

Индикаторы агрогенного этапа развития лесной территории

Руководитель: Семенков И.Н.

Результаты исследований 2021 г.

В результате тематической обработки спутниковых изображений и исторических картографических материалов получены карты современной возрастной и породной структуры древостоев нацпарка (НП) «Смоленское Поозерье» (рис. 1 – 4). На основе этих карт оценено распространение условно коренных древостоев возрастом более 95 лет и лесов на различных стадиях восстановительной агрогенной сукцессии. На настоящий момент леса занимают почти 79% территории НП (в 1927 г. лесистость была 55%). 42% от их общей площади произрастает на бывших сельхозугодьях разной давности забрасывания и лишь 26% можно рассматривать как условно коренные. Древостои с преобладанием сосны составляют около 7% от лесов парка. При этом 2.5% из них приходится на условно коренные насаждения, а 2.9% произрастает на месте бывших сельхозугодий. Для древостоев с преобладанием ели (12.5% суммарно), соответствующие доли составляют 5.3% и 2.1%, а для древостоев с преобладанием широколиственных пород (4.2% суммарно) – 1.1% и 0.9%. Кроме того, еще примерно 10% современных лесов парка – это молодые смешанные и мелколиственные леса, возникшие на месте заброшенных полей в последние 40 лет.

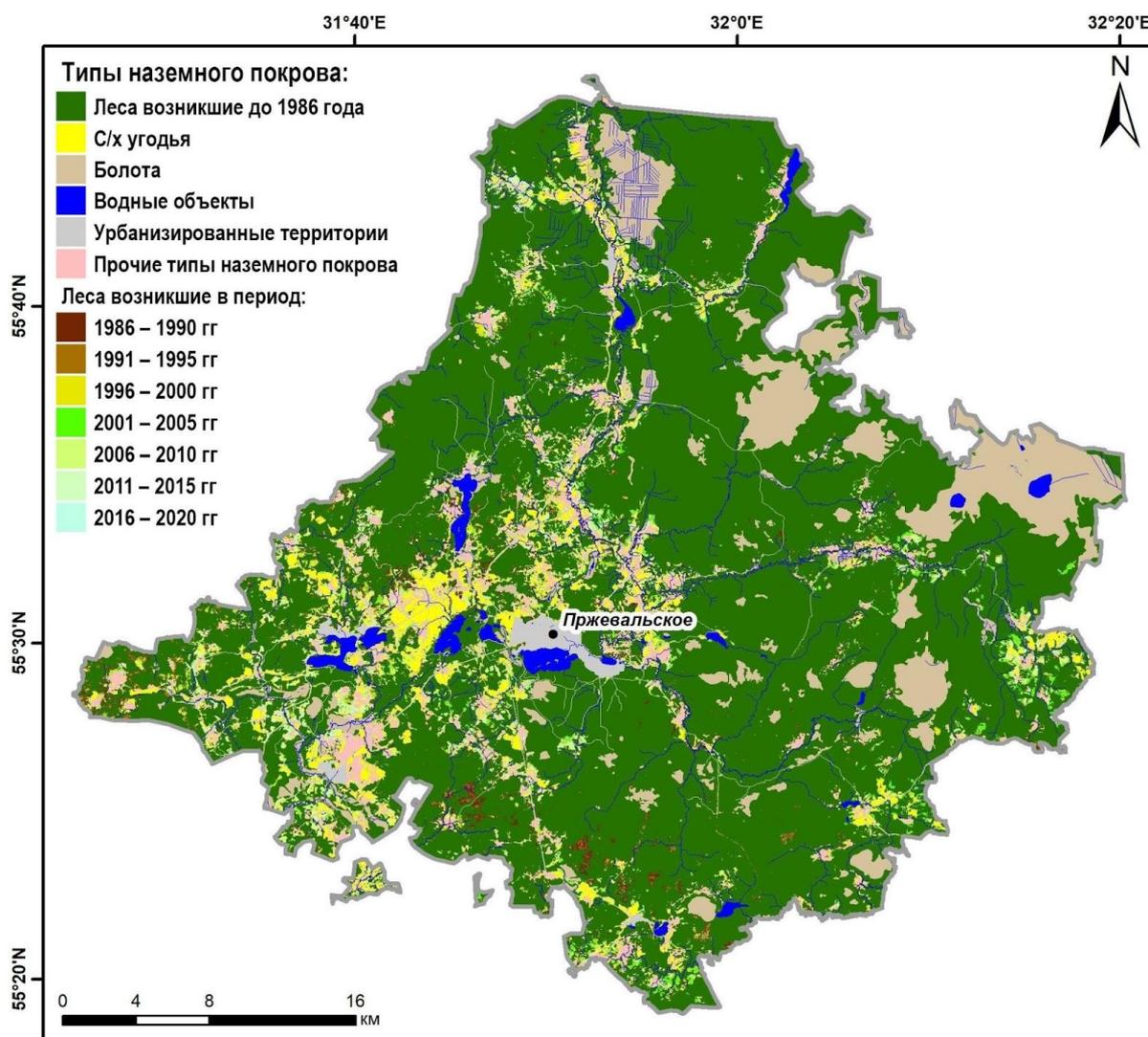


Рис. 1 – Динамика лесного покрова на территории НП «Смоленское Поозерье» за период с 1985 по 2020 год, оцененная по спутниковым данным Landsat. Болота, водные объекты и урбанизированные территории даны по актуальным данным OpenStreetMap.

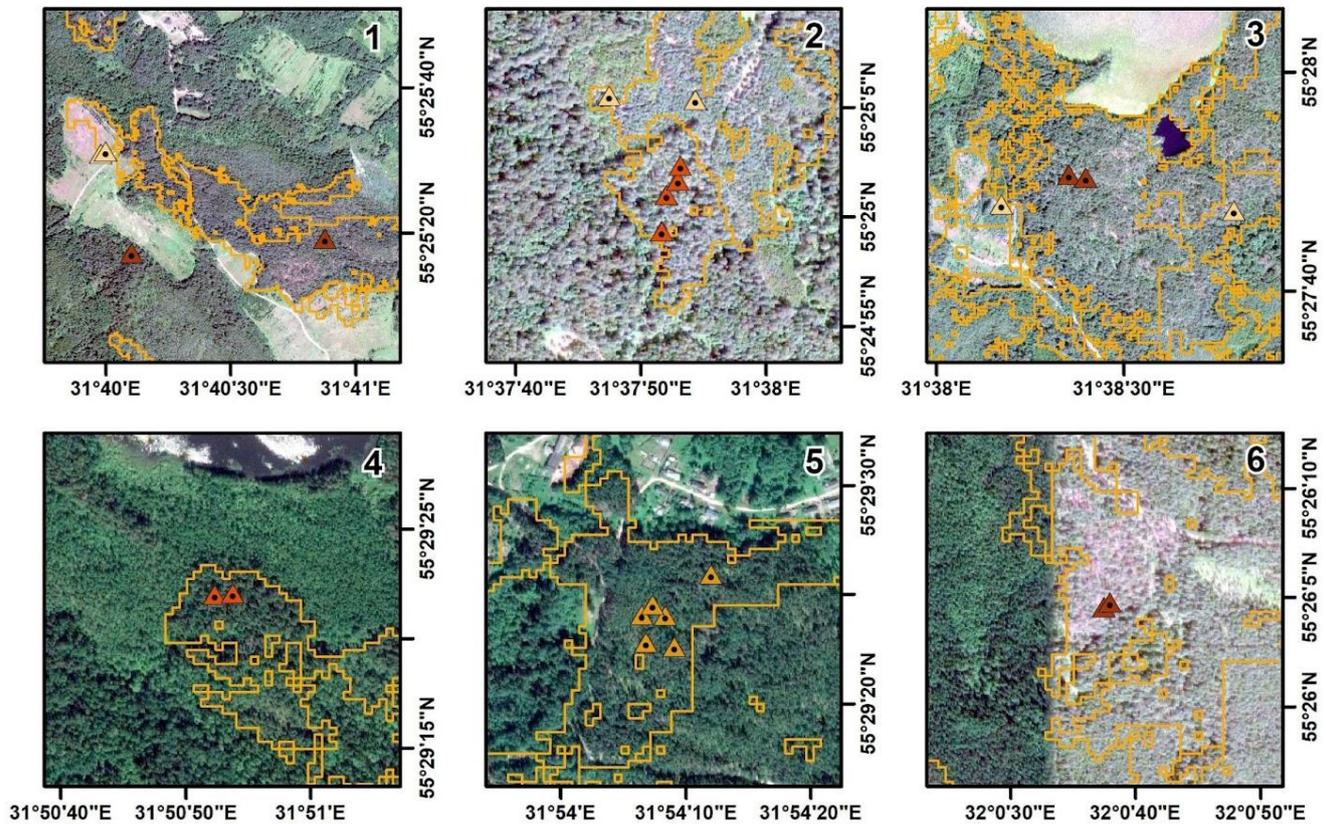
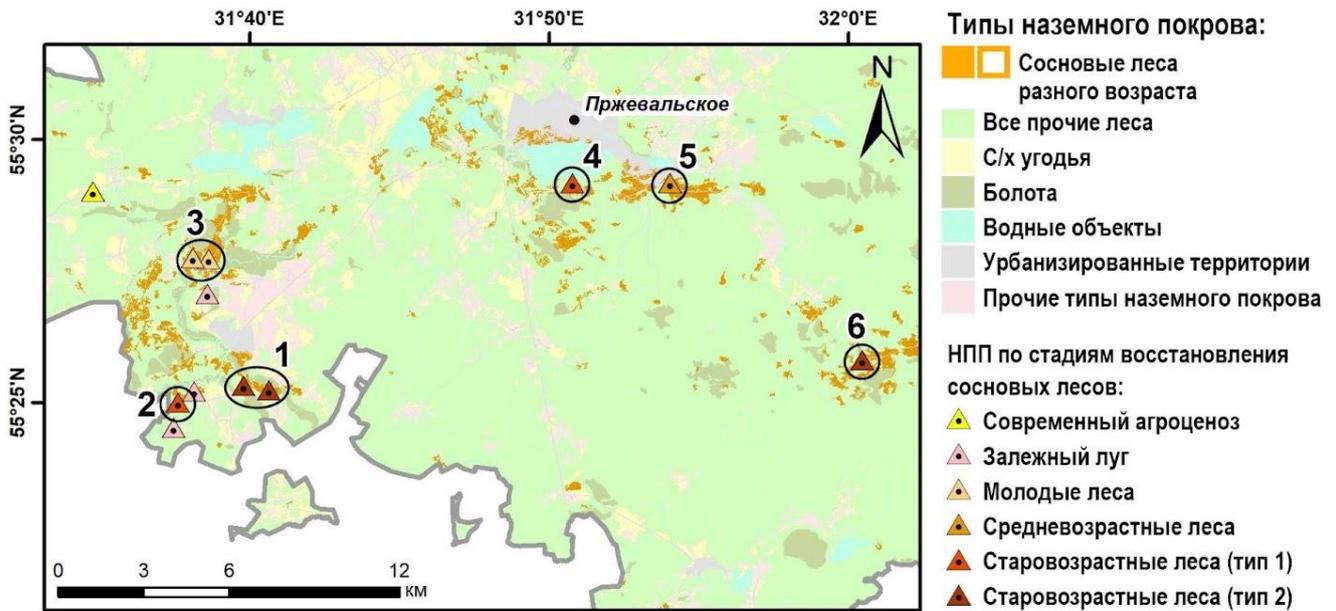


