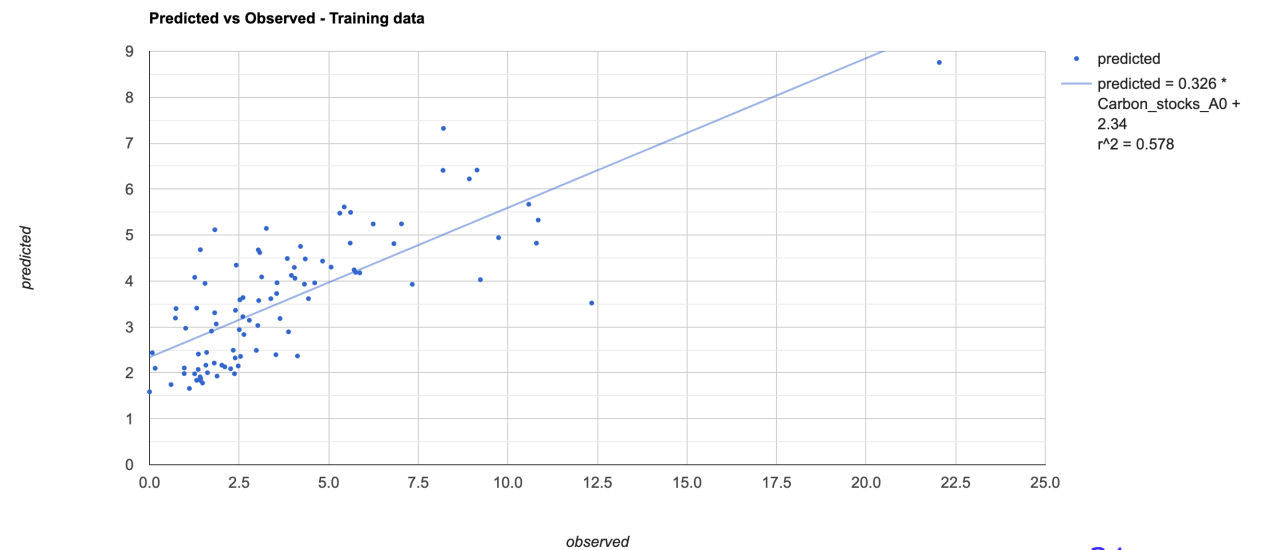
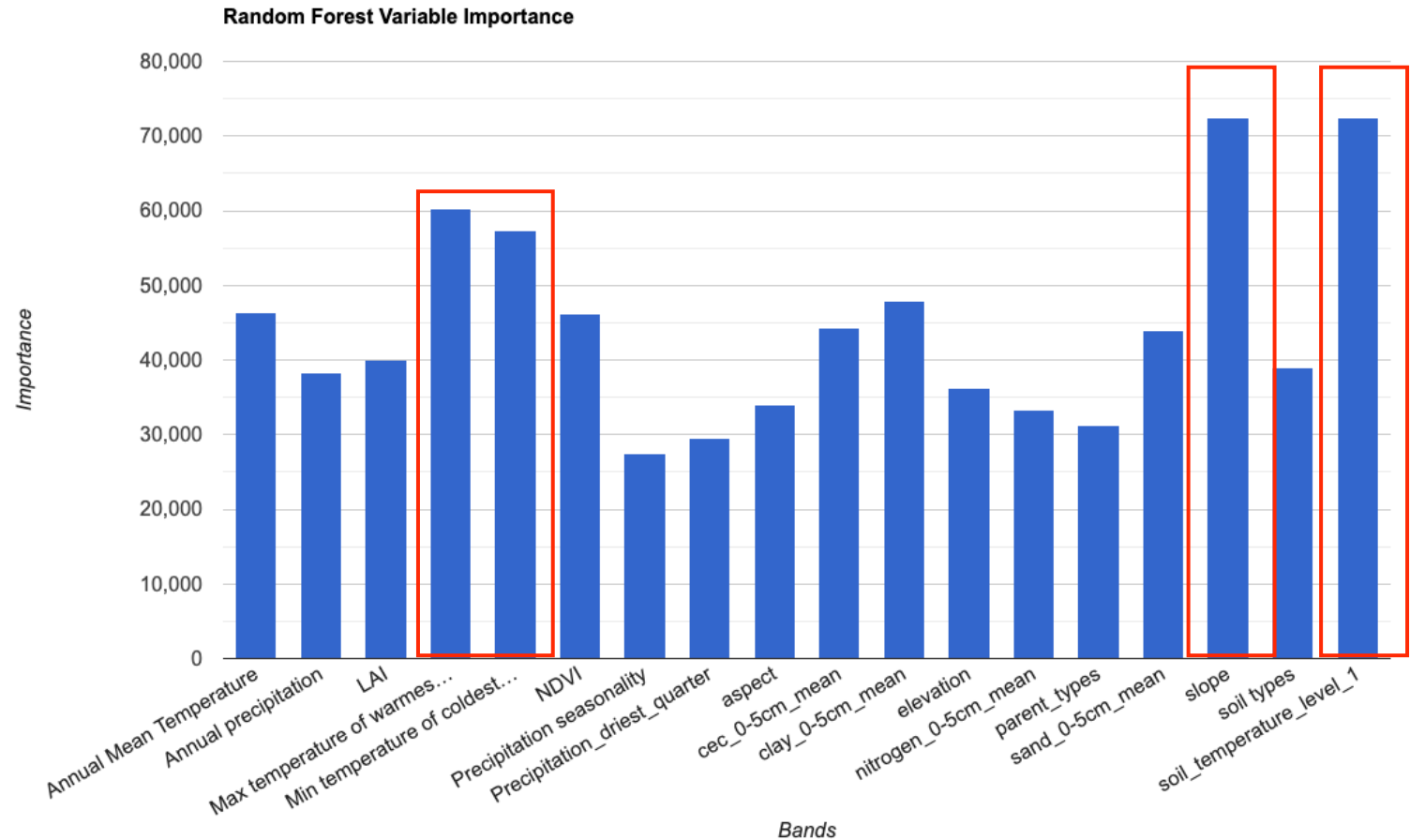


