



Секция «Оценка экосистемных функций и  
состояния лесной биоты и почв»

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ  
ОЦЕНКИ СОДЕРЖАНИЯ АЗОТА И УГЛЕРОДА В ЛЕСНОЙ  
ПОСТИЛКЕ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ И НАЗЕМНЫХ ДАННЫХ**

*Е.А. Гаврилюк, А.И. Кузнецова, А.В. Горнов*

Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, г. Москва

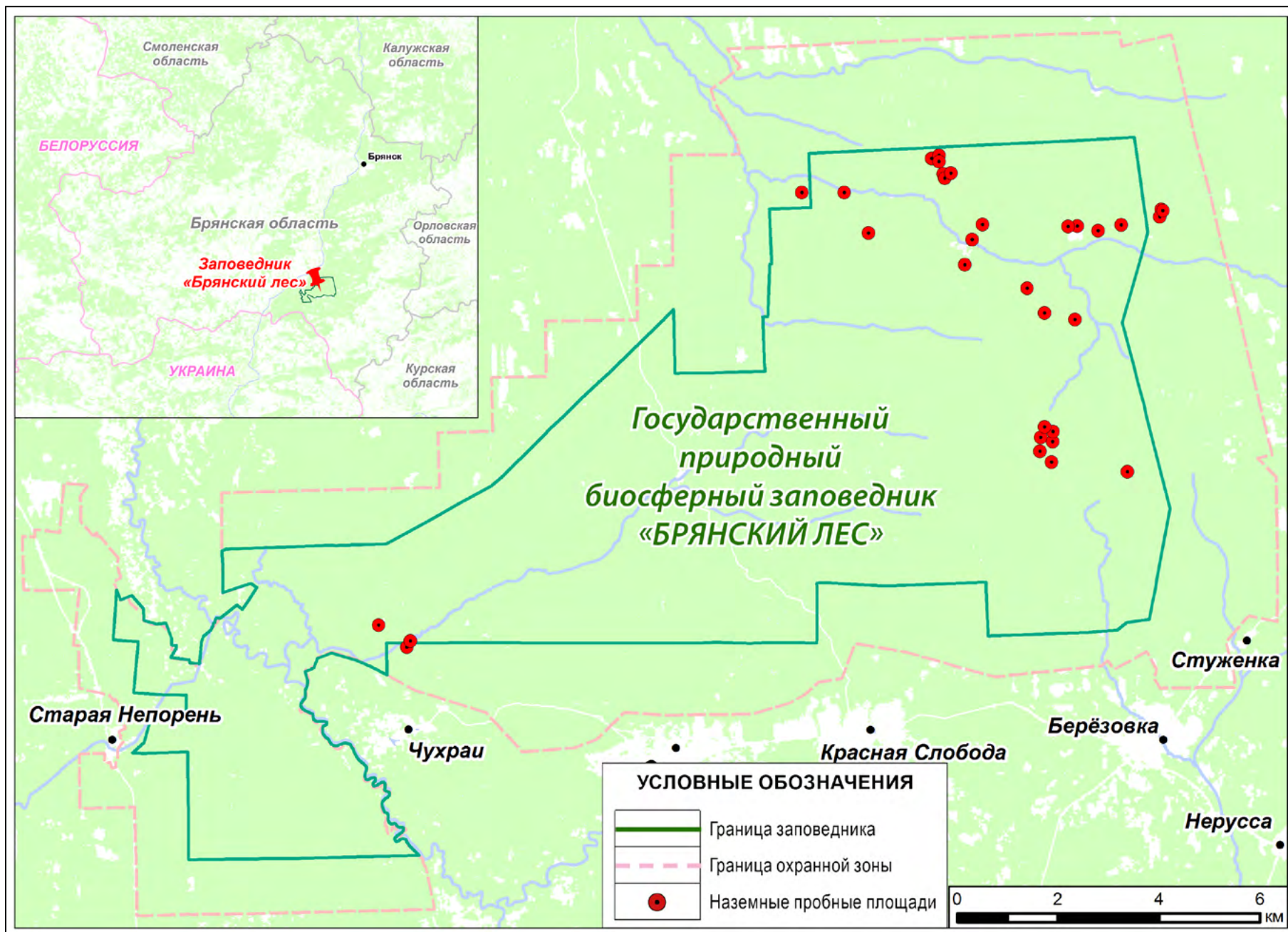
# Цель работы

**Исследовать и количественно охарактеризовать опосредованные взаимосвязи между показателями содержания азота и углерода в лесной подстилке и спектральными характеристиками разносезонных оптических спутниковых изображений.**

Лесная подстилка, являясь продуктом функционирования лесных биогеоценозов, регулирует широкий спектр экосистемных процессов. Содержание углерода и азота, а также их соотношение (C/N), характеризуют качество опада, от которого зависит скорость биологического круговорота и, в конечном счете, продуктивность лесонасаждений.

Помимо этого, величины запасов углерода характеризуют способность лесных экосистем к его депонированию, в частности в пулах подстилки, что приобретает особую актуальность в связи с современными глобальными изменениями климата.

# Территория исследования



# Исходные данные и методы

- Наземные данные

Результаты лабораторной обработки образцов лесной подстилки, собранных на 33 пробных площадях в 2016-2017 годах (3-4 повторности на каждой) с использованием рамки размером 25x25 см. Оценивались **концентрация** (в %) и **запас** (в кг/м<sup>2</sup>) **азота (N)** и **углерода (C)** по двум подгоризонтам подстилки – **L** (свежий или слаборазложившийся опад) и **FH** (слой ферментации и разложение растительных остатков).

- Спутниковые данные

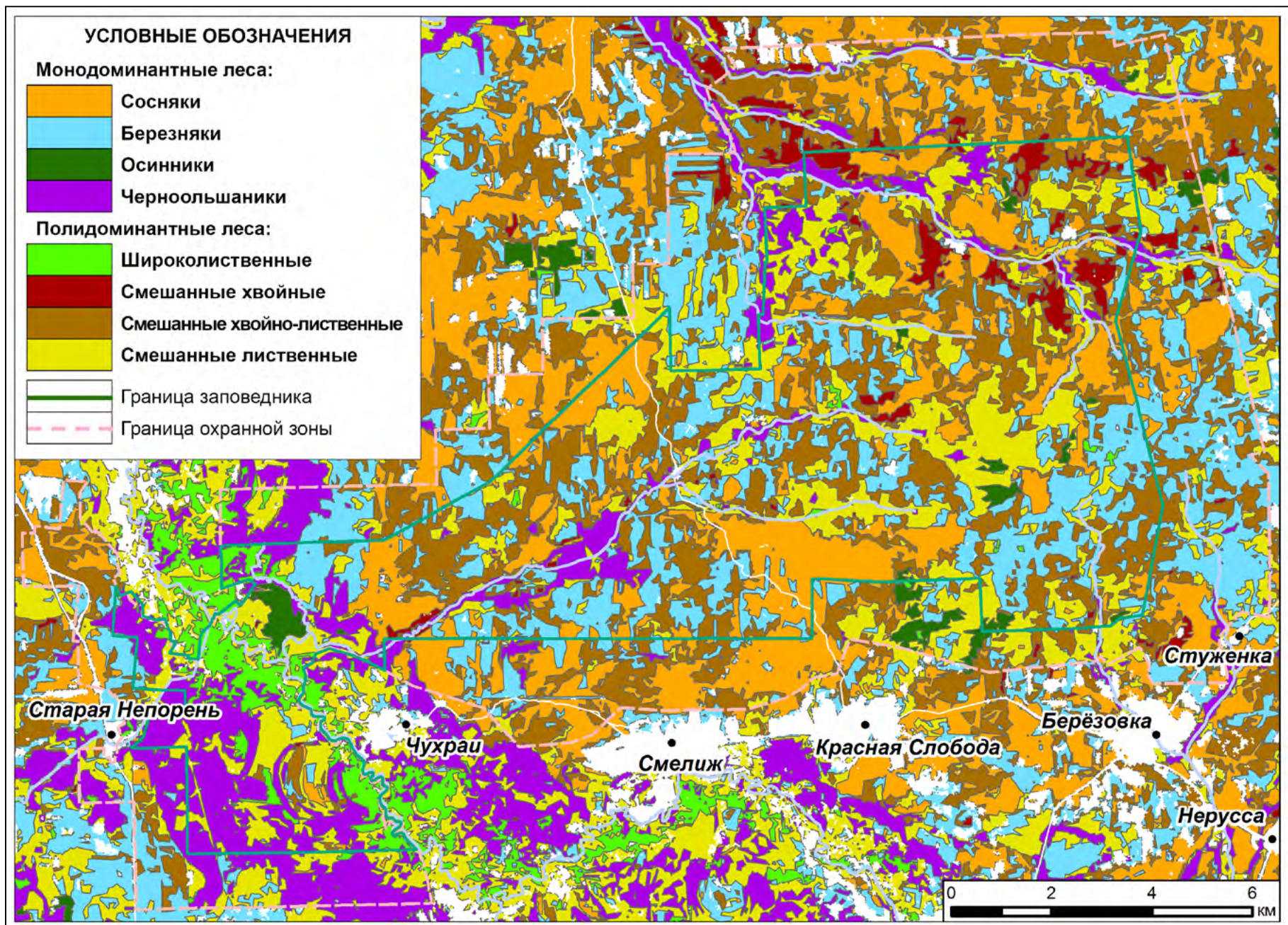
Шесть разносезонных (**конец января, начало апреля, начало и конец мая, август, сентябрь**) безоблачных сцен Landsat-OLI (продукт уровня S2) из открытого архива Геологической службы США (USGS) за период с 2014 по 2018 годы и рассчитанных на их основе вегетационных индексов **NDVI** (Rouse et al., 1974), **SWVI** (также известен как NDWI, Gao et al., 1996) и **EVI** (Huete et al., 2002).

