



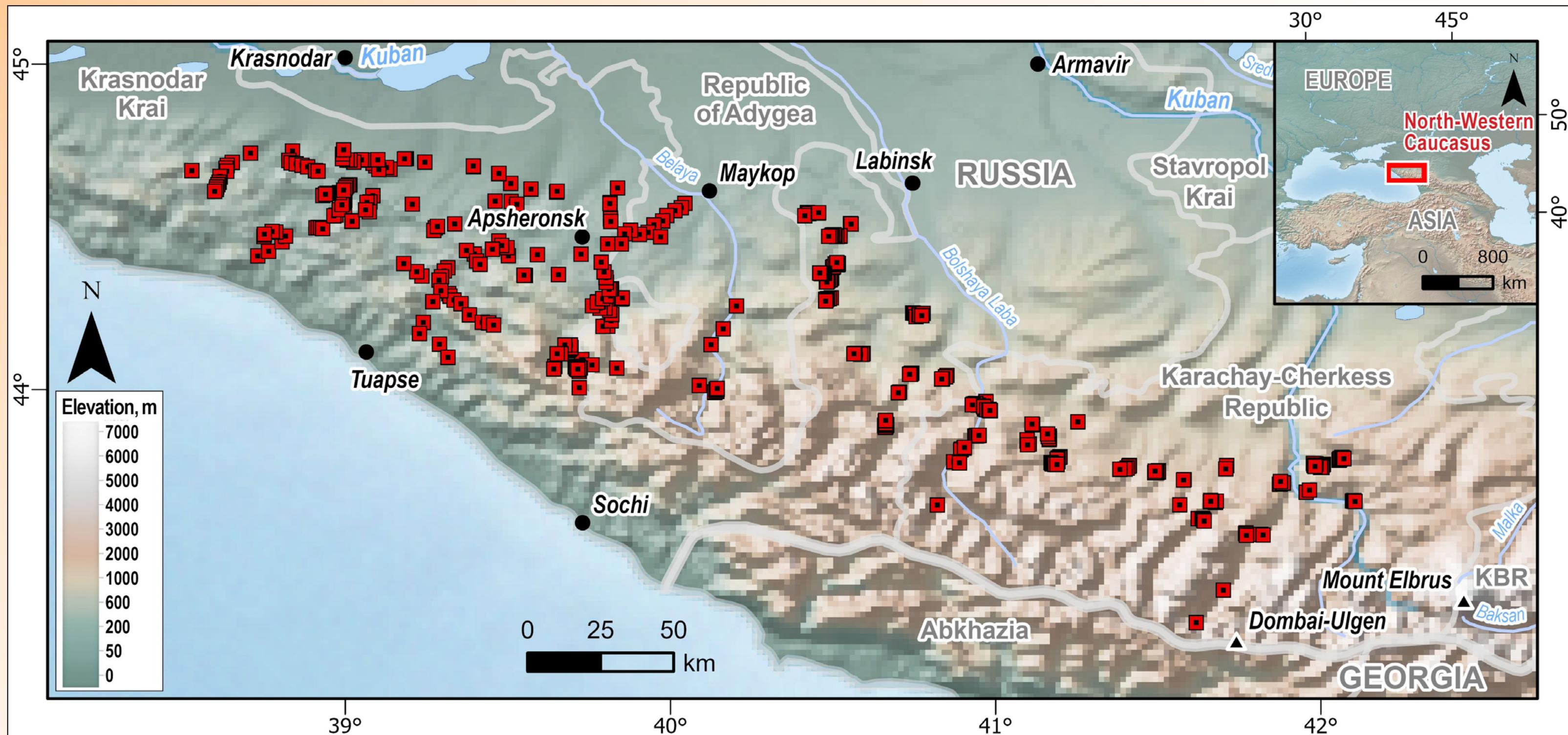
**СРАВНЕНИЕ ФЛОРИСТИЧЕСКОГО И ДОМИНАНТНОГО  
КЛАССИФИКАЦИОННЫХ ПОДХОДОВ ДЛЯ ЗАДАЧ  
КАРТОГРАФИРОВАНИЯ СМЕШАННЫХ И ШИРОКОЛИСТВЕННЫХ  
ЛЕСОВ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО КАВКАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ДАННЫХ ДЗЗ И МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