Рис. 2 – Участки сосновых лесов на разных стадиях агрогенной сукцессии, выделенные на основе спутниковых данных и исторических материалов, и заложенные в 2021 году пробные площади (ПП). В качестве фона на крупномасштабных фрагментах использованы высокодетальные спутниковые изображения из Google Maps. Старовозрастные сосняки первого типа расположены на месте заброшенных с/х-угодий, второго типа - условно коренные древостои.

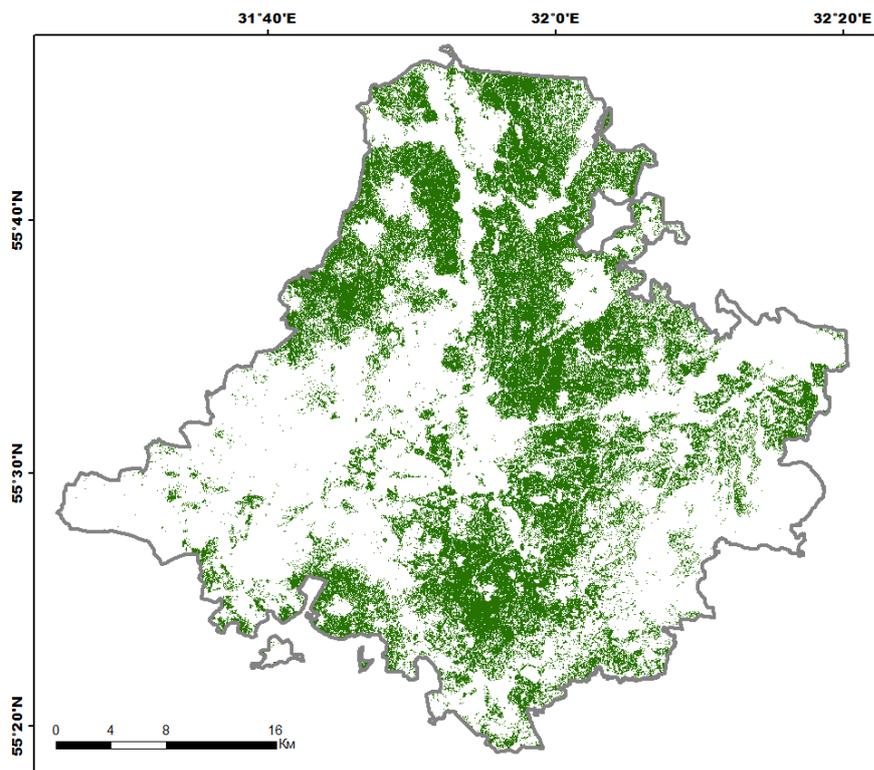


Рис. 3 – Участки с преобладанием хвойных пород по результатам расчета NDVI

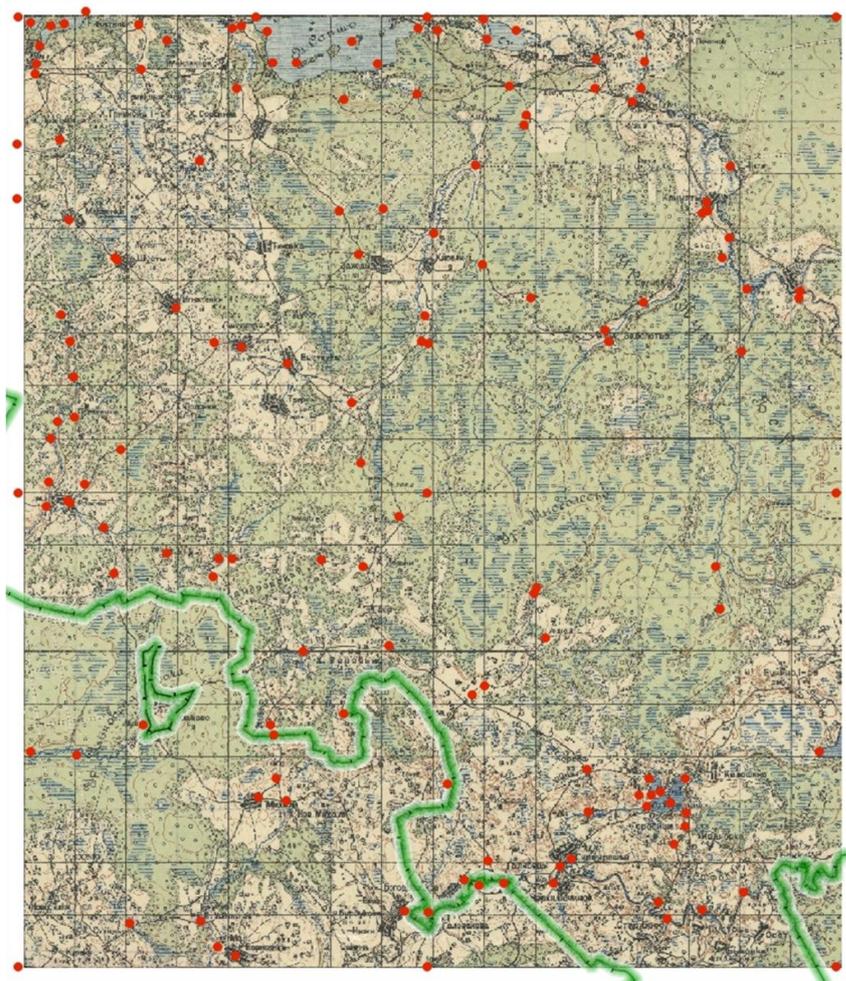


Рис. 4 – Для привязки листа карты N-36-16-D использована 151 точка. Состояние местности 1927 год. Дата выпуска 1931 год.

Первый год исследований был посвящен исследованию восстановления сосновых лесов (табл. 1, 2).