- Методы

**Случайные леса** (Breiman, 2001) для задач классификации и регрессии, а также **метод повторных медиан** (Siegel, 1982) для калибровки значений, полученных по результатам регрессионного моделирования.



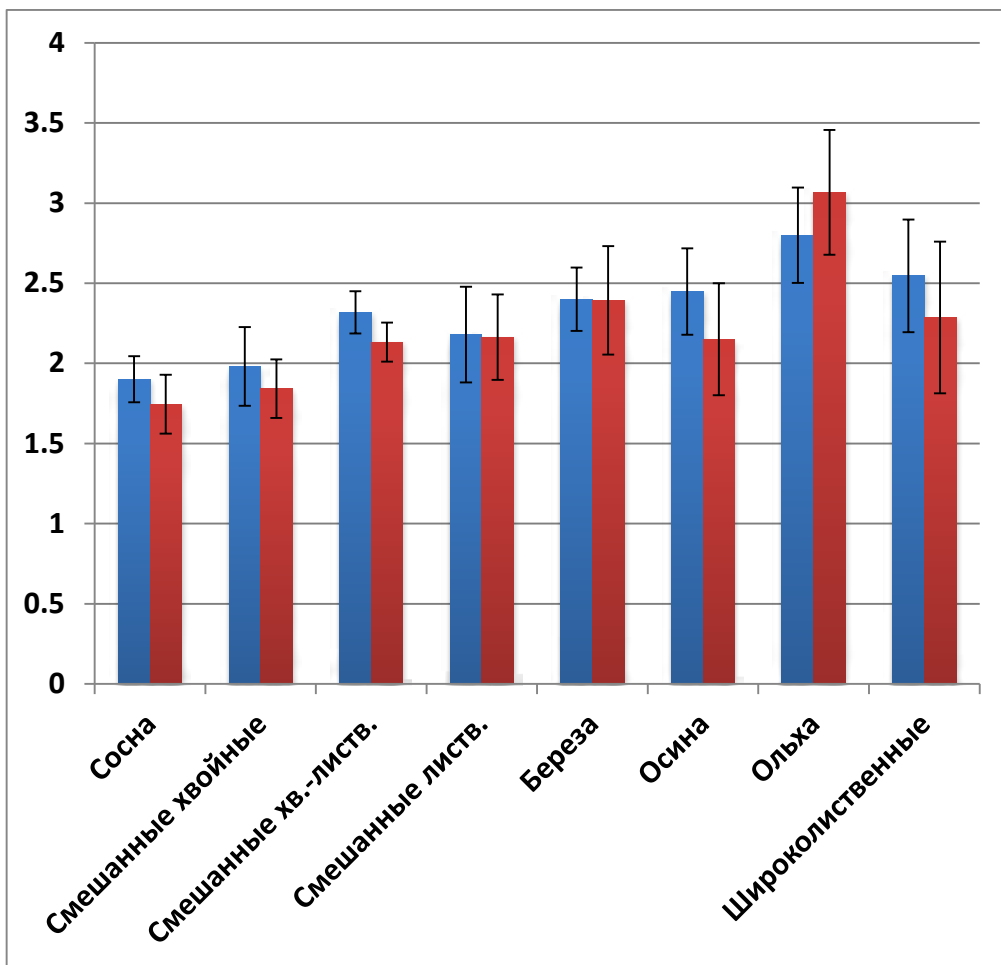
# Карта доминантов древесного полога



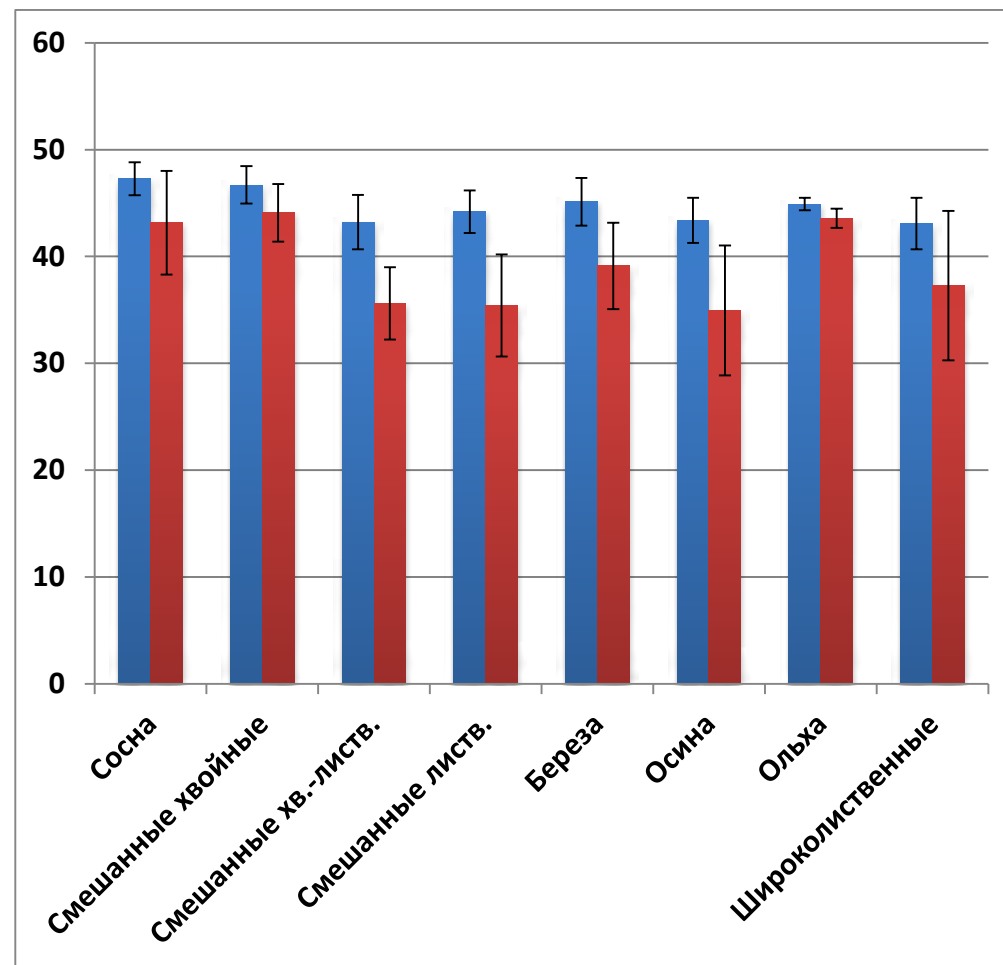