*Гаврилюк Е.А., Браславская Т.Ю., Шевченко Н.Е.*

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

- » **Геопространственное моделирование**, основанное на сочетании **данных ДЗЗ** и **методов машинного обучения**, в настоящее время является распространенным способом **тематического картографирования лесных экосистем**.
- » **Надежность результатов** такого моделирования сильно **зависит от способа интерпретации исходных данных**, используемых для обучения, т.е. от выбранного **способа классификации фитоценозов**.
- » В современной науке **существуют различные подходы** к классификации растительности, но большинство из них изначально **разрабатывались независимо от практик современного цифрового картографирования** и крайне редко анализировались в контексте **пригодности и сравнительных преимуществ** для задач геопространственного моделирования.

Основная идея исследования – сравнить **эколого-флористический** и **доминантный** классификационные подходы с точки зрения их способности выделять **типы лесов**, которые бы **надежно дифференцировались** методами геопространственного моделирования. Полидоминантный видовой состав делает **широколиственные и смешанные леса Северо-Западного Кавказа** подходящим объектом для такого сравнения из-за (1) **потенциальных расхождений** в **результатах классификации** двумя подходами и (2) **сложности дифференциации** типов леса со смешанным породным составом на основе данных ДЗЗ.



#### Исходные полевые данные:

515 геоботанических площадок размером 10x10 м, заложенные в 2014-2024 гг. в относительно крупных и малофрагментированных участках широколиственных и хвойно-широколиственных лесов региона.

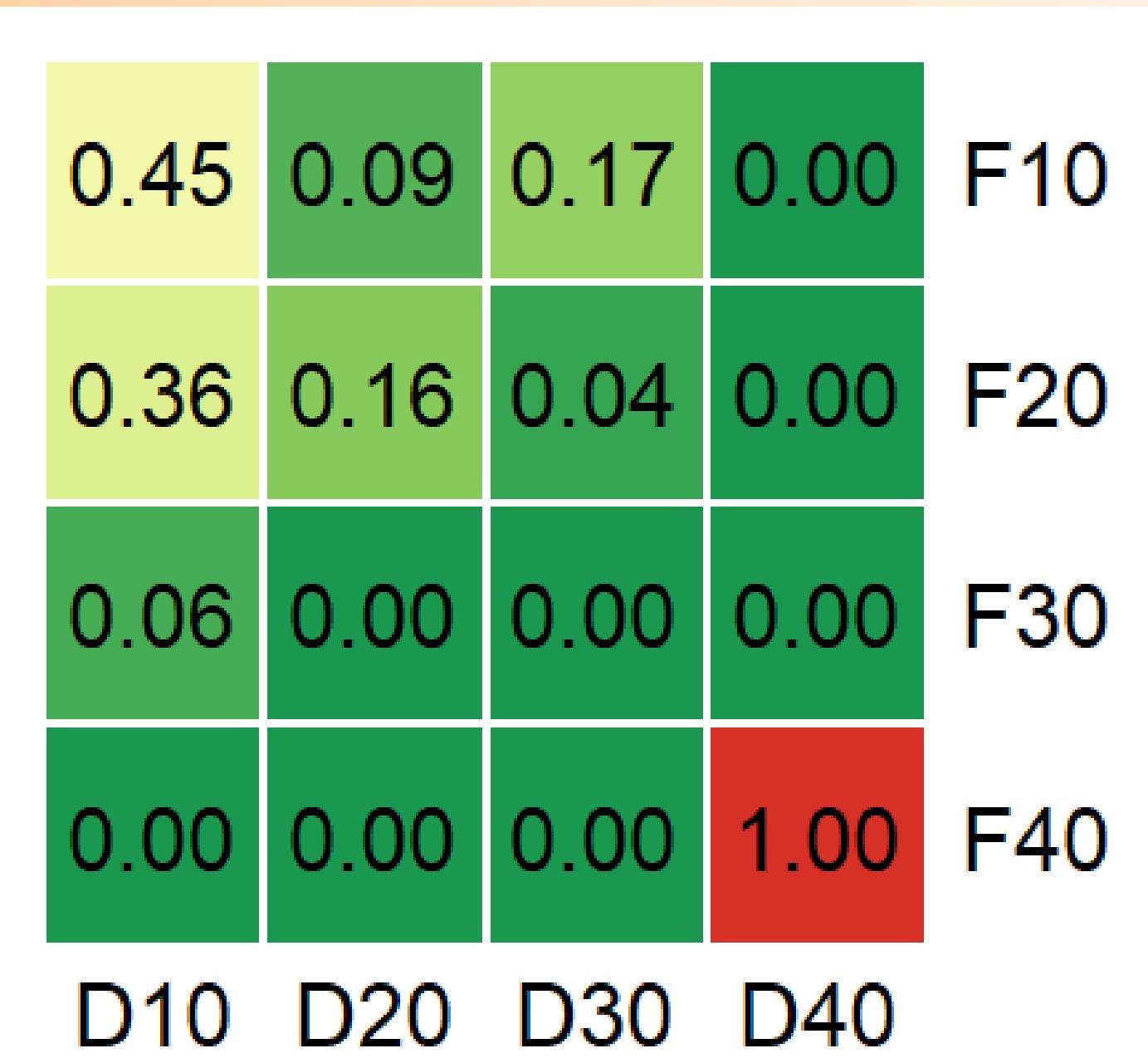
ГРАБОВЫЕ ЛЕСА (F10)		БУКОВЫЕ ЛЕСА (F20)			
На южных склонах (F13)	С пихтой (F14)	Типичные (F21)	90	Влажные (F22)	24
46	43				
Типичные (F11)		С темно-хвойными (F24)	21	Влажные с пихтой (F26)	12
73		Сухие (F23)	22	Типичные с пихтой (F25)	16
	Пост-рубочные разреженные (F16)	Пост-рубочные с осиной (F17)		Постлуговые с сосной (F27)	11
	18	16			
Влажные (F12)	С дубом (F15)	Пострубочные с ольхой (F18)	9	ДУБОВЫЕ ЛЕСА (F30)	БЕРЕЗОВЫЕ РЕДКОЛЕСЬЯ (F40)
48	29			Сухие 23	14