Диаграмма рассеяния с линией регрессии
 $R^2 = 0,578$

- 0: elevation
- 1: slope
- 2: aspect
- 3: Annual Mean Temperature
- 4: Annual precipitation
- 5: Precipitation seasonality
- 6: Max temperature of warmest month
- 7: Min temperature of coldest month
- 8: Precipitation_driest_quarter
- 9: nitrogen_0-5cm_mean
- 10: cec_0-5cm_mean
- 11: sand_0-5cm_mean
- 12: clay_0-5cm_mean
- 13: soil types
- 14: parent_types
- 15: soil_temperature_level_1
- 16: NDVI
- 17: LAI

Использованные пространственные предикторы



Информативность использованных пространственных предикторов

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ – 2022-2023 Г.

2023

Картографирование содержания и запасов углерода в естественных и антропогенно-преобразованных почвах на региональном и локальном уровнях: анализ современных методических подходов.

Н.В. Гопп, Ю.В. Мешалкина, А.Н. Нарыкова, А.С. Плотникова, О.В. Чернова.

Вопросы лесной науки.

Статус: поступила в редакцию 04.04.2023

2022

Картографирование экосистемных услуг на локальном уровне: обзор современного состояния исследований

А.Н. Нарыкова, А.С. Плотникова.

Вопросы лесной науки. 2022. Т. 5. № 3. Статья № 110.

Применение ГИС-технологий для создания пространственных предикторов в целях картографирования экосистемных функций лесов на локальном уровне

М.С. Савин, А. С. Плотникова, А.Н. Нарыкова.

Вопросы лесной науки. 2022. Т. 5. № 2. С. 88-102.

Application of GIS technologies to build spatial predictors for mapping forest ecosystem functions at the local level.

M. S. Savin, A. S. Plotnikova., A. N. Narykova

Forest Science Issues. 5(2):1-15.