# Характеристики лесной подстилки в древостоях различных по породному составу

## Концентрация азота (N), %



## Концентрация углерода (C), %

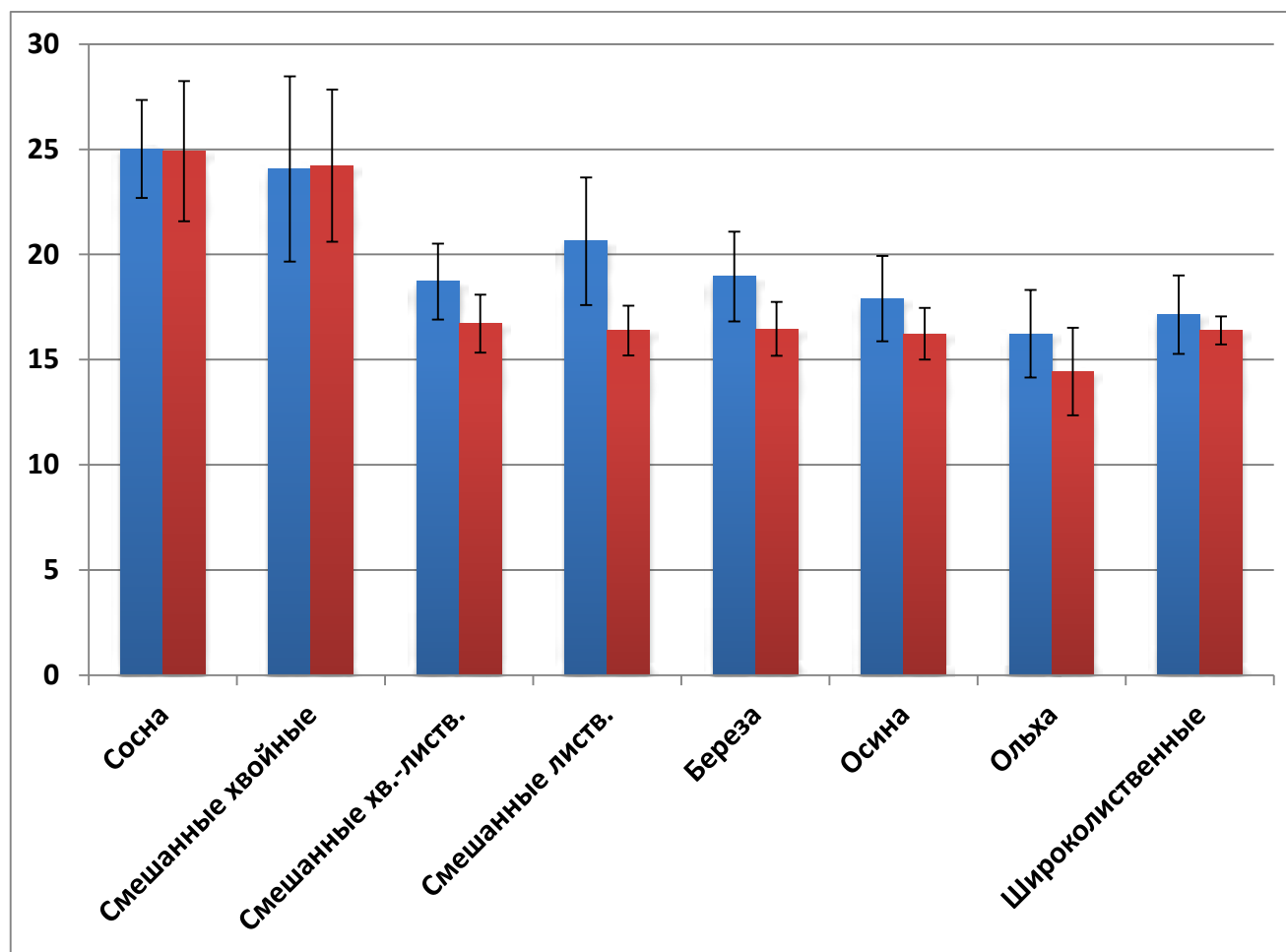


■ подгоризонт L

■ подгоризонт FH

# Характеристики лесной подстилки в древостоях различных по породному составу

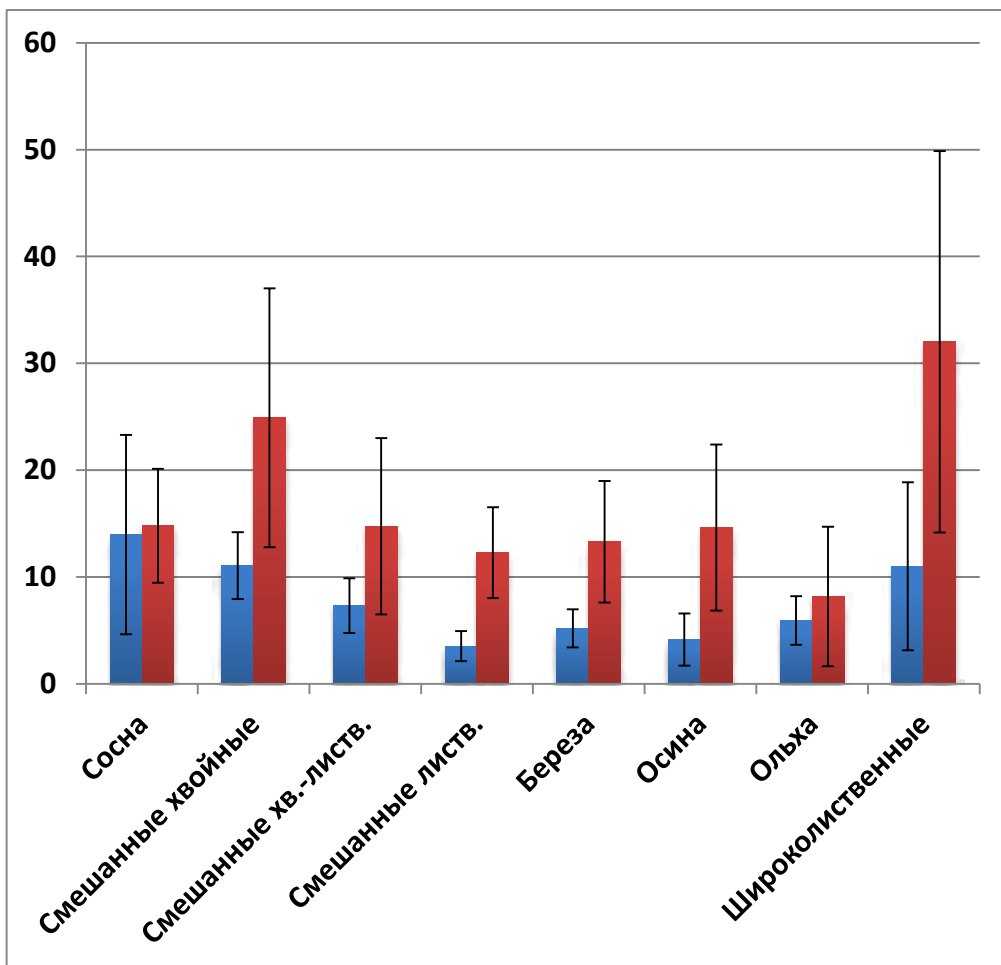
## Отношение концентрации углерода к азоту (C/N)