Таблица 1. Информационная база по компонентам ландшафтов, опробованным в ходе экспедиций 2021 г. и использованная для подготовки настоящего отчета

Стадии	Количество, шт.						
	Разрезы	Лесотаксационные площадки	Геоботанические описания*	Почвы			Почвенная макрофауна
				подстилка (горизонты L, F и H): химия/запасы	горизонты А, В и С на химию/плотность	на метагеном	
S0	3	-	6	3/18	15/19	9	15
S1	3	-	7	3/24	15/17	9	15
S2	3	1	6	6/48	17/19	9	15
S4	3	1	6	9/72	15 /18	9	15
S5	3	1	6	8/70	14 /17	9	15
S6	3	1	6	9/72	17 /18	9	15

* 20×20 м в лесных сообществах и 10×10 м в луговых. Стадии восстановления сосняков (S): 0 – агроценоз и однолетняя залежь, 1 – залежный луг на месте пашни, 2 – молодой лес (возрастом 10 - 30 лет) на месте пашни, 4 – средневозрастный лес (возрастом 70 - 80 лет) на месте пашни, 5 – старовозрастный лес (возрастом 80 - 100 лет) на месте пашни, 6 – старовозрастный лес (возрастом 90 - 100 и больше лет) на не пахавшихся почвах или почвах, восстановившихся после распашки

Таблица 2. Химико-аналитические работы, выполненные в ходе второго года реализации Проекта

Показатель	Метод определения	Число проанализированных проб
Величина рН (актуальная кислотность)	Потенциометрически	93
Содержание гумуса	Титриметрически с фенилантраниловой кислотой по И.В. Тюрину	93
Гранулометрический состав	Лазерная дифрактометрия	93
Содержание общего С и N	Газовая хроматография	133
Катионно-анионный состав водной вытяжки	Ионная хроматография	39
Подвижные калий и фосфор по Кирсанову	Атомно-эмиссионная спектрометрия индуктивно-связанной плазмы	с 133
Обменные основания		122
Содержание трудно обменных соединений		84
Содержание комплексных соединений		84
Содержание соединений, сорбированных гидроксидами Fe и Mn		84

Нулевой стадией (S0; рис. 5) агрогенной сукцессии являются агроценозы с преобладанием сорно-луговых видов, бедным видовым составом и невысокой сомкнутостью, что связано с механическим удалением растений и, возможно, обработкой гербицидами. Растительные сообщества свежих залежей (стадия S0) отличаются высоким видовым разнообразием: суммарно 82 вида сосудистых растений. По проективному покрытию преобладают злаки, большинство видов принадлежит к свежелогувой ценоморфе. Высокое видовое разнообразие первой стадии агрогенной сукцессии обусловлено низкой корневой конкуренцией в первые несколько лет после распашки на фоне большого запаса семян в почве, свойственного сегетальным сообществам, и заноса диаспор с соседних лугов и опушки леса.

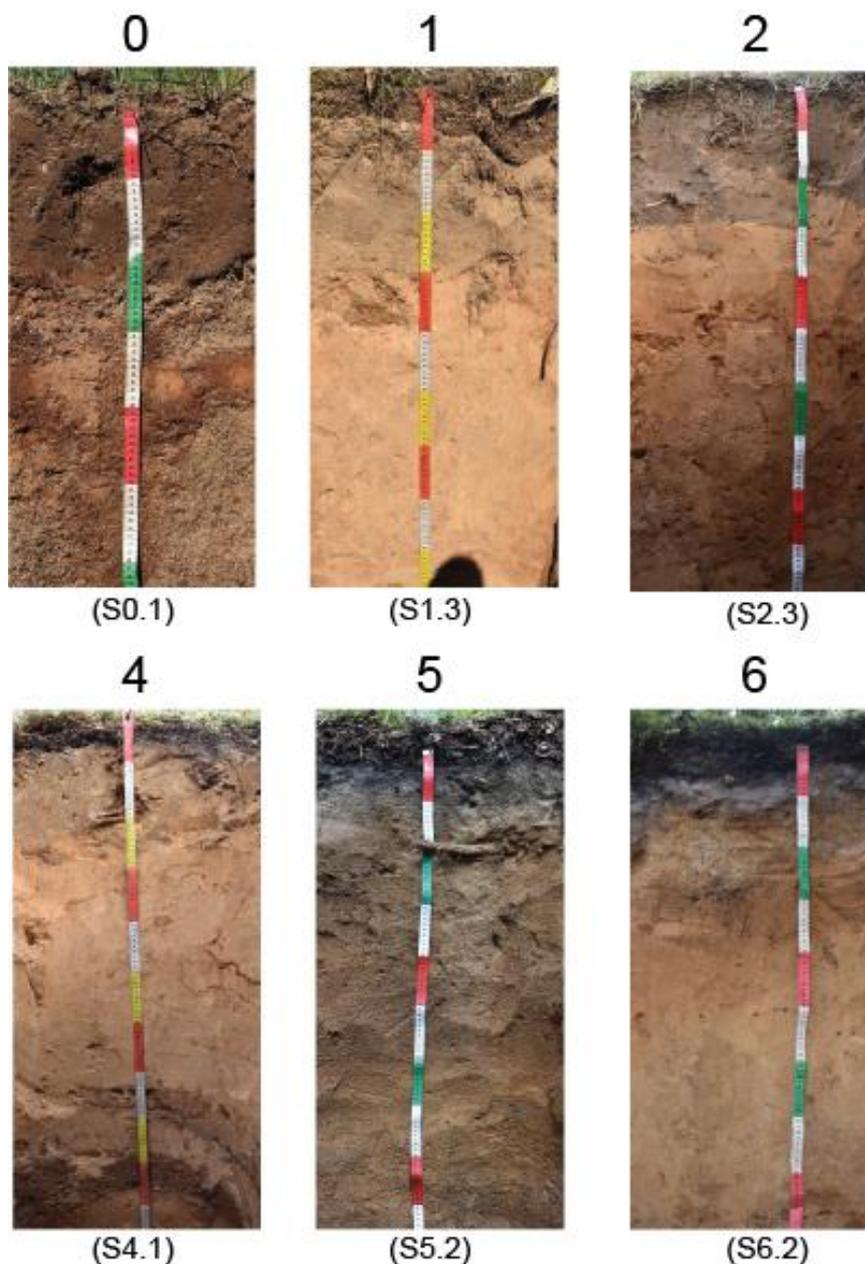


Рис. 5 – Почвы разных стадий восстановления сосновых лесов: 0 – агроценоз и однолетняя залежь, 1 – залежный луг на месте пашни, 2 – молодой лес (возрастом 10 - 30 лет) на месте пашни, 4 – средневозрастный лес (возрастом 70 - 80 лет) на месте пашни, 5 – старовозрастный лес (возрастом 80 - 100 лет) на месте пашни, 6 – старовозрастный лес (возрастом 90 - 100 и больше лет) на не пахавшихся почвах или почвах, восстановившихся после распашки

Луга на многолетних залежах (**стадия S1**) имеют среднее видовое разнообразие (суммарно 74 вида сосудистых растений). В травостое наиболее распространены злаки и виды родов *Artemisia* и *Potentilla*. Как и на предыдущей стадии преобладают виды свежелогувой

ценоморфы. За счет увеличения прямой и косвенной конкуренции с многолетними растениями значительно снизилось число рудералов. Подрост сосны (реже березы и осины), страдающий от весенних палов, отмечен на всех лугах.

На **стадии S2** после смыкания полога соснового древостоя (в возрасте около 10 лет) выпадают луговые виды и постепенно возрастает участие лесных. В молодых сосняках за 10-15 лет уменьшение освещенности по мере развития древесного полога снижает проективное покрытие травяного яруса с 80-85% до 1-20% и увеличивает – мохового от 5% до 20-45%. В травяном покрове 20-25-летних сосняков доминируют бореальные виды и отмечено большое число видов деревьев и кустарников (не выходящих из травяного яруса), среди которых много анемохоров и зоохоров.

Древостой средневозрастных (молодые сосняки, удовлетворяющие необходимым критериям, нам найти не удалось) сосняков (**стадия S4**) с небольшой примесью березы имеет сомкнутость 50-70% и ель во втором подъярусе и подросте (в последнем также встречается дуб). В травяном покрове сомкнутость варьирует от 30 до 70%, доминирует *Vaccinium myrtillus*, а доля бореальные виды достигает 81-94% при небольшом вкладе борových и неморальных. Моховой ярус имеет покрытие 80-100% и сложен таежными видами (доминирует *Pleurozium schreberi*). В сосняках этой стадии отмечены *Convallaria majalis*, *Maianthemum bifolium* и *Trientalis europaea*, которые считают индикаторами старовозрастных (ancient) лесов.

На поздних стадиях (**S5** и **S6**) сукцессии в сообществах сосняков выражена оконная структура, что определяет общее снижение сомкнутости древесного яруса. Древостой условно коренных сосновых лесов (стадия S6) обычно представлен несколькими поколениями сосен (максимальный измеренный возраст – 180 лет). Сообщества старых послепахотных сосняков характеризуются большим участием в подлеске и травяном ярусе мезофитных видов, в том числе неморальных. Для условно коренных сосняков типична высокая доля борových видов. Примесь лиственных деревьев и кустарников способствует формированию опада более высокого качества, что приводит к увеличению обилия и разнообразия сосудистых растений нижних ярусов. Условно-коренные сосняки сформировались под влиянием низовых пожаров.

По таксационным данным обнаружено усложнение структуры лесных сообществ и увеличение его видового разнообразия, особенно подчиненных ярусов (**рис. 6 – 10**). Относительно монотонно уменьшается число деревьев (от 3325 шт./га в 20-летних сосняках до 648 шт./га в сосняках 80-90 лет). Максимальный запас стволовой древесины (392 м³/га) отмечен на стадии S4, при этом доля сосны по запасу 0,9. В старовозрастных сосняках (S5 и S6) запас стволовой древесины снижается до 368 и 244 м³/га соответственно. На стадии S5 активно распадается старое поколение сосны (ее доля в запасе 0,7). В сосняках стадии S6 хорошо выражена оконная структура, способствующая возобновлению разнообразных древесных видов.