УЧАСТИЕ В КОНФЕРЕНЦИЯХ 2022-2023

12–16 декабря 2022

Участие в ежегодной международной геофизической конференции

American Geophysical Union (AGU), очное

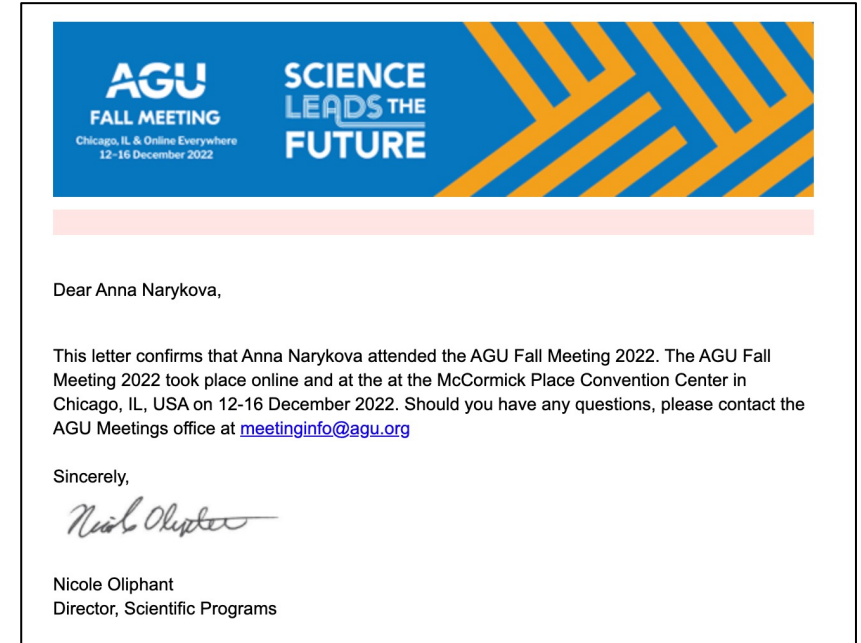
Направление: Biogeosciences

Постерная секция: Advances in Land Carbon Cycle Modeling

Название работы: Anna Narykova, Aleksandra Plotnikova. Modeling carbon stocks in forest soil using Google Earth Engine(The republic of Karelia and the Karelian isthmus, Russia)

23–27 марта 2023

Очное участие в ежегодной международной конференции Association of American Geographers (AAG), очное



An aerial photograph of a forest in winter. The ground is covered in a layer of snow. Evergreen trees are dark green and heavily laden with snow, while deciduous trees are bare and their branches are a light brown color. The overall scene is serene and quiet.

ПЛАНЫ ДО КОНЦА 2023

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

Проведение корреляционного анализа между данными ICP-Forests и основными предикторами (рельеф, климат и растительность)

Нарыкова А.Н., Никитина А.Д., Плотникова А.С.

Журнал: «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Scopus, Q3

Должна быть опубликована до конца года

(публикация в рамках молодежной лаборатории на 2023 г.)

Описание и анализ полученной модели с помощью алгоритма машинного обучения Random Forest

Нарыкова А. Н., Плотникова А. С., Кузнецова А.

Журнал: «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Scopus, Q3

ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ КУРСЫ - 2023

Программа повышения квалификации от факультета почвоведения МГУ имени М. В. Ломоносова

«Основы почвоведения для экологов»

УЧАСТИЕ В КОНФЕРЕНЦИЯХ

22–24 мая 2023

Международная научная конференция "Пространственные данные", организованная Московским государственным университетом геодезии и картографии (МИИГАиК), online-участие

12–15 сентября 2023

X Международная научная конференция "Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли" в Красноярске, online-участие

18–22 сентября 2023

Всероссийская научная конференция с международным участием «Актуальные вопросы теории и практики лесного почвоведения», которая состоится на базе Карельского научного центра РАН в Петрозаводске, online-участие

13–17 ноября 2023

Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса» в Институте космических исследований РАН, online-участие

11–15 декабря 2023

Ежегодная международная геофизическая конференция American Geophysical Union (AGU), очное участие в постерной секции

An aerial photograph of a vast, dense forest covered in snow. A narrow, winding path or road cuts through the trees, leading from the foreground towards the horizon. The sky is overcast and grey. The overall scene is serene and wintry.

Спасибо за внимание !

Благодарность

**Даниловой М.А.,
Никитиной А.Д.,
Кузнецовой А.И.**