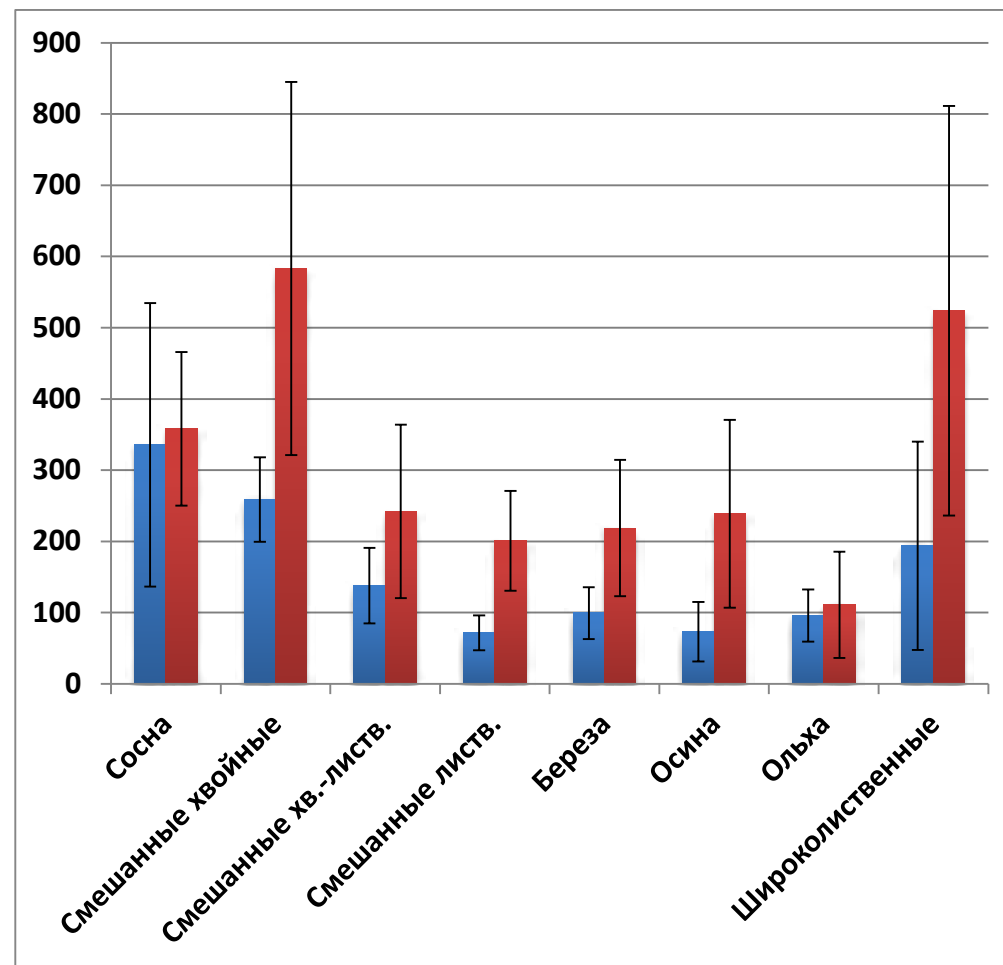
■ подгоризонт L    ■ подгоризонт FH

# Характеристики лесной подстилки в древостоях различных по породному составу

## Запас азота (N), г/м<sup>2</sup>



## Запас углерода (C), г/м<sup>2</sup>



■ подгоризонт L

■ подгоризонт FH

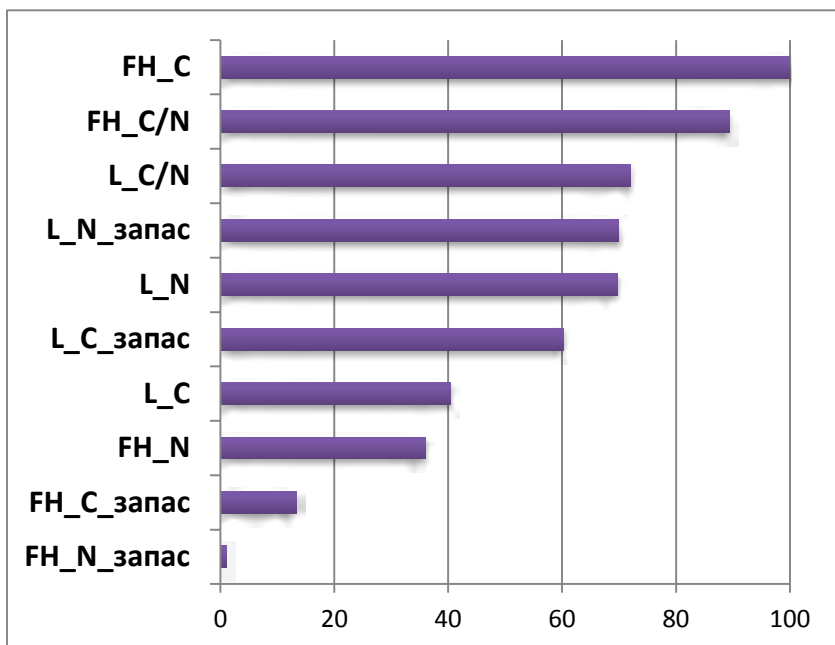


# Тематическая классификация лесов по породному составу на основе характеристик лесной подстилки

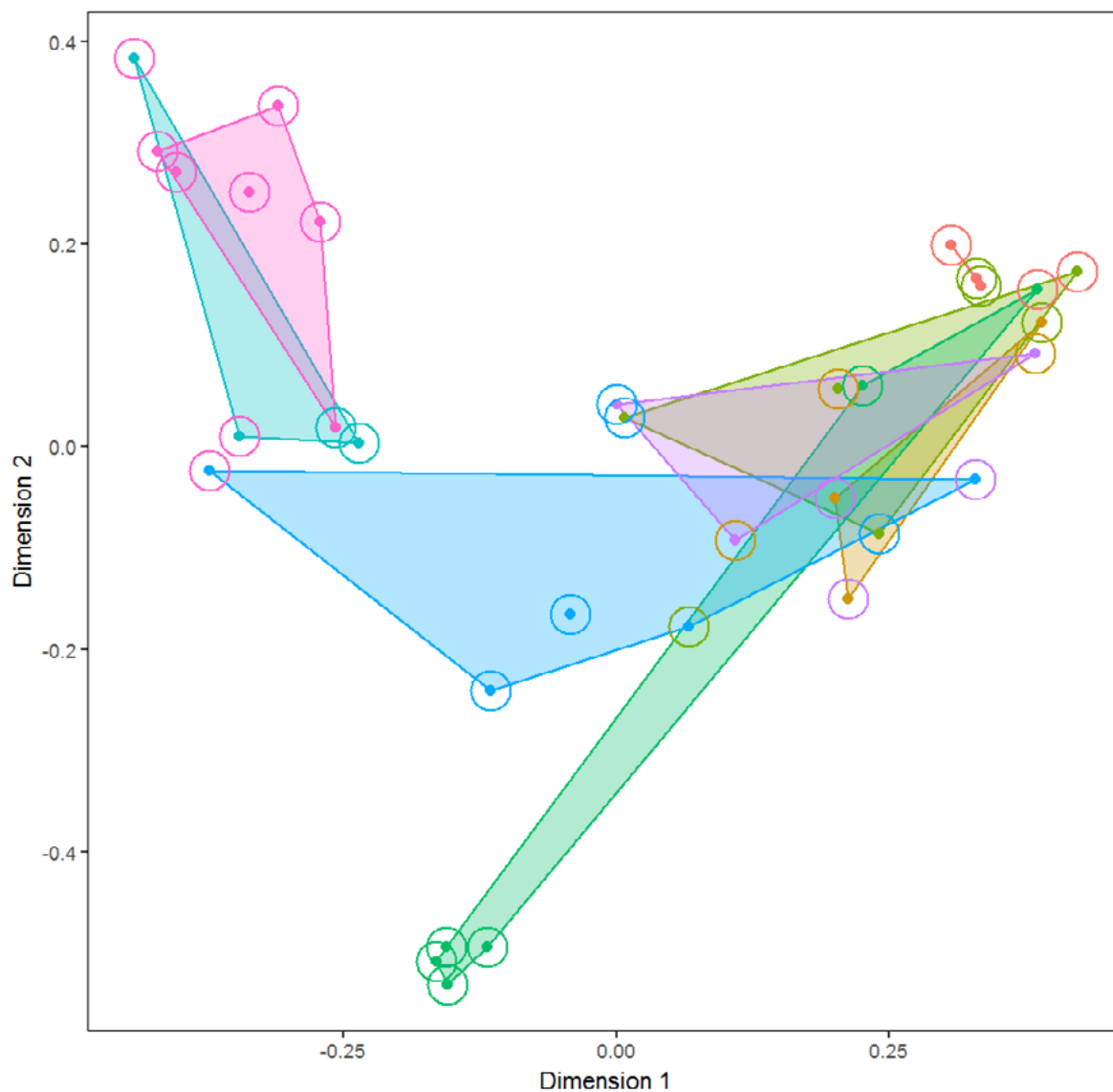
Матрица ошибок

Сосна	1	0	0	0	0	0	0	1	5
Смеш. хвойные	2	0	0	0	0	0	0	1	2
Смеш. хв.-листв.	3	0	0	0	1	1	2	0	1
Смеш. листв.	4	0	0	2	0	0	1	0	0
Береза	5	0	1	1	0	0	2	0	0
Осина	6	0	0	0	1	2	0	0	0
Ольха	7	0	1	0	2	0	0	0	0
Широколиственные	8	5	1	0	0	0	0	0	0
Общая точность: 42,4%	8	7	6	5	4	3	2	1	

Информативность переменных



Двумерная визуализация матрицы близости



# Регрессионное моделирование характеристик лесной подстилки по спутниковым данным

- Повторные измерения осреднялись на уровне каждой пробной площади.
- Каждой пробной площади ставились в соответствие от 6 до 9 пикселей изображений Landsat, ближайших к координатам заложения.
- Для обучения регрессионной модели использовались 24 пробных площади, для проверки – 9.
- Моделирование проводилось на основе 18 спектральных переменных (6 дат по 3 индекса).
- Для расчета параметров точности модели предсказанные значения пикселей осреднялись на уровне каждой пробной площади.

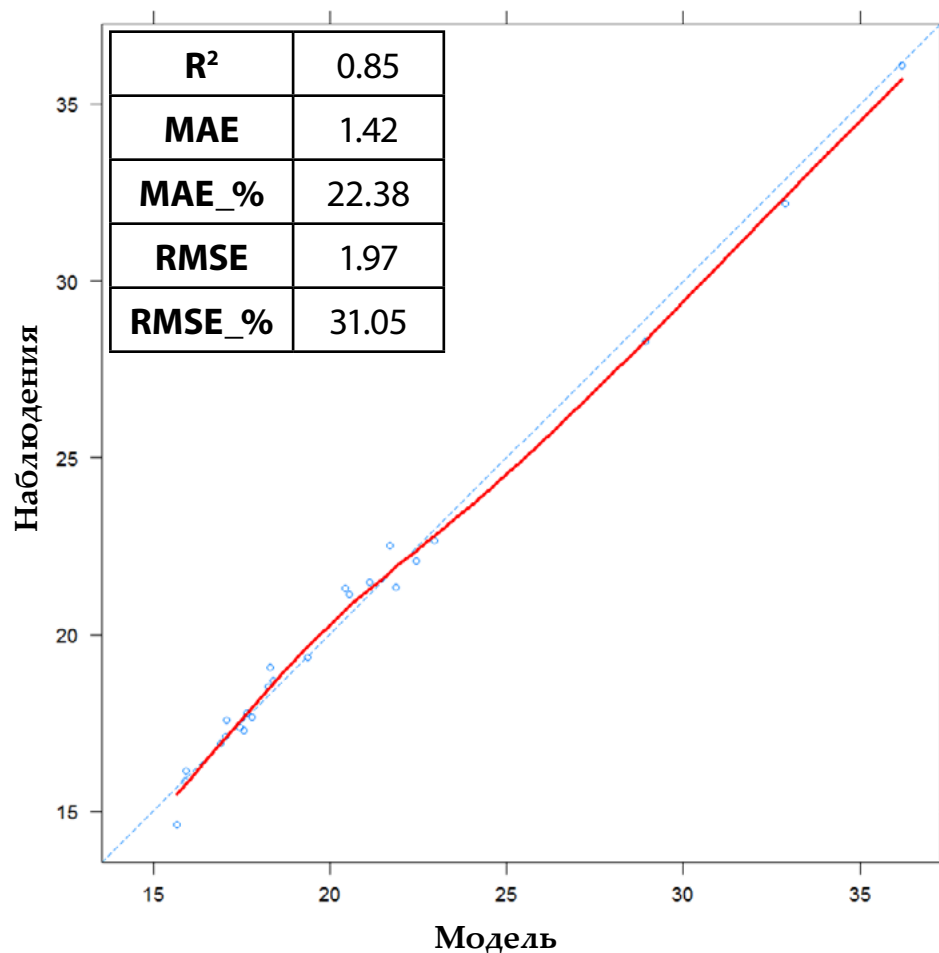
# Сводные таблицы результатов моделирования