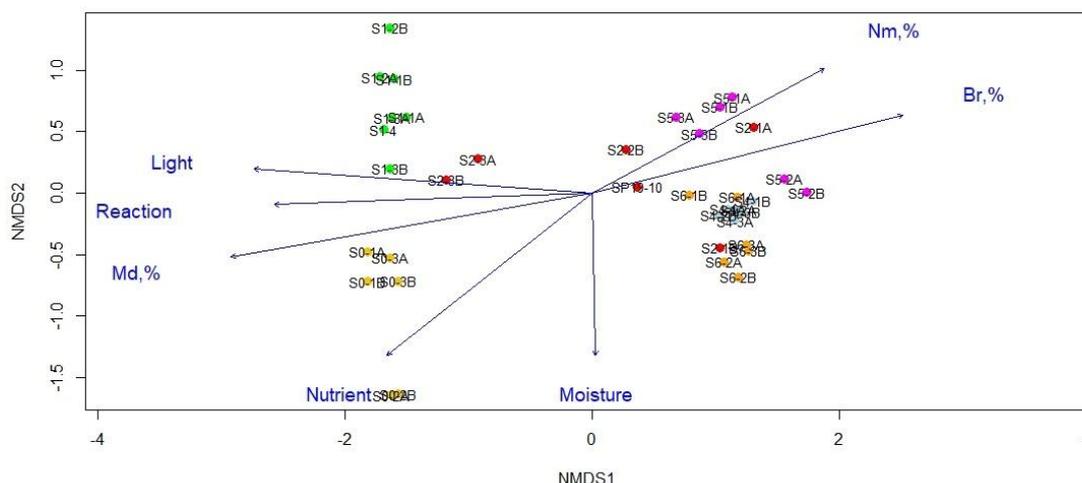


Рис. 6 – Ординация методом NMDS геоботанических площадок. Векторы обозначают: 1) факторы по шкалам Элленберга: Reaction – реакция почвы, Nutrient – богатство почвы азотом, Moisture – влажность почвы, Light – освещенность; 2) ЭЦГ: Nm - неморальная, Br - бореальная, Md – луговая

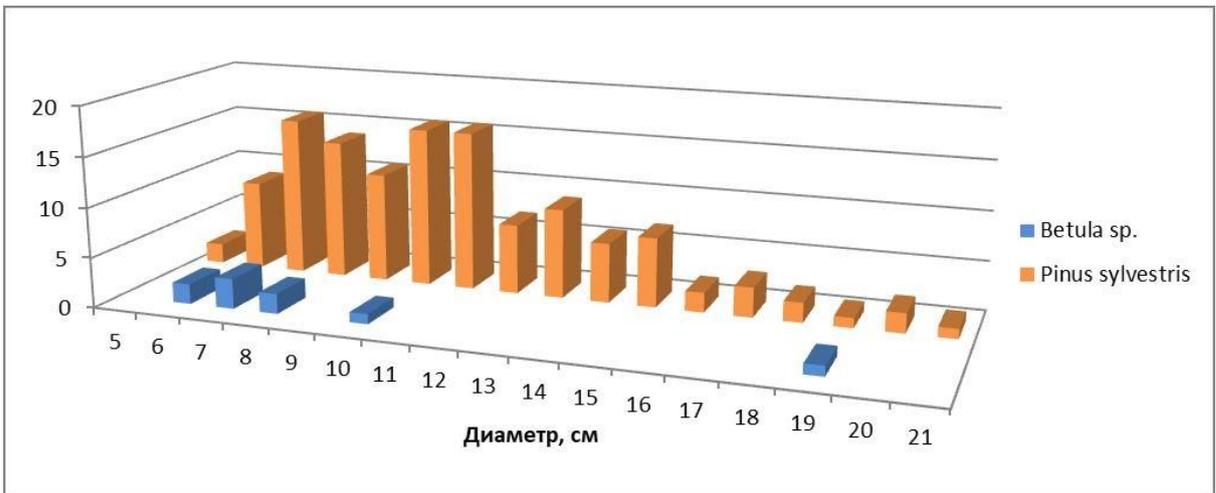


Рис. 7 – Распределение деревьев на таксационной площади стадии S2. По оси ординат - число деревьев.

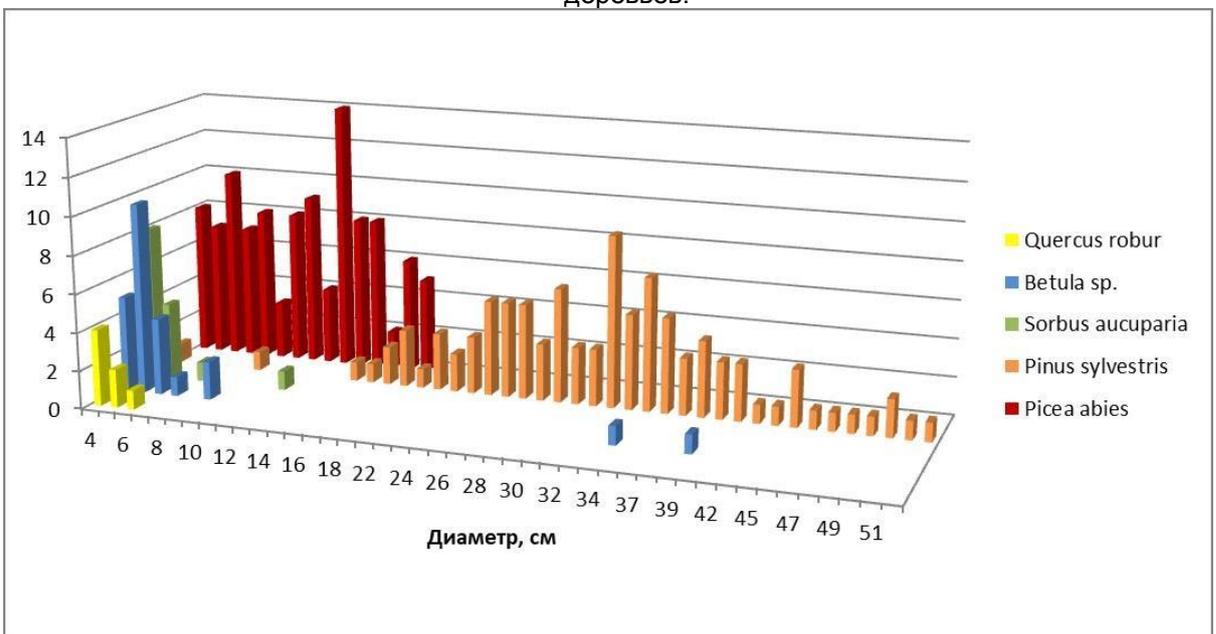


Рис. 8 – Распределение деревьев на таксационной площади стадии S4. По оси ординат - число деревьев

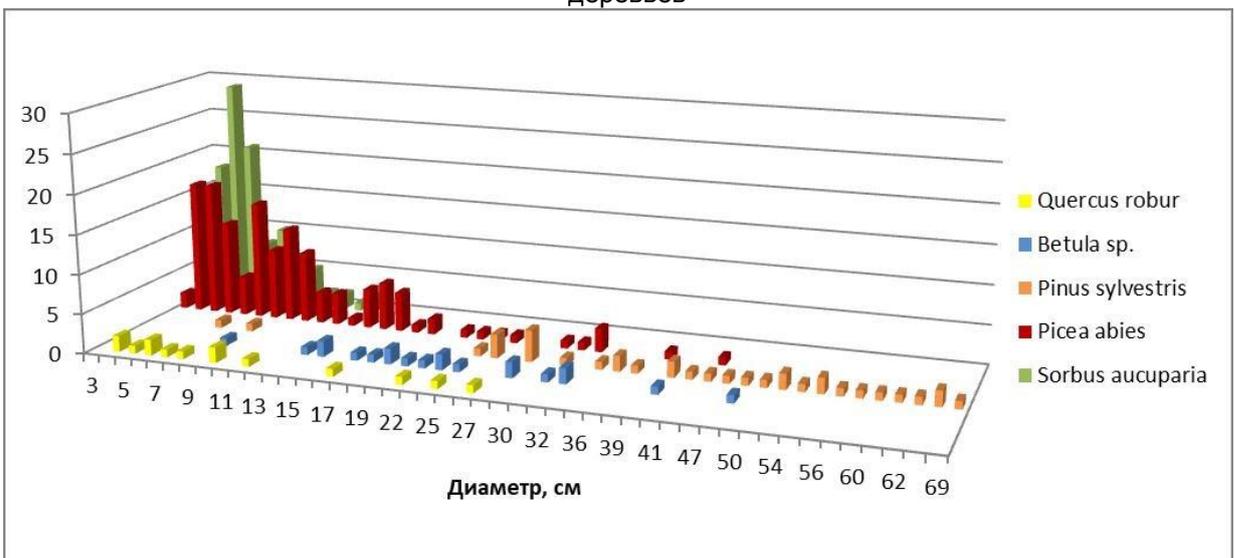


Рис. 9 – Распределение деревьев на таксационной площади стадии S5. По оси ординат - число деревьев