ТВЕРДОЛИСТВЕННЫЕ ЛЕСА (D10)		ХВОЙНО-ЛИСТВЕННЫЕ ЛЕСА (D20)	
Граб (D12) 103	Смешанные (D13) 83	Смешанные (D21) 23	Пихта (D23) 9
Бук (D11) 135	Дуб (D14) 52	Бук (D22) 22	Граб (D24) 8
СМЕШАННЫЕ ЛИСТВЕННЫЕ ЛЕСА (D30)		МЯГКОЛИСТВЕННЫЕ ЛЕСА (D40)	
Tвердо-лиственные (D31) 32	Ясень (D15) 6	Мягко-лиственные (D32) 28	Береза (D40) 14

## Обобщенная классификация

MARI = 0.03

AMI = 0.16



Попарные значения индекса Жаккара

## Детальная классификация

MARI = 0.27

AMI = 0.35

0.00	0.19	0.19	0.06	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.06	0.00	F11
0.02	0.11	0.10	0.05	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.06	0.00	F12
0.00	0.20	0.08	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.00	F13
0.00	0.09	0.07	0.00	0.00	0.20	0.00	0.04	0.11	0.03	0.04	0.00	F14
0.00	0.06	0.08	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	F15
0.00	0.05	0.02	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.13	0.00	0.10	0.00	F16
0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26	0.05	0.00	0.00	F17
0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	F18
0.56	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	F21
0.10	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	F22
0.13	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	F23
0.09	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	F24
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.41	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	F25
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.13	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	F26
0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.07	0.05	0.00	F27
0.00	0.00	0.00	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	F30
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	F40

## Оптические спутниковые данные:

Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS) – гармонизированные разносезонные мультиспектральные изображения с аппаратов серий **Landsat** и **Sentinel-2** с пространственным разрешением **30 м** (около 4700 снимков за период 2015/2019-2024 гг);

- **внутригодовая временная серия композитных изображений** с шагом раз в **15 дней** и интервалом для агрегации измерений шириной в **29 дней** (всего **25 композитов**);
- коэффициенты спектральной яркости в 11 каналах (**Blue, Green, Red, NIR, RE1-3, wNIR, SWIR1-2, TIRS1**);
  - **NRI** – попарные нормализованные отношения каналов (45 индексов);
  - **Результаты FPCA-преобразования** – всего **356 главных компонент**, суммарно описывающие не менее 95% вариации каждого исходного канала или индекса).