Оценки модели	L_N		L_C		L_C/N		L_N_запас		L_C_запас	
	<i>RF</i>	<i>Test</i>	<i>RF</i>	<i>Test</i>	<i>RF</i>	<i>Test</i>	<i>RF</i>	<i>Test</i>	<i>RF</i>	<i>Test</i>
<b>R<sup>2</sup></b>	0.77	0.60	0.74	<b>0.57</b>	<b>0.85</b>	<b>0.84</b>	<b>0.74</b>	0.63	0.76	0.63
<b>MAE</b>	0.13	0.20	0.84	1.46	1.42	2.08	1.74	2.07	36.58	43.66
<b>MAE_%</b>	14.37	21.45	<b>12.09</b>	<b>20.88</b>	22.38	32.85	<b>26.42</b>	<b>31.46</b>	24.97	29.80
<b>RMSE</b>	0.19	0.23	1.18	1.78	1.97	2.35	2.78	2.79	59.10	59.93
<b>RMSE_%</b>	21.02	<b>24.61</b>	<b>16.97</b>	25.56	31.05	37.15	<b>42.18</b>	<b>42.33</b>	40.34	40.91

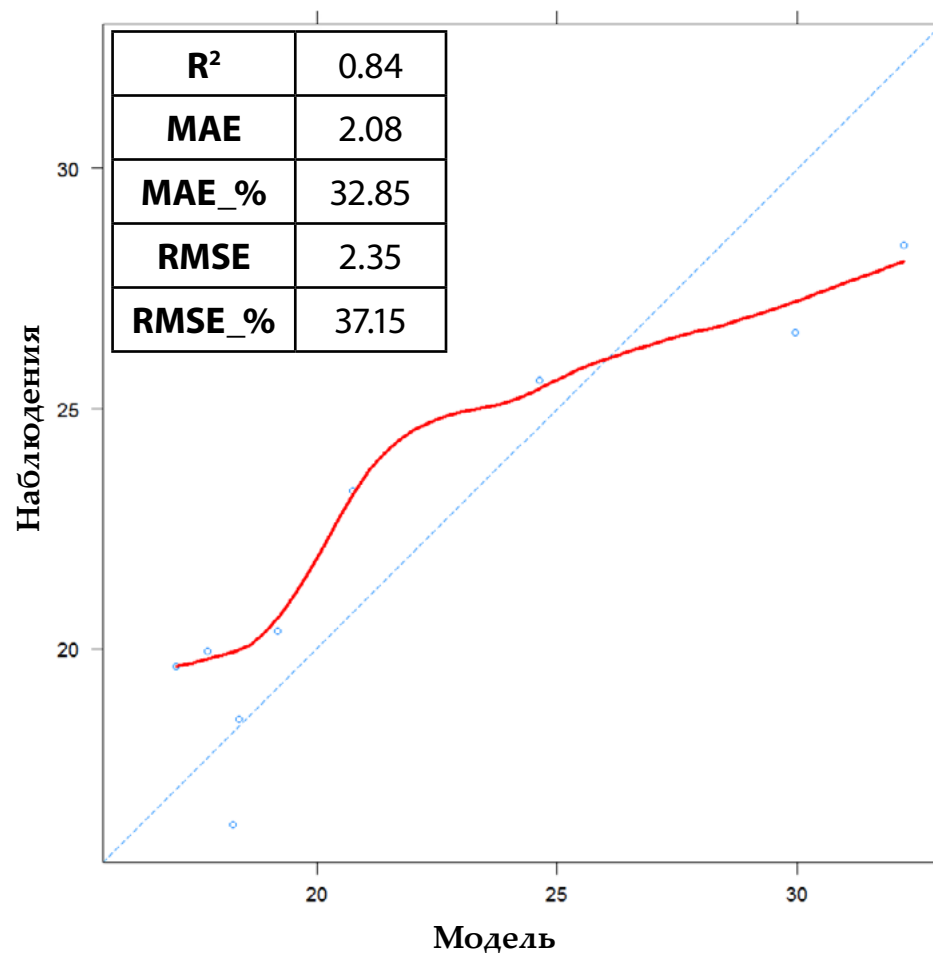
Оценки модели	FH_N		FH_C		FH_C/N		FH_N_запас		FH_C_запас	
	<i>RF</i>	<i>Test</i>	<i>RF</i>	<i>Test</i>	<i>RF</i>	<i>Test</i>	<i>RF</i>	<i>Test</i>	<i>RF</i>	<i>Test</i>
<b>R<sup>2</sup></b>	0.72	0.31	0.79	0.68	<b>0.90</b>	<b>0.90</b>	<b>0.50</b>	<b>0.15</b>	0.63	0.19
<b>MAE</b>	0.18	0.32	2.03	3.14	1.01	1.35	5.14	7.41	109.72	162.67
<b>MAE_%</b>	25.41	43.65	<b>14.05</b>	21.73	15.36	<b>20.59</b>	32.65	47.05	<b>32.82</b>	<b>48.66</b>
<b>RMSE</b>	0.28	0.36	2.86	3.64	1.63	1.69	7.64	8.17	154.69	192.78
<b>RMSE_%</b>	38.67	49.45	<b>19.82</b>	<b>25.22</b>	24.85	25.70	<b>48.52</b>	51.86	46.27	<b>57.66</b>