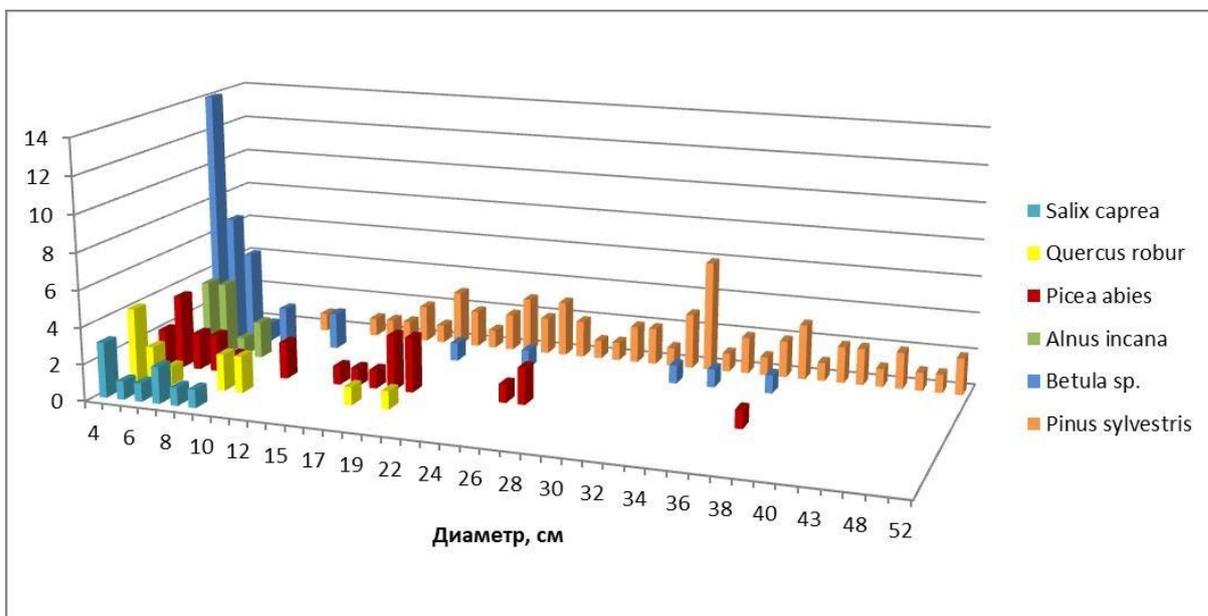


Рис. 10 – Распределение деревьев на таксационной площади стадии S6. По оси ординат - число деревьев

В ходе постагрогенной сукцессии смена лугового типа растительности на лесной происходит после смыкания полога, примерно через 10 лет после появления деревьев. Скорости восстановления растительности разных ярусов неодинаковы (**табл. 4, 5**): уже на стадии молодняков в постагрогенные сообщества вселяется большинство видов кустарников и деревьев. На стадии средневозрастных сосняков восстанавливаются покрытие и доминанты мохового яруса и многие характерные и доминирующие виды травяного яруса сосновых лесов. Однако наблюдаемый распад соснового древостоя и происходящая смена сосны елью в старовозрастных постагрогенных сообществах, а также большие различия в эколого-ценотической структуре с условно коренными сосновыми лесами, позволяют предположить, что при спонтанном восстановлении постагрогенных сосняков заключительная стадия сукцессии будет отличаться от выделенной нами стадии условно-коренных сосняков.

Таблица 4. Процент видов, общих для разных стадий восстановления

стадия	число видов	% общих видов со стадией					
		S0	S1	S2	S4	S5	S6
S0	65	-	55,5	66,0	7,7	15,4	9,2
S1	63	57,1	-	68,3	7,9	17,5	12,7
S2	85	45,9	50,6	-	24,7	41,2	27,1
S4	33	15,1	15,1	63,6	-	72,7	69,7
S5	54	18,5	20,4	64,8	44,4	-	48,1
S6	35	17,1	22,9	65,7	65,7	74,3	-

Таблица 5. Попарная корреляция проективного покрытия видов на разных стадиях восстановления (тест Спирмена)

стадия1	стадия2	число общих видов	p-value	r
S0	S1	35	5e-04	0,5606
S0	S2	39	0,0027	0,4667
S0	S4	5	0,7177	-0,2236
S0	S5	10	0,5401	-0,2207
S0	S6	6	0,5112	0,3388
S1	S2	43	2e-04	0,536
S1	S4	5	0,9347	-0,0513
S1	S5	11	0,3997	0,2826
S1	S6	8	0,7444	0,138
S2	S4	12	0,7465	-0,1045
S2	S5	22	0,5709	0,1278
S2	S6	11	0,2009	0,4179
S4	S5	16	0,1951	0,3418
S4	S6	15	0,1603	0,3818
S5	S6	14	0,1094	0,4466

Сообщества стадий S0, S1 и S2 состоят из более близкородственных видов травянистых растений (**табл. 6**), чем на более поздних стадиях сукцессии. Это отражает больший вклад условий среды в формирование сообществ ранних стадий восстановления сосняков. Стадия S5 характеризуется произрастанием эволюционно далеких видов, что может говорить о наибольшей роли межвидовой конкуренции в формировании сообществ этой стадии среди всех 6 рассмотренных.

В ходе естественного постагрогенного восстановления леса меняются морфологические особенности органофилия почв (**рис. 11**). Большая часть подстилок пашни и залежи фрагментарна и представлена одним горизонтом – опадом текущих лет – и относится к деструктивному типу. Ферментативная подстилка, состоящая из деструктивного и ферментативного горизонтов, диагностирована в молодом сосняке, а гумифицированная характерна для более продвинутых стадий сукцессий. С возрастом сосновых лесов увеличиваются запасы подстилки, ее гумусированность и мощность. Состав и качество опада определяют активность почвенных макроспрофагов и формирование разных форм гумуса: хемимор (hemimor) характерен для случаев, где количество легкоразлагаемых компонентов подстилки больше 7% и присутствуют разные функциональные группы дождевых червей. В 70-80 летних сосняках, где в подстилке практически отсутствуют легкоразлагаемые компоненты (доля 0.5%) и дождевые черви отмечены не были, подстилка соответствует типу эумор (Eumor).

Таблица 6. Филогенетический анализ

стадия	Число индикаторных видов	NRI			NTI		
		Значение	p-value		Значение	p-value	
			Кластеризация	Отталкивание		Кластеризация	Отталкивание
495 видов							
S0	27	1,666	0,003	0,997	2,538	0,002	0,554
S1	23	2,149	0,002	0,998	1,941	0,019	0,981
S2	18	1,493	0,008	0,992	0,108	0,473	0,527
S4	8	0,140	0,433	0,567	0,910	0,183	0,817
S5	16	-0,388	0,920	0,080	-1,040	0,854	0,146
S6	8	0,886	0,067	0,934	1,533	0,061	0,939
124 вида							
S0	27	2,427	0,021	0,979	2,199	0,011	0,990
S1	23	3,680	0,004*	0,996	1,491	0,069	0,931
S2	18	2,207	0,030	0,970	-0,584	0,723	0,277
S4	8	-0,429	0,616	0,384	0,575	0,292	0,708
S5	16	-2,041	0,999	0,002*	-1,871	0,969	0,031
S6	8	1,071	0,130	0,870	1,232	0,114	0,886

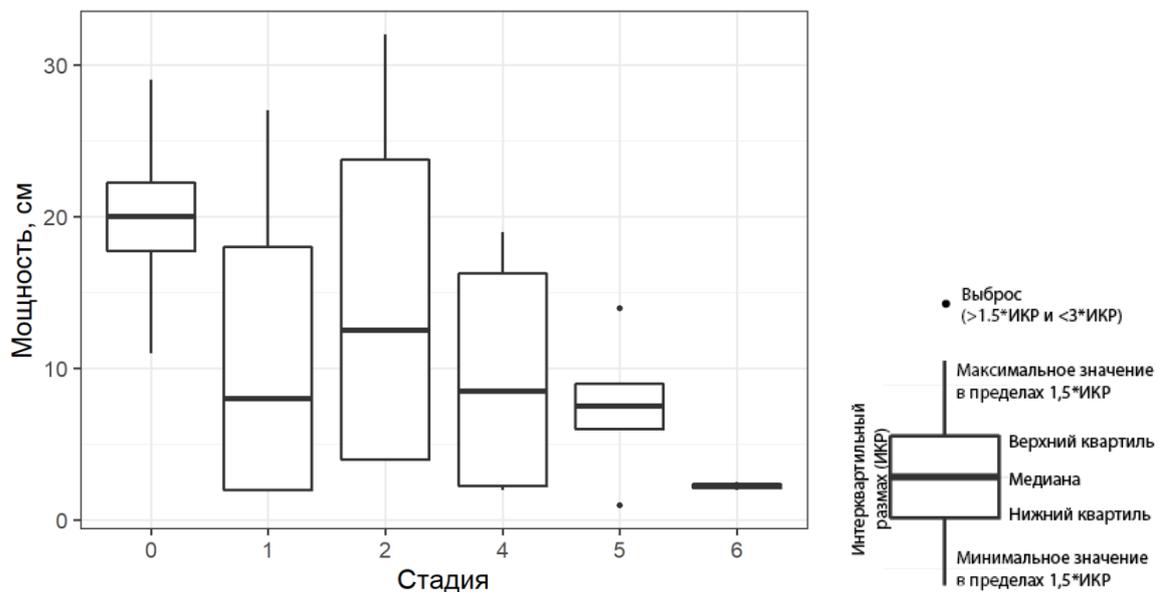


Рис. 11 – Мощность гумусовых горизонтов почв разных стадий восстановления сосновых лесов: 0 – агроценоз и однолетняя залежь, 1 – залежный луг на месте пашни, 2 – молодой лес (возрастом 10 - 30 лет) на месте пашни, 4 – средневозрастный лес (возрастом 70 - 80 лет) на месте пашни, 5 – старовозрастный лес (возрастом 80 - 100 лет) на месте пашни, 6 – старовозрастный лес (возрастом 90 - 100 и больше лет) на не распаханых почвах или почвах, восстановившихся после распашки