## Рельеф и производные показатели:

Copernicus DEM – ЦММ на основе различных спутниковых продуктов (SRTM, ALOS и др) пространственным разрешением **30 м**;

- **Абсолютная высота** над уровнем моря;
- Показатели **крутизны, ориентации и кривизны** склона, **шероховатости** поверхности, индексы **относительного положения, формы рельефа** и различные **гидрологические** индексы.

## Климатические данные:

WorldClim V1 – 19 стандартных **биоклиматических переменных**, описывающих годовые тенденции, сезонность, экстремальные и лимитирующие значения температуры воздуха и осадков, с пространственным разрешением **1 км**;

## Почвенные данные:

SoilGrids 250 – результаты глобального геопространственного моделирования с разрешением **250 м** для 11 почвенных показателей: содержание ила, песка, глины и крупных частиц, pH, насыпная плотность, катионообменная емкость, общее содержание азота, содержание, плотность и запасы органического углерода. Каждый показатель представлен для **6 почвенных слоев** (0-5, 5-15, 15-30, 30-60, 60-100, 100-200 см).

# ОТБОР ПРИЗНАКОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

8 / 14

Тип классификации	Набор переменных	N	CODEC, %	CODEC по типам переменных, %			
				HLS	DEM	WClim	SoilG
Флористическая обобщенная (FG)	All	9	86.4	2.3	2.1	77.5	4.5
	Env	10	89.1	—	0.0	82.8	6.3
	HiRes	13	86.0	19.8	66.2	—	—
	HLS	19	86.9	86.9	—	—	—
Флористическая детальная (FD)	Env	28	66.7	—	2.2	42.2	22.4
	All	48	71.2	15.1	2.2	29.3	24.6
	HiRes	67	71.5	53.0	18.5	—	—
	HLS	65	67.5	67.5	—	—	—
Доминантная обобщенная (DG)	Env	11	60.3	—	0.7	37.6	22.1
	All	15	65.2	11.1	2.2	38.4	13.5
	HiRes	16	60.5	30.7	29.8	—	—
	HLS	21	67.4	67.4	—	—	—
Доминантная детальная (DD)	Env	28	53.8	—	1.6	31.0	21.2
	HiRes	34	55.7	34.7	21.0	—	—
	All	37	59.7	16.1	2.8	32.1	8.8
	HLS	37	56.8	56.8	—	—	—