# Моделирование характеристик подстилки: L\_C/N

## Обучающая выборка



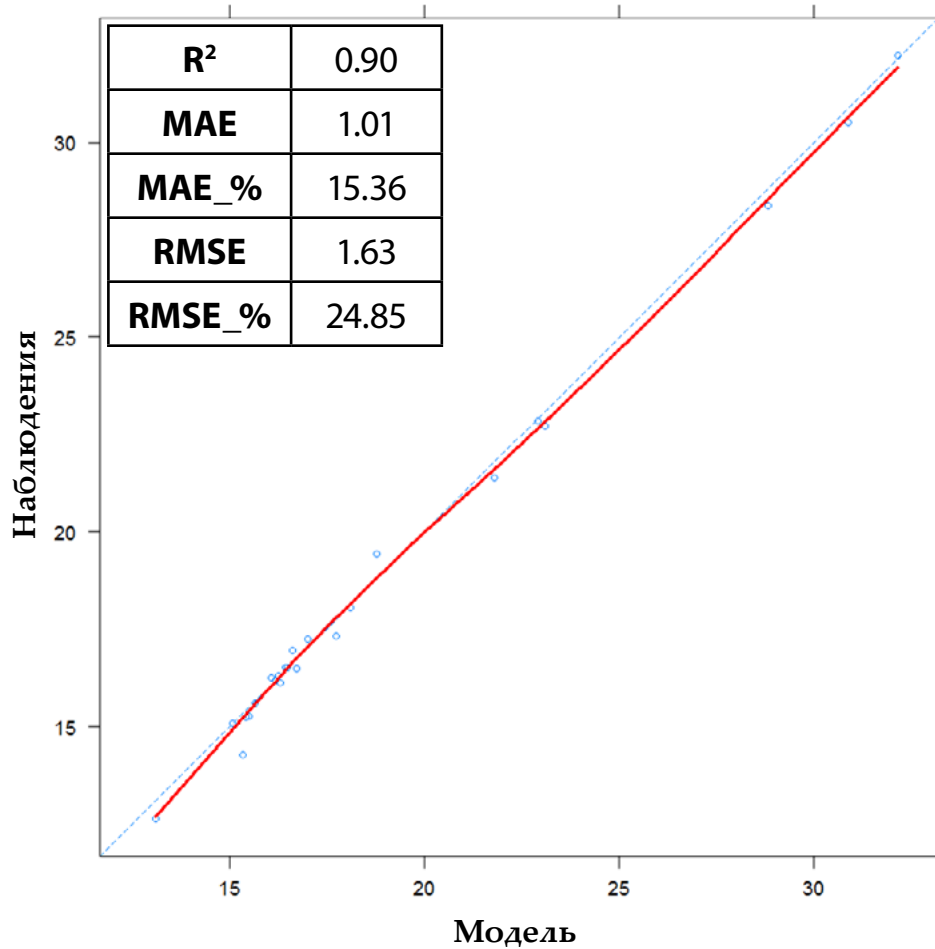
## Контрольная выборка



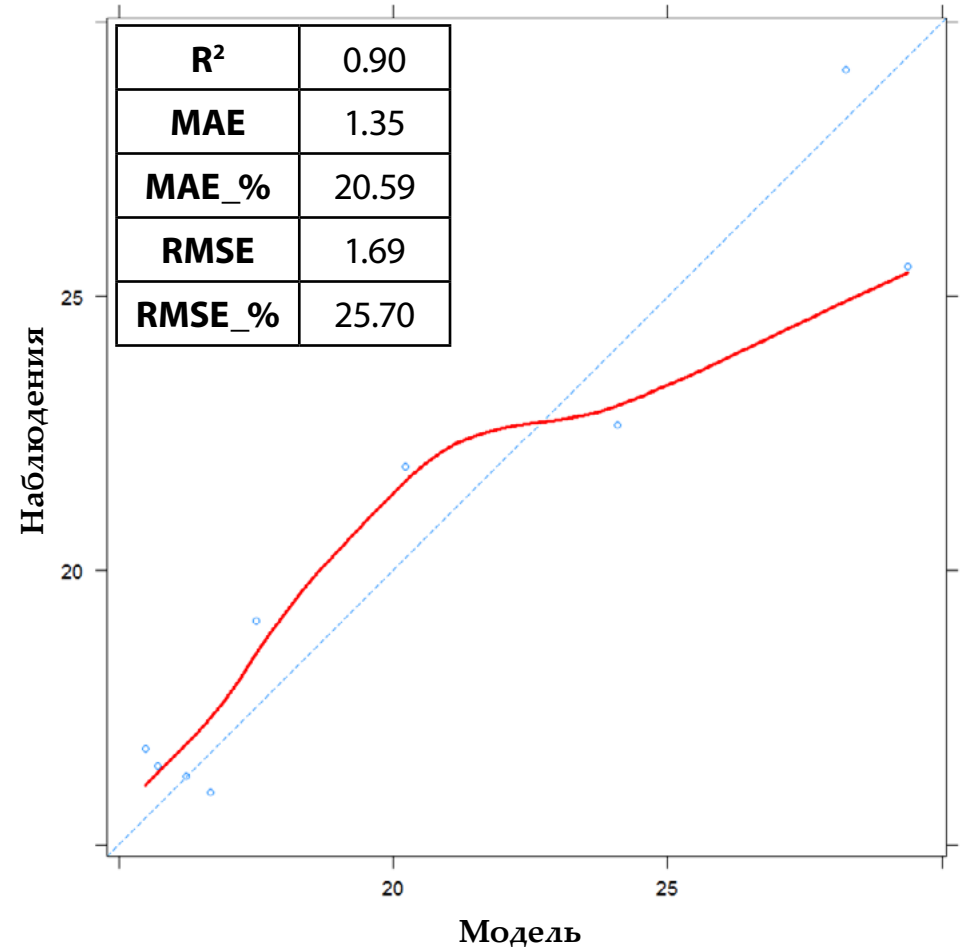


# Моделирование характеристик подстилки: FN\_C/N

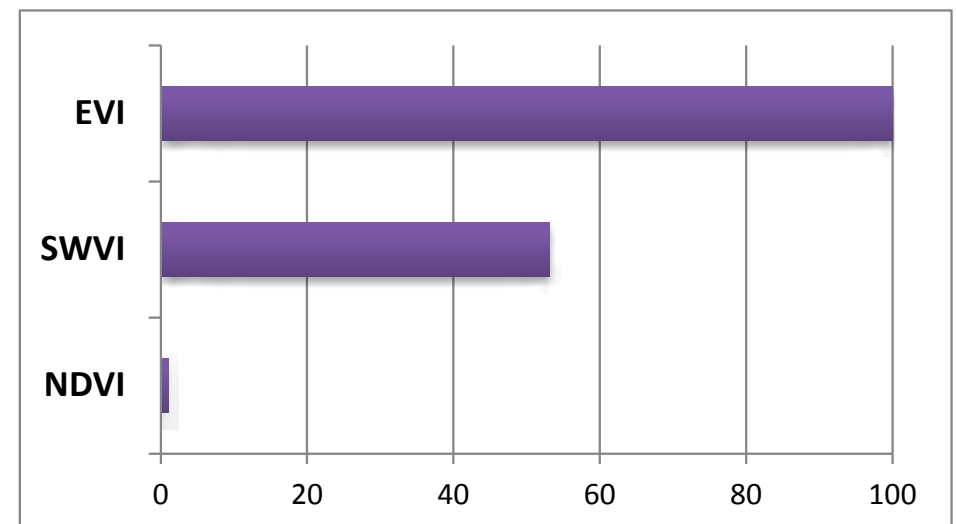
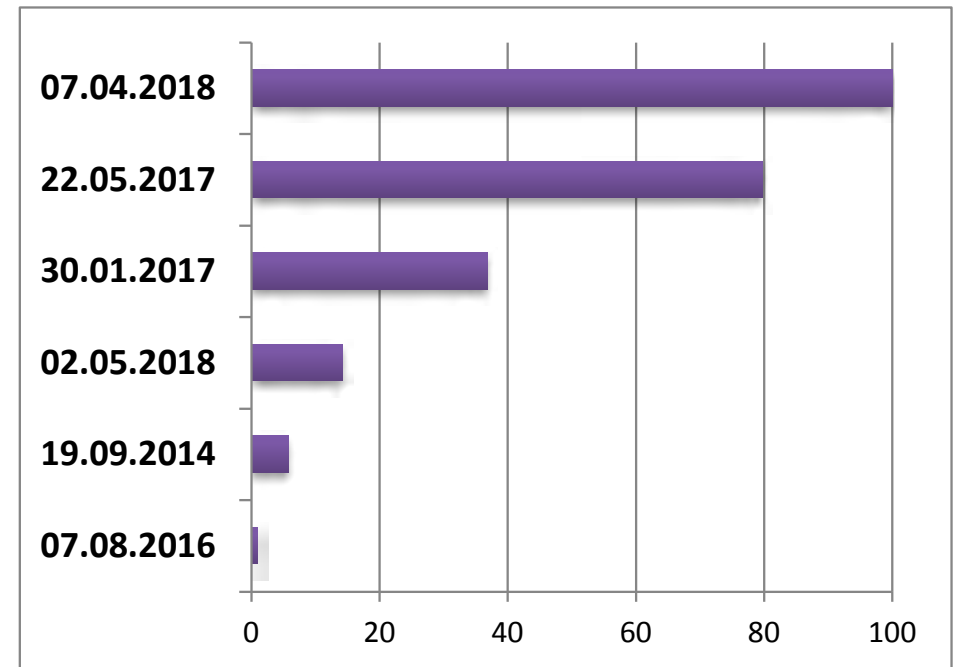
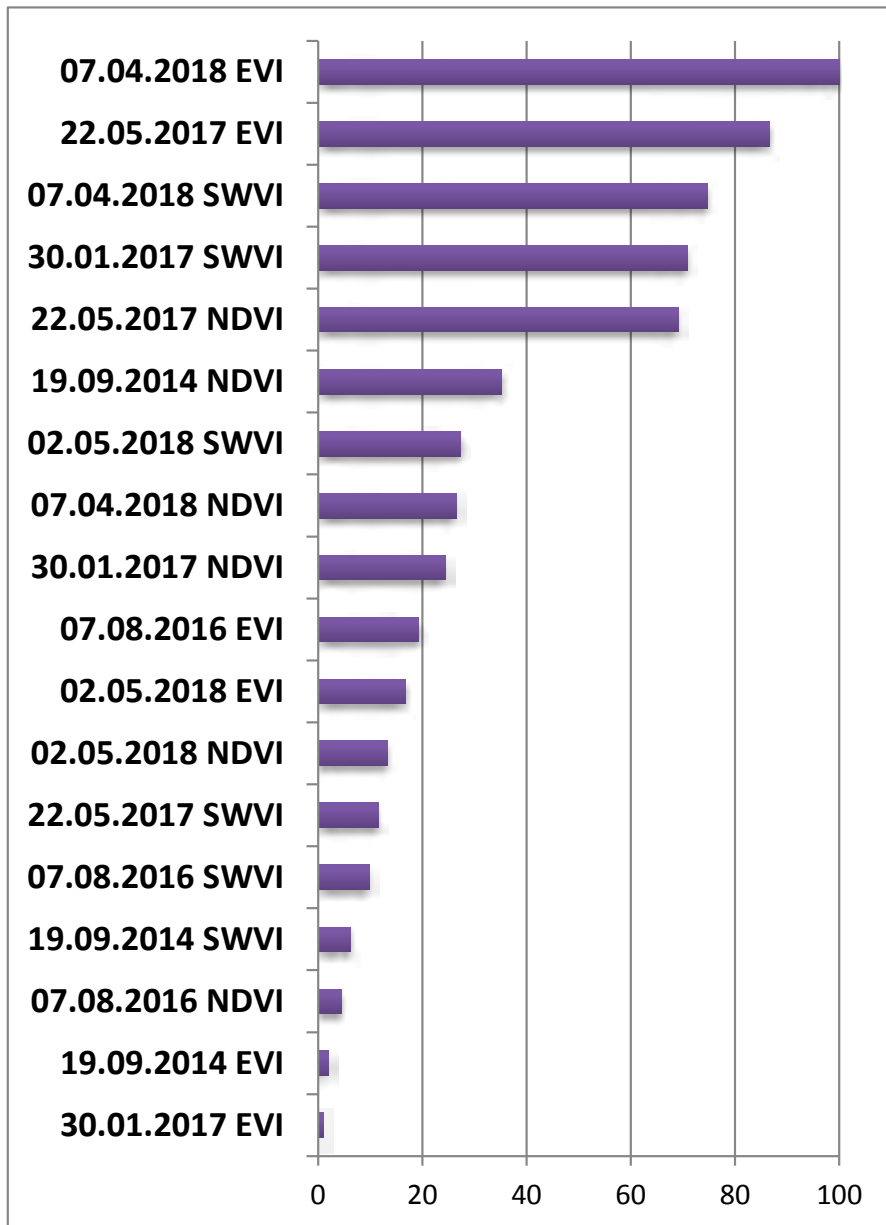
## Обучающая выборка