Основными трендами в изменении характера нижежащих (органо-)минеральных горизонтов является уменьшение их мощности (из пахотного P в старопашотный AYpa), появление (развитие) грубогумусового горизонта реградации AOW, и размытие ровной нижней границы старопашотного горизонта, в то время как оставшаяся часть профиля остается неизменной, так как не затрагивается распашкой. Мощность гумусового горизонта максимальна на стадии пашни, монотонно уменьшается на следующих стадиях и минимальна на стадии коренного леса. Полученные результаты показывают, что морфология почвенного профиля за 80-100 лет не восстанавливается до естественного (исходного) уровня: в профиле сохраняется старопашотный горизонт AYpa, начинает формироваться грубогумусовый горизонт AOW, но не заметно признаков формирования горизонта иллювирувания гумуса BHF (рис. 12 – 16).

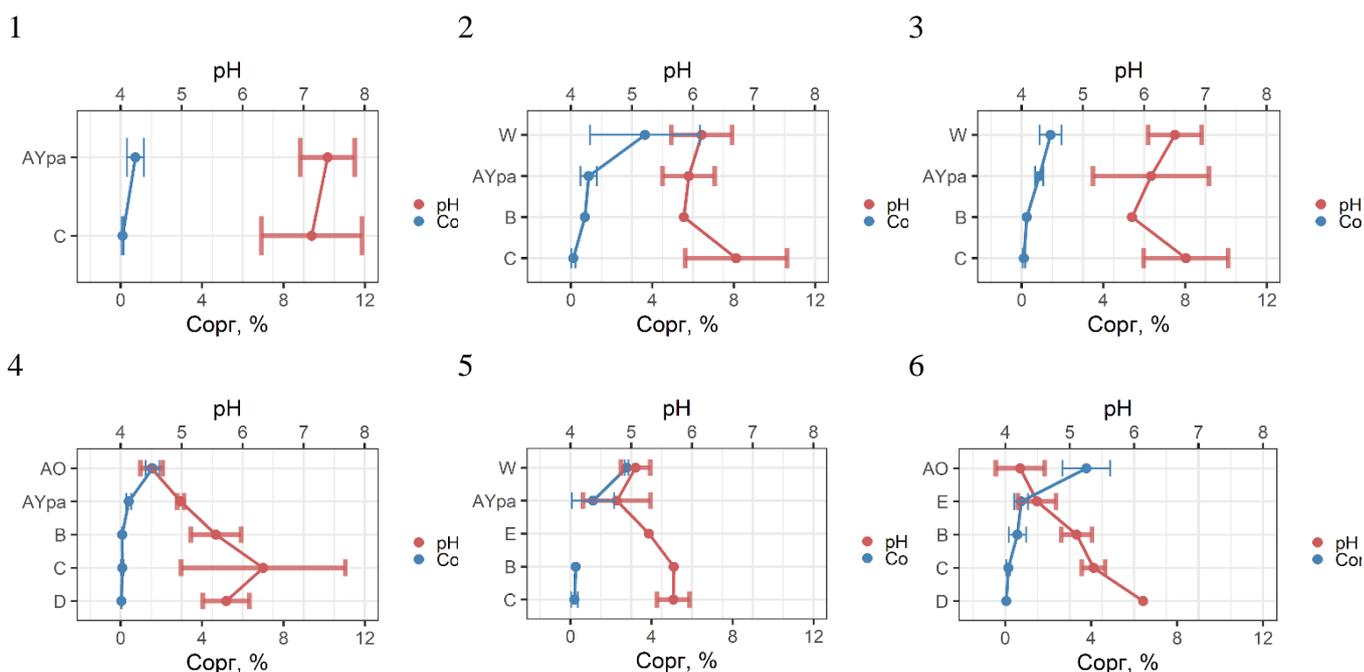


Рис. 12 – Профильное распределение pH и органического углерода почв разных стадий восстановления сосновых лесов в Смоленском Поозерье: 0 – агроценоз и однолетняя залежь, 1 – залежный луг на месте пашни, 2 – молодой лес (возрастом 10 - 30 лет) на месте пашни, 4 – средневозрастный лес (возрастом 70 - 80 лет) на месте пашни, 5 – старовозрастный лес (возрастом 80 - 100 лет) на месте пашни, 6 – старовозрастный лес (возрастом 90 - 100 и больше лет) на не пахавшихся почвах или почвах, восстановившихся после распашки

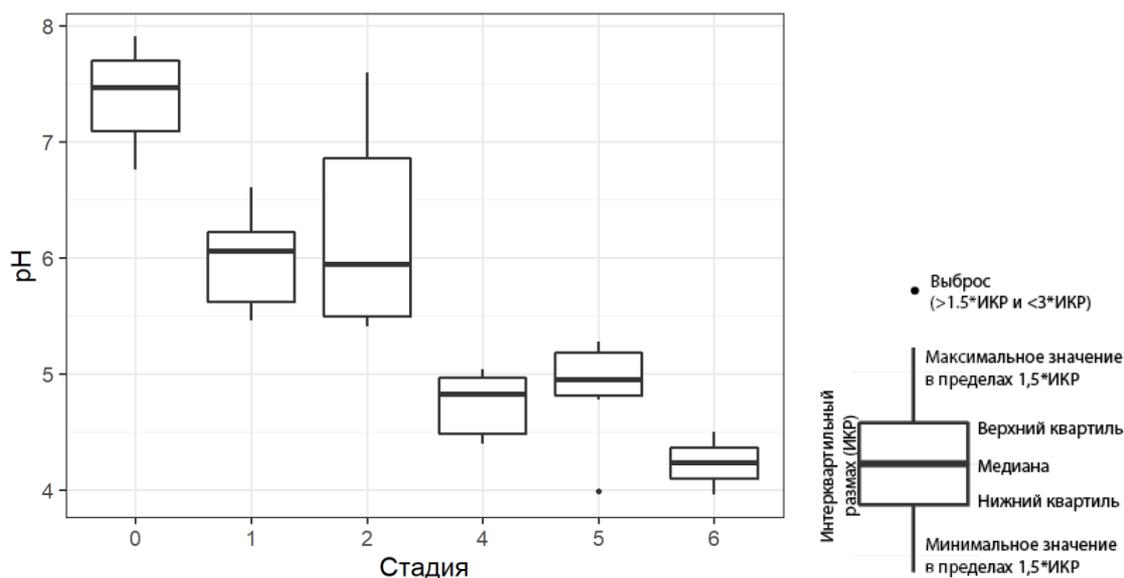


Рис. 13 – Величина pH гумусовых горизонтов почв разных стадий восстановления сосновых лесов в Смоленском Поозерье: 0 – агроценоз и однолетняя залежь, 1 – залежный луг на месте пашни, 2 – молодой лес (возрастом 10 - 30 лет) на месте пашни, 4 – средневозрастной лес (возрастом 70 - 80 лет) на месте пашни, 5 – старовозрастной лес (возрастом 80 – 100 лет) на месте пашни, 6 – старовозрастной лес (возрастом 90 – 100 и больше лет) на не пахавшихся почвах или почвах, восстановившихся после распашки