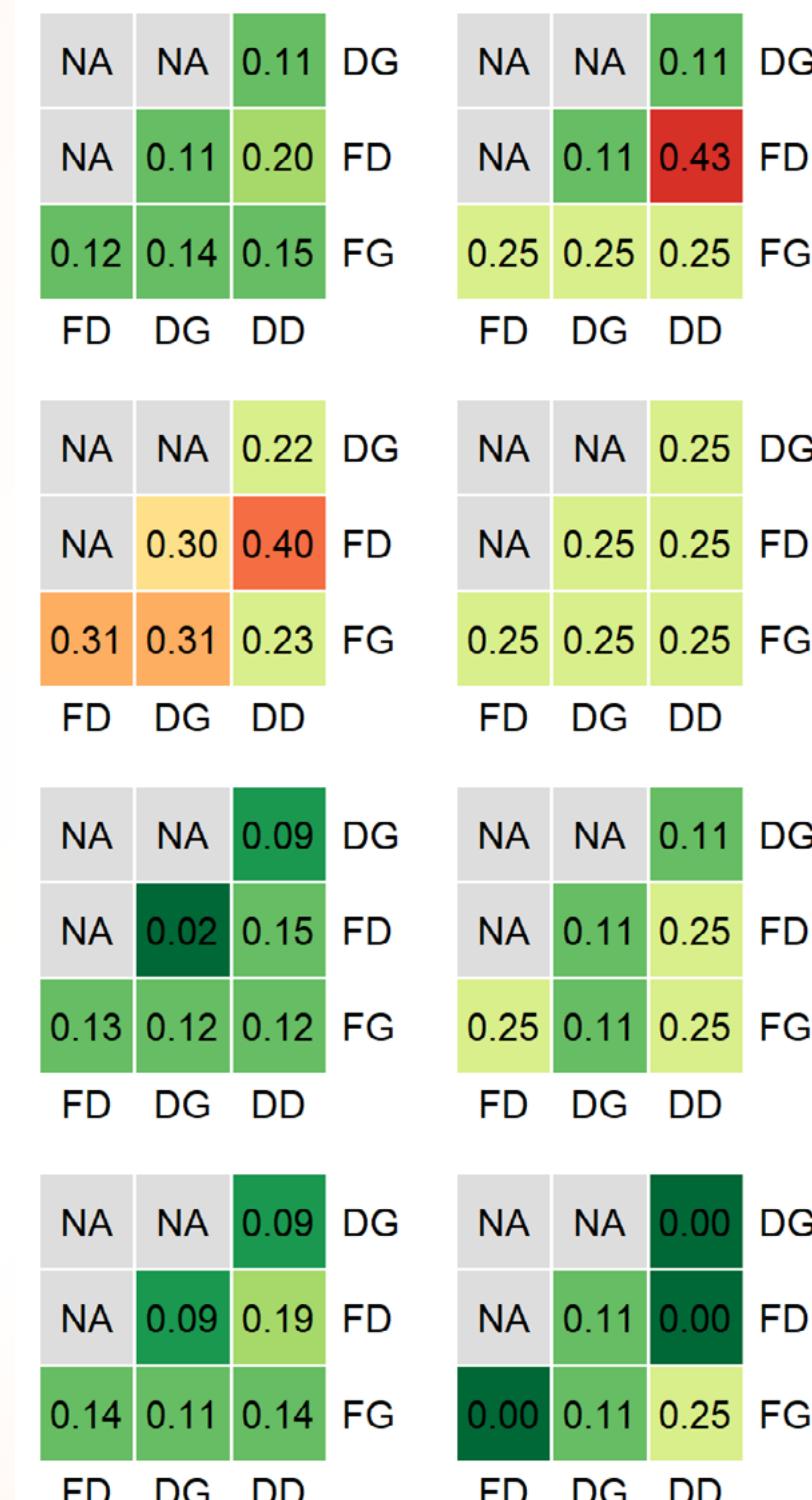
**CODEC** – COnditional DEpendance Coefficient, функциональный аналог **коэффициента детерминации**, применяется для отбора признаков методом **FOCI** (Feature Ordering by Conditional Independance)