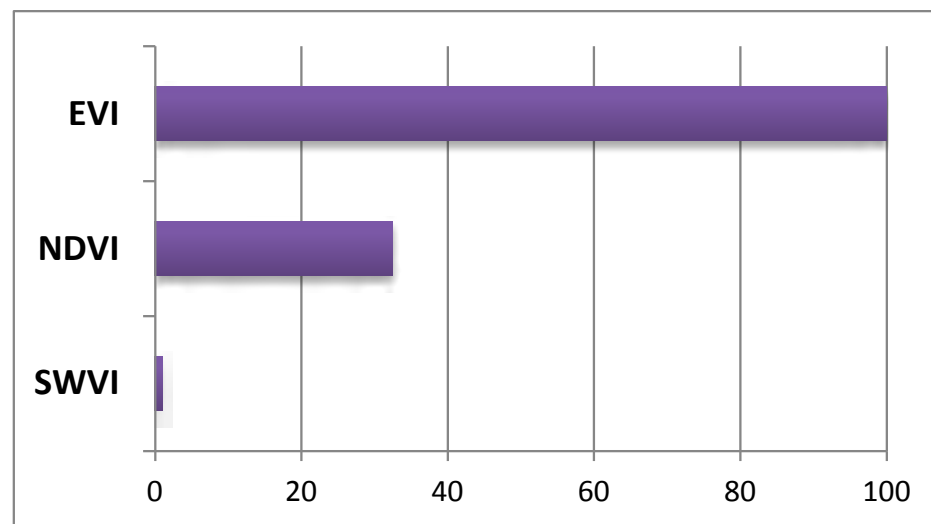
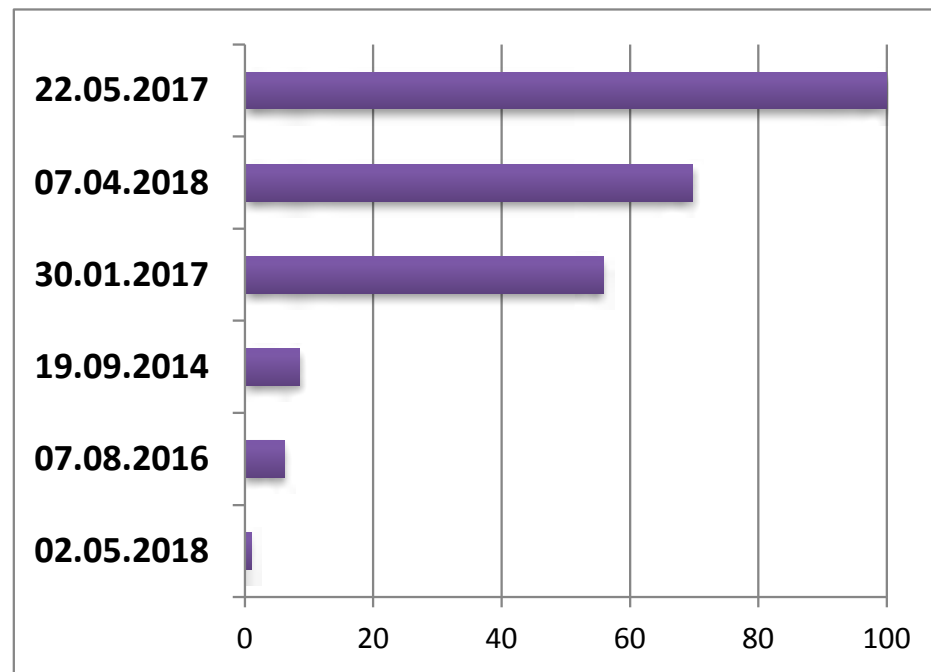
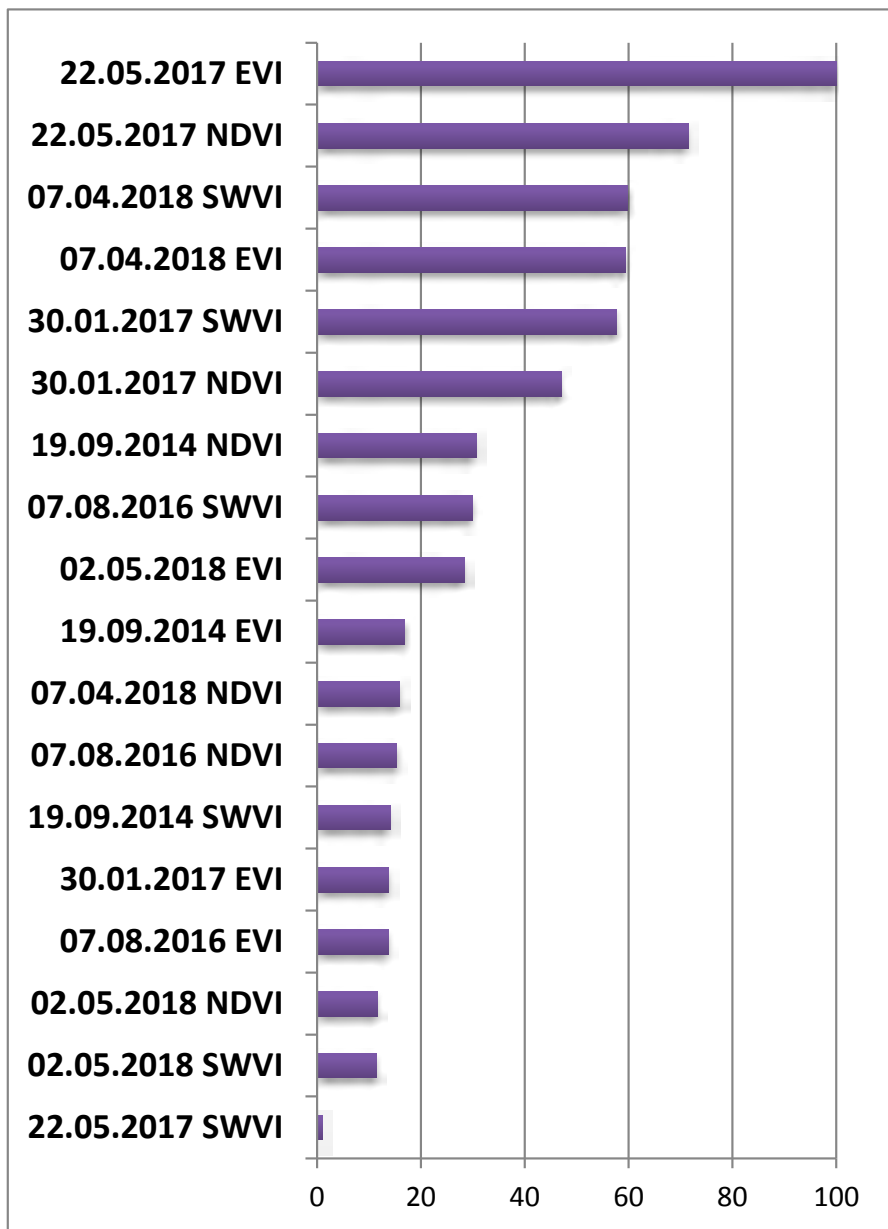
## Контрольная выборка