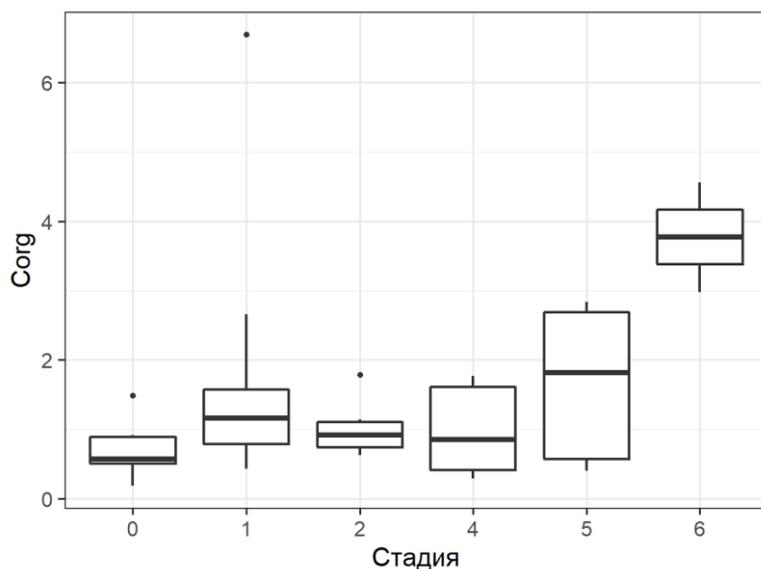


Рис. 14 – Содержание органического углерода в гумусовых горизонтах на разных стадиях восстановления сосновых лесов: 0 – агроценоз и однолетняя залежь, 1 – залежный луг на месте пашни, 2 – молодой лес (возрастом 10 - 30 лет) на месте пашни, 4 – средневозрастной лес (возрастом 70 - 80 лет) на месте пашни, 5 – старовозрастной лес (возрастом 80 - 100 лет) на месте пашни, 6 – старовозрастной лес (возрастом 90 - 100 и больше лет) на не пахавшихся почвах или почвах, восстановившихся после распашки

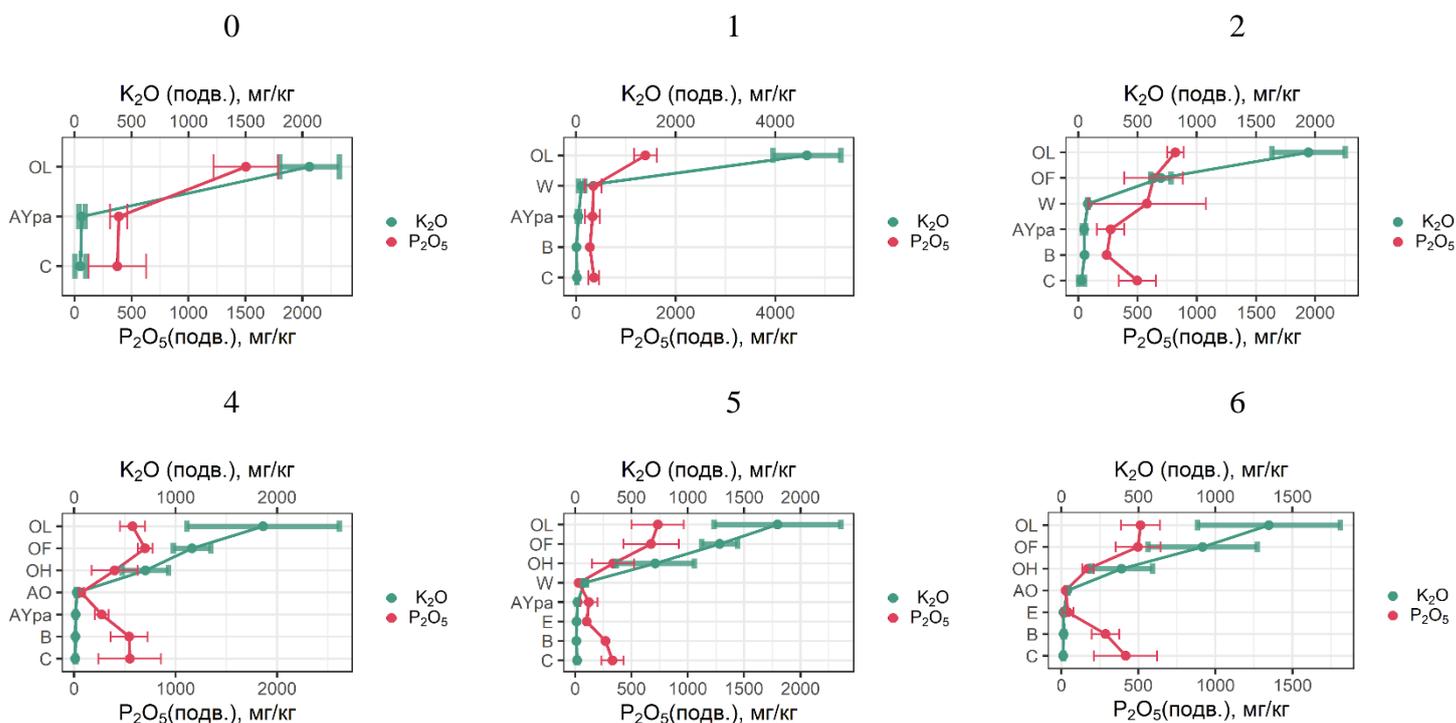


Рис. 15 – Профильное распределение содержания подвижных калия и фосфора в гумусовых горизонтах почв на разных стадиях восстановления сосновых лесов: 0 – агроценоз и однолетняя залежь, 1 – залежный луг на месте пашни, 2 – молодой лес (возрастом 10 - 30 лет) на месте пашни, 4 – средневозрастный лес (возрастом 70 - 80 лет) на месте пашни, 5 – старовозрастный лес (возрастом 80 - 100 лет) на месте пашни, 6 – старовозрастный лес (возрастом 90 - 100 и больше лет) на не пахавшихся почвах или почвах, восстановившихся после распашки

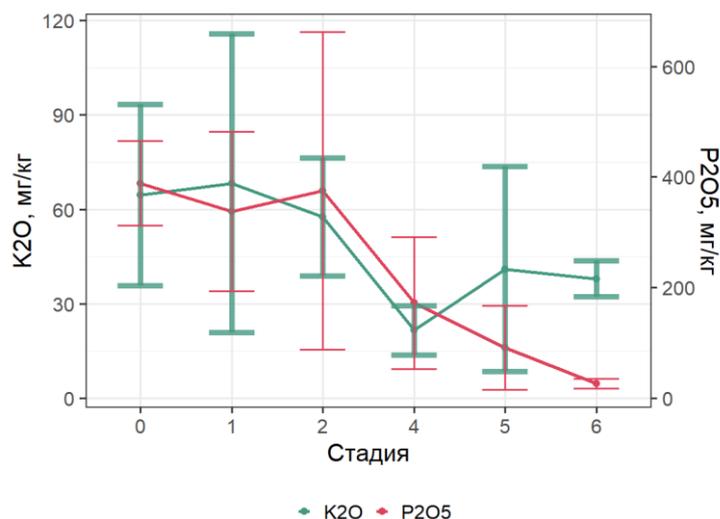


Рис. 16 – Содержание подвижных калия (зеленая линия) и фосфора (красная линия) в гумусовых горизонтах на разных стадиях восстановления сосновых лесов: 0 – агроценоз и однолетняя залежь, 1 – залежный луг на месте пашни, 2 – молодой лес (возрастом 10 - 30 лет) на месте пашни, 4 – средневозрастный лес (возрастом 70 - 80 лет) на месте пашни, 5 – старовозрастный лес (возрастом 80 - 100 лет) на месте пашни, 6 – старовозрастный лес (возрастом 90 - 100 и больше лет) на не пахавшихся почвах или почвах, восстановившихся после распашки

По классификации гранулометрического состава Н.А. Качинского большинство почв относятся к классам супеси, рыхлого и связного песка (рис. 17). Иллювиальные горизонты и почвообразующие породы реже имеют суглинистый состав (наиболее часто легкосуглинистый). По классификации гранулометрического состава WRB большинство изученных почв относятся

к классу песка (крупного, среднего, пылевато-крупного, пылеватого очень мелкого) и реже - крупнопесчанистого суглинка. Как правило, изученные почвы слабокислые.

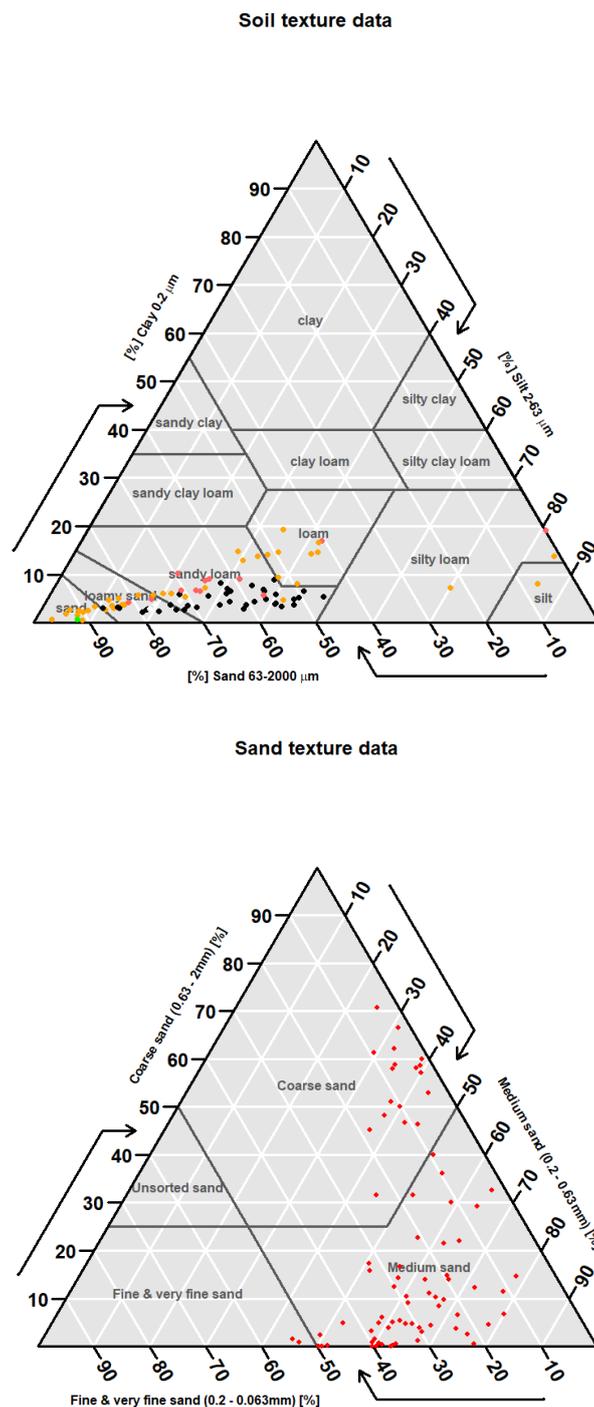


Рис. 17 – Классификация гранулометрического состава изученных почв по WRB (вверху) с детализацией для образцов легкого гранулометрического состава (внизу)