# Доля одинаковых переменных в оптимальном наборе:

Общая	В топ-5
100%	100%

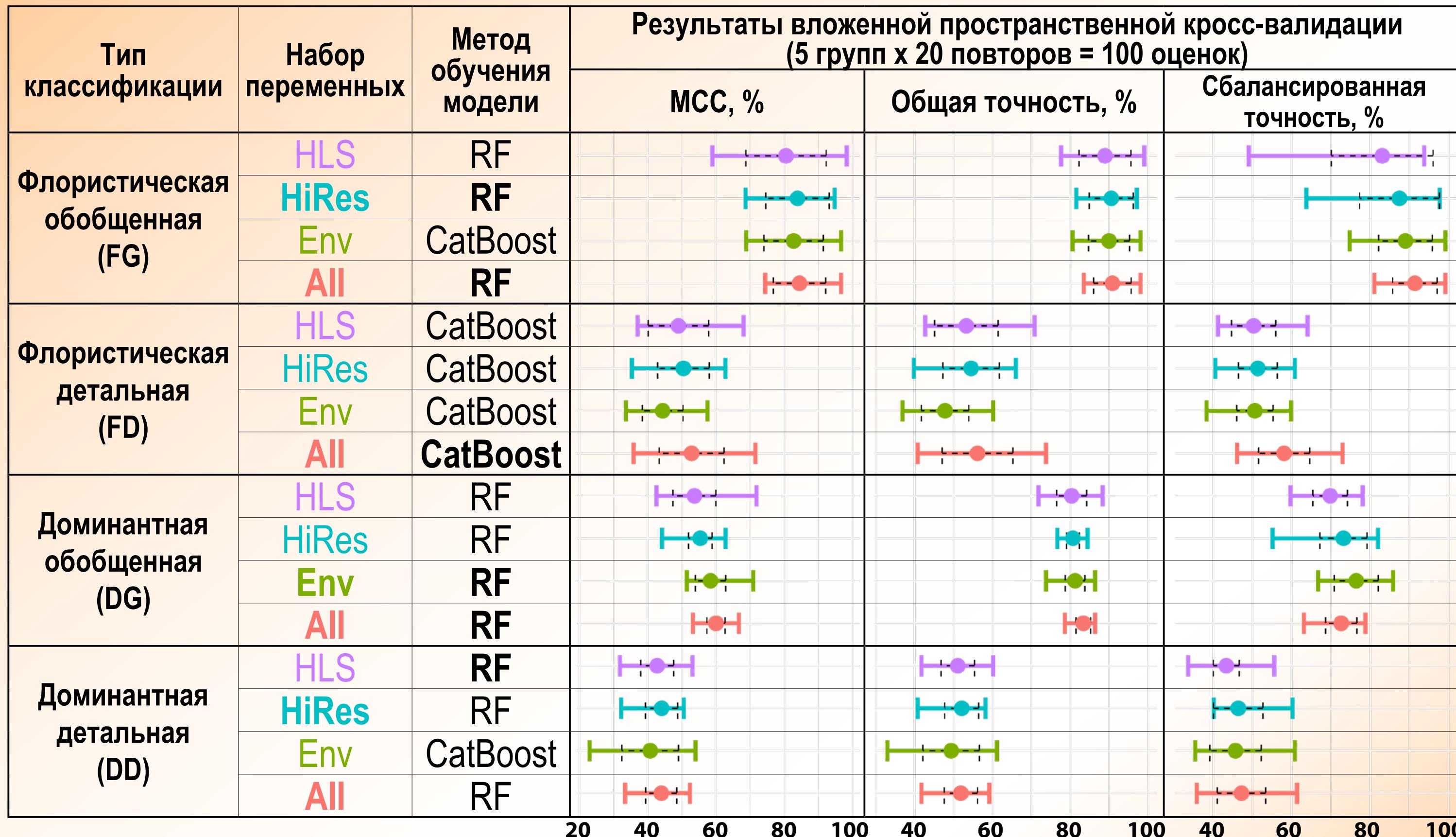
## Общая

## В топ-5



Исходные данные	Переменные	CODEC по типам классификации, %			
		FG	FD	DG	DD
WorldClim	Сезонность температуры (стандартное отклонение)	2.2	12.0	37.6	4.5
	Влажность самой теплой четверти года	0.0	5.3	0.9	17.5
	Влажность самой холодной четверти года	7.6	7.2	0.0	6.5
	Средняя температура самой влажной четверти	38.0	1.3	0.0	0.0
	Среднее значение месячных разбросов температур	0.0	1.9	0.0	3.4
	Минимальная температура самого холодного месяца	29.6	0.0	0.0	0.0
SoilGrids	Емкость катионного обмена (слой 0-5 см)	2.3	2.3	2.3	3.1
	Плотность органического углерода (0-5 см)	0.0	0.6	2.6	0.0
	Общее содержание азота (15-30 см)	0.0	0.0	7.6	0.0
	Насыпная плотность мелкоземельной фракции (15-30 см)	0.0	6.1	0.0	0.0
	Общее содержание азота (0-5 см)	0.0	5.8	0.0	0.0
Harmonized Landsat Sentinel-2	FPC7 для нормализованного отношения каналов RE2 и RE3	0.0	0.0	7.4	0.0
	FPC4 для зеленого канала	0.0	0.0	0.0	4.0

Тип классификации: **FG** – флористическая обобщенная, **FD** – флористическая детальная, **DG** – доминантная обобщенная, **DD** – доминантная детальная.