# Информативность спектральных признаков: L\_C/N

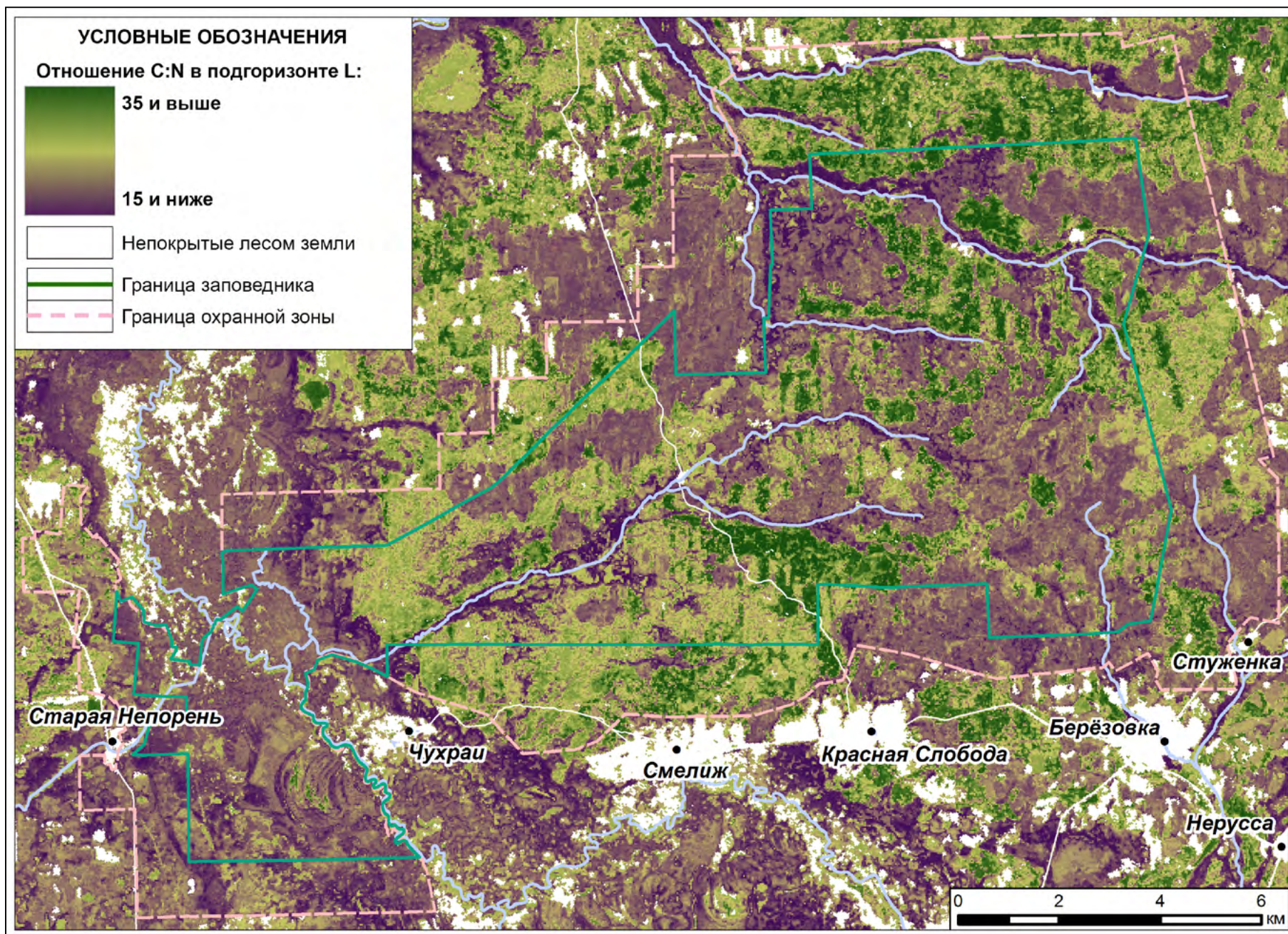


# Информативность спектральных признаков: FH\_C/N



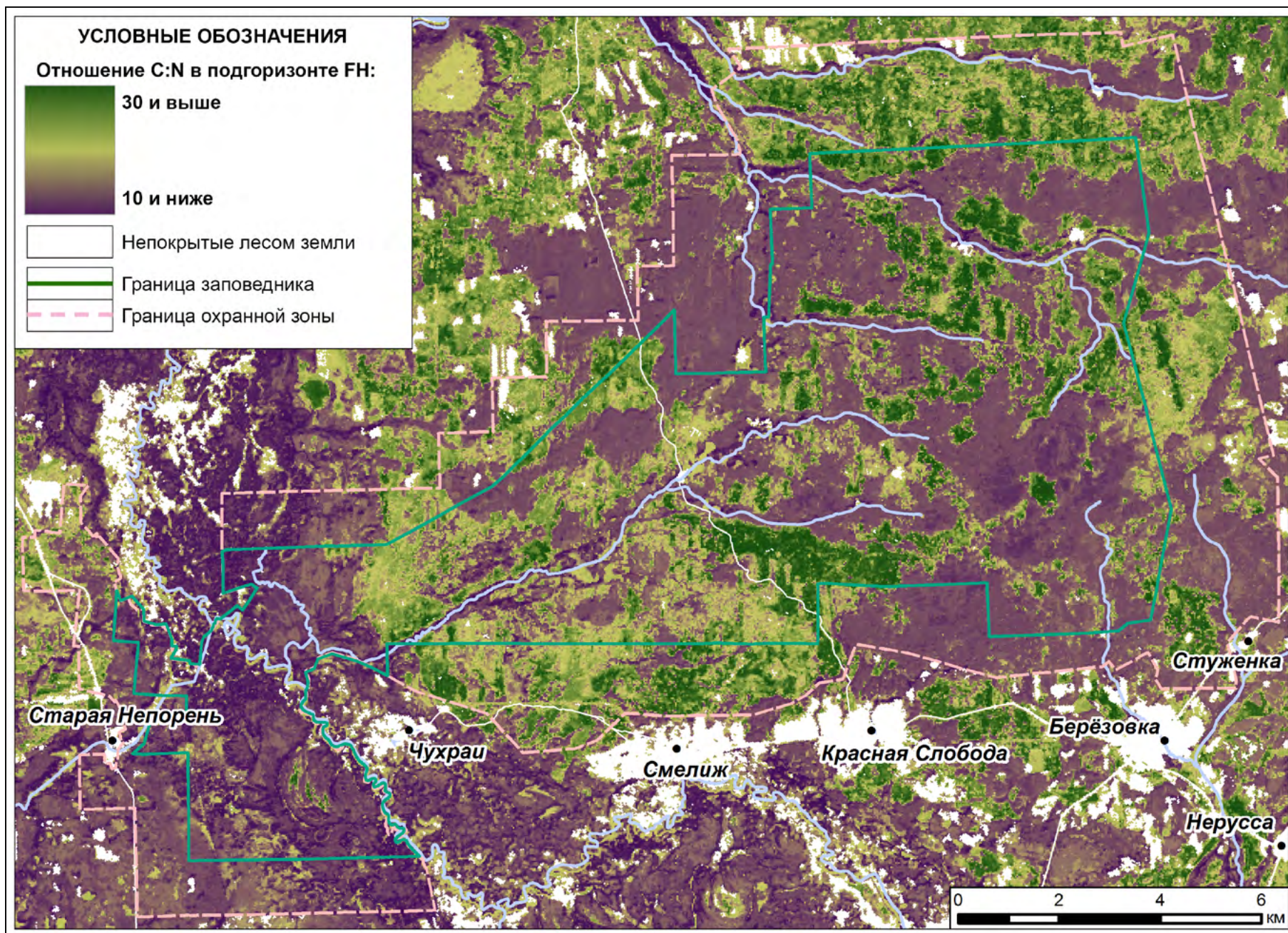


# Пример пространственного моделирования (L\_C/N)





# Пример пространственного моделирования (FH\_C/N)





# Выводы

- Различия в величинах содержания азота и углерода в лесной подстилке наиболее явно прослеживаются на уровне групп пород, в частности, для хвойных, широколиственных и мелколиственных насаждений.
- Эти различия позволяют использовать оптические разносезонные спутниковые изображения в качестве основы для пространственного моделирования значений концентрации и запасов азота и углерода в лесной подстилке с разной степенью точности.
- Наилучшие (по формальным признакам) результаты регрессионного моделирования были получены для величин концентрации азота в подгоризонте L и отношения C/N в подгоризонте FN. Наихудшие – для величин запасов азота и углерода в обоих подгоризонтах.
- Наиболее информативными для моделирования спектральными признаками оказались разносезонные значения вегетационного индекса EVI, наиболее информативными периодами года – начало (со снежным покровом) и конец весны.
- Для надежной оценки и верификации полученных результатов требуется проведение работ по закладке значительного количества контрольных наземных пробных площадей.



Секция «Оценка экосистемных функций и  
состояния лесной биоты и почв»

***СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !***

*Е.А. Гаврилюк, А.И. Кузнецова, А.В. Горнов*

Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, г. Москва  
e-mail: egor@ifi.rssi.ru

Работа выполнена за счет средств проекта РФФИ № 15-29-02697 «Выявление роли экосистемных инженеров и биоразнообразия в функционировании лесов на основе синтеза наземных и спутниковых данных» (сбор наземных данных и тематическая обработка) и ГЗ ЦЭПЛ РАН №0110-2018-0001 «Концепция спутникового мониторинга состояния и динамики лесных экосистем» (подготовка исходных спутниковых данных)

Москва, ЦЭПЛ РАН, 30 октября – 1 ноября 2018 года