Величина pH убывала с глубиной или значимо не менялась. В гумусовых горизонтах значения pH максимальны в пахотных почвах (стадия S0) и минимальны в почвах условно коренных лесов. Содержание органического углерода монотонно убывает с глубиной во всех почвах.

Гумусовые горизонты первых пяти стадий восстановления сосновых лесов значимо не отличаются друг от друга по содержанию углерода органических веществ, но выделяются повышенными значениями относительно почв условно коренных лесов (стадия S6).

Содержание подвижного К монотонно убывает с глубиной во всех почвах. В профильном распределении подвижного Р часто фиксируется локальный минимум в средней части профиля, соответствующий элювиальному горизонту или нижней части (старо)пахотного. Содержание подвижных К и Р в гумусовых горизонтах монотонно снижается до стадии средневозрастных лесов. В почвах старовозрастных сосняков продолжается падение содержания Р, а содержание К возрастает. Между стадиями S5 и S6 нет значимых различий по содержанию подвижных Р и К.

Из полученных данных можно сделать выводы о том, что за 70 лет произрастания леса рН постагрогенных почв восстанавливается до фоновых значений. За 80 лет содержание подвижных Р и К выходит на уровень, близкий к природному, но содержание органического углерода за это время не приходит к естественной норме.

Самый высокий уровень аккумуляции углерода в органогенных горизонтах демонстрируют сосновые леса возрастом более 70 лет (7.6 - 14.3 т/га), а самые низкие – пашни и залежи (0.1 - 2.6 т/га). В слое 0-30 см тенденция другая: самый высокий уровень аккумуляции демонстрируют залежи, сосновые леса возрастом 20-30 и 80-90 лет на постагрогенных почвах (35 - 30 т/га), а самые низкие – пашня, сосняки старше 70-80 лет на залежах и сосняки возрастом 90-100 лет стадий S5 и S6 (15 - 25 т/га). В слое 30-100 см запасы углерода не отличаются в почвах разных стадий. Величина запасов почвенного углерода меняется нелинейно в ходе агрогенной сукцессии, и зависит от предыдущей истории хозяйственного освоения данного участка, состава растительности, активности макроспрофагов и свойств почвообразующих пород.

Содержание четырех изученных подвижных форм соединений щелочноземельных металлов (Ca, Mg и Sr) монотонно уменьшается от стадии S1 к стадии S6 в горизонтах А и С, что отражает выщелачивание элементов после прекращения известкования под действием кислотного гидролиза. Совместно с подкислением среды это мобилизует полуторные окислы (Fe и Al) и в гумусовом горизонте – связанные с ними трудно обменные соединения Ba, Ti, Cu. Содержание соединений S, извлекаемых ацетатно-аммонийным буфером с рН 4,8 и 7,0, также увеличивается от почв ранних стадий сукцессии к более поздним, вероятно, за счет накопления ее наиболее подвижных соединений в верхней части профиля за счет трансформации растительного опада.

Население почвенной макрофауны в рассматриваемом пространственно-временном ряду меняется нелинейно (**рис. 18 – 21**): наибольшее таксономическое разнообразие выявлено в почвах залежных лугов и сосновых лесов поздних стадий восстановления (70 лет и старше), как на распаиваемых почвах, так и в почвах без признаков распашки. В ходе восстановления леса увеличивается общее число семейств почвенной макрофауны, что связано в первую очередь с восстановлением горизонта подстилки – важного местообитания беспозвоночных. Именно изменения в составе подстилочной фауны увеличивают разнообразие зооценозов как по показателям числа семейств, так и по значениям индекса разнообразия Симпсона (**табл. 7**). Разнообразие эндогеиной (собственно почвенной) фауны, напротив, снижается в данном ряду, что связано с легким гранулометрическим составом почв, и связанной с ним влажностью почвы, лимитирующей разнообразие влаголюбивых педобионтов. Таким образом, можно сделать вывод, что биоразнообразие подстилочной фауны восстанавливается быстрее почвенной. На основании анализа полученных данных выделены стадии максимальной реализации функциональной и таксономической представленности почвенной макрофауны. К таким стадиям можно отнести «старовозрастные» сосновые леса на постагрогенных почвах и почвах, без признаков распашки: в них высока доля сапрофагов – важного звена в деструкции опада и формировании почвенного плодородия, в них происходит восстановление биоразнообразия и плотности индикаторов «лесной фауны» – подстилочных и почвенно-подстилочных дождевых червей, двупарноногих многоножек, моллюсков, жуличиц, пауков, жуков-стафилинид.

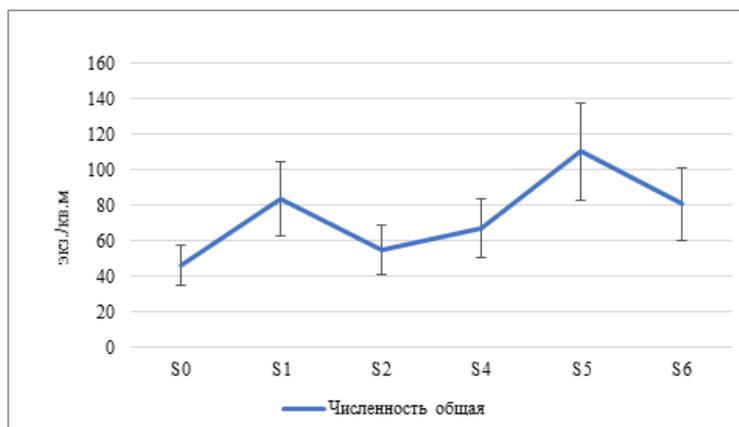


Рис. 18 – Динамика общей численности (экз./кв.м) макрофауны в ходе постагрогенного восстановления сосновых лесов: S0 – агроценоз и однолетняя залежь, S1 – залежный луг на месте пашни, S2 – молодой лес (возрастом 10 - 30 лет) на месте пашни, S4 – средневозрастный лес (возрастом 70 - 80 лет) на месте пашни, S5 – старовозрастный лес (возрастом 80 - 100 лет) на месте пашни, S6 – старовозрастный лес (возрастом 90 - 100 и больше лет) на не пахавшихся почвах или почвах, восстановившихся после распашки.

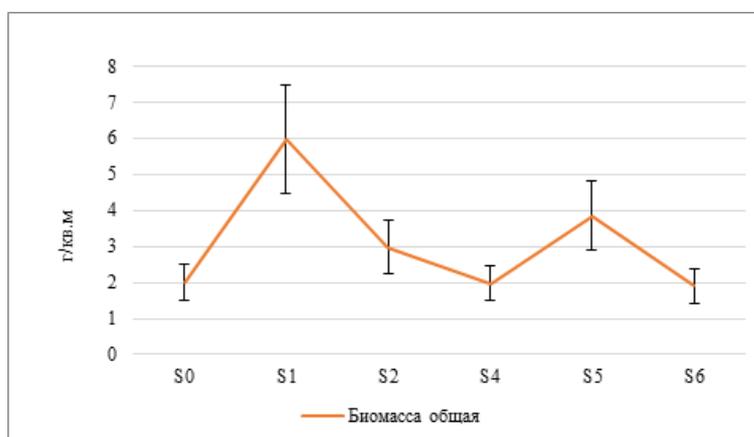


Рис. 19 – Динамика общей биомассы (г/кв.м) макрофауны в ходе постагрогенного восстановления сосновых лесов: S0 – агроценоз и однолетняя залежь, S1 – залежный луг на месте пашни, S2 – молодой лес (возрастом 10 - 30 лет) на месте пашни, S4 – средневозрастный лес (возрастом 70 - 80 лет) на месте пашни, S5 – старовозрастный лес (возрастом 80 - 100 лет) на месте пашни, S6 – старовозрастный лес (возрастом 90 - 100 и больше лет) на не пахавшихся почвах или почвах, восстановившихся после распашки.