# РАЗДЕЛИМОСТЬ КЛАССОВ – ФЛОРИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

11 / 14

ID		Класс	Показатели точности, %			
FG	FD		Recall	Precision	F1	MCC
F10		ГРАБОВЫЕ ЛЕСА	91.0	92.4	91.7	81.8
	F11	Типичные	52.1	58.3	55.1	48.2
	F12	Влажные	79.8	75.7	77.7	75.4
	F13	На южных склонах	55.3	46.4	50.5	45.4
	F14	С пихтой	56.6	52.4	54.4	50.2
	F15	С дубом	12.2	18.7	14.8	11.1
	F16	Разреженные	74.7	76.4	75.6	74.7
	F17	С осиной	73.1	59.7	65.7	64.9
	F18	С ольхой	71.7	64.2	67.7	67.2
F20		БУКОВЫЕ ЛЕСА	91.0	91.0	91.0	85.4
	F21	Типичные	58.3	71.2	64.1	57.8
	F22	Влажные	36.5	27.5	31.3	27.8
	F23	Сухие	6.4	7.2	6.7	2.8
	F24	С темнохвойными	51.2	56.1	53.6	51.7
	F25	Типичные с пихтой	71.9	62.3	66.8	65.8
	F26	Влажные с пихтой	48.3	49.6	49.0	47.8
	F27	С сосной	76.4	43.4	55.4	56.4
F30		ДУБОВЫЕ ЛЕСА	82.2	74.0	77.9	76.9
	F30	Сухие	69.1	68.7	68.9	67.5
F40		БЕРЕЗОВЫЕ	100.0	89.7	94.6	94.6
	F40	Редколесья	92.9	88.4	90.6	90.4

## Нормализованные матрицы ошибок

91.0	6.3	2.4	0.4	F10															
8.7	91.0	0.0	0.3	F20															
17.8	0.0	82.2	0.0	F30															
0.0	0.0	0.0	100.0	F40															
F10	F20	F30	F40																
52.1	0.8	23.1	8.6	4.0	1.6	0.0	0.0	1.4	0.1	0.7	2.8	0.1	0.0	0.0	3.4	1.3	F11		
0.0	79.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.6	7.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	F12	
19.2	0.0	55.3	9.5	11.3	0.3	0.5	0.5	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	F13
9.9	0.0	3.6	56.6	6.4	2.6	11.2	4.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	3.1	0.0	F14
38.8	0.0	24.1	13.3	12.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.6	0.0	F15
0.0	0.0	0.0	3.3	0.0	74.7	15.6	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	F16
0.0	0.0	0.0	16.2	0.0	10.0	73.1	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	F17
0.0	0.0	0.0	27.8	0.0	0.0	0.6	71.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	F18
1.1	0.2	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	58.3	12.9	11.8	3.4	0.1	0.1	11.1	0.0	0.0	0.0	0.0	F21
0.6	27.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	22.7	36.5	4.2	8.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	F22
0.0	22.7	9.1	4.1	0.0	0.5	0.0	0.0	43.9	10.2	6.4	0.7	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	F23
5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.6	14.3	11.0	51.2	0.0	0.0	1.9	0.0	3.6	0.0	0.0	F24
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	71.9	28.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	F25
0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.8	48.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	F26
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	22.7	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	76.4	0.0	0.0	0.0	0.0	F27
2.4	0.0	8.7	0.0	19.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	69.1	0.0	0.0	0.0	F30
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	92.9	F40
F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F21	F22	F23	F24	F25	F26	F27	F30	F40			

ID		Класс	Показатели точности, %			
DG	DD		Recall	Precision	F1	MCC
D10		ТВЕРДОЛИСТВЕННЫЕ	92.5	87.9	90.1	60.1
	D11	Бук	83.4	75.2	79.1	71.3
	D12	Граб	45.8	48.0	46.9	34.0
	D13	Смешанные	14.5	29.4	19.4	10.6
	D14	Дуб	74.0	50.3	59.9	55.8
	D15	Ясень	20.0	16.4	18.1	17.1
D20		ХВОЙНО-ЛИСТВЕННЫЕ	82.1	77.2	79.6	76.7
	D21	Смешанные	59.4	36.9	45.5	43.7
	D22	Бук	61.4	41.7	49.7	48.0
	D23	Пихта	20.0	26.7	22.9	21.9
	D24	Граб	48.8	31.6	38.3	38.1
D30		СМЕШ. ЛИСТВЕННЫЕ	24.8	42.4	31.3	25.9
	D31	Твердолиственные	22.8	26.8	24.7	20.2
	D32	Мягколиственные	8.8	19.6	12.1	9.9
D40		МЯГКОЛИСТВЕННЫЕ	92.9	87.3	90.0	89.7
	D40	Береза	93.6	92.9	93.2	93.1

## Нормализованные матрицы ошибок

92.5	3.1	4.1	0.3	D10
9.0	82.1	7.5	1.5	D20
70.1	5.1	24.8	0.0	D30
5.4	1.8	0.0	92.9	D40
D10	D20	D30	D40	

83.4	3.7	3.5	0.1	3.8	1.5	2.4	0.0	0.0	0.7	0.7	0.0	D11
4.0	45.8	10.2	15.5	0.9	10.6	0.9	0.1	0.2	8.1	2.7	1.0	D12
22.2	27.3	14.5	20.1	0.0	2.9	1.3	0.0	2.2	4.0	5.5	0.0	D13
1.9	13.2	10.9	74.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	D14
17.5	18.3	25.8	16.7	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.8	0.0	D15
0.0	1.7	2.6	0.0	0.0	59.3	24.6	0.0	11.3	0.4	0.0	0.0	D21
11.4	0.0	0.0	0.0	0.0	5.2	61.4	22.0	0.0	0.0	0.0	0.0	D22
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.1	68.9	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	D23
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26.2	0.0	0.0	48.8	25.0	0.0	0.0	D24
21.9	18.1	11.4	3.8	0.0	5.8	2.8	0.0	8.4	22.8	5.0	0.0	D31
10.7	33.2	7.7	10.9	0.0	6.8	0.0	0.0	3.8	18.2	8.8	0.0	D32
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	93.6	D40

D11 D12 D13 D14 D15 D21 D22 D23 D24 D31 D32 D40

- » **Типы леса**, выделенные на основе **двух разных подходов**, имеют очень **мало совпадений по составу элементов** как на обобщенном, так и на детальном уровне классификаций. Это ожидаемая ситуация для **сложных полидоминантных древостоев**;
- » **Оптимальные наборы переменных** для моделирования типов леса, выделенных с помощью разных подходов, **довольно уникальны**, включая случаи обобщенных и детальных вариантов **одной и той же классификации**. Поэтому отбор признаков под конкретную ситуацию является **необходимым этапом** в процессе обучения модели;
- » **Биоклиматические и почвенные признаки** при прямом сравнении неожиданно оказались **более информативными**, чем переменные, основанные на ЦММ и **спутниковых данных**, несмотря на их более **грубое пространственное разрешение**, что, скорее всего, связано с **горным характером** региона;
- » **Флористические** модели **явно превзошли доминантные** с точки зрения разделимости типов леса и общей точности предсказаний. Таким образом, **флористический подход** к классификации может быть предпочтительнее для **лесов со сложным видовым составом** не только с точки зрения экологических задач, но и с точки зрения **надежности геопространственного моделирования**. Однако, **точность** такого моделирования по-прежнему сильно зависит от заданного уровня **детальности** классификации. В то время как **обобщённые** типы леса продемонстрировали достаточно **высокую разделимость**, для **детальных** классов она оказалась лишь на **средне-низком уровне**.



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**

**Гаврилюк Е.А., Браславская Т.Ю., Шевченко Н.Е.**

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

**e-mail: [egor@ifi.rssi.ru](mailto:egor@ifi.rssi.ru)**

**Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда № 25-24-00169 «Геопространственное моделирование синтаксонов хвойно-широколиственных и широколиственных лесов Северо-Западного Кавказа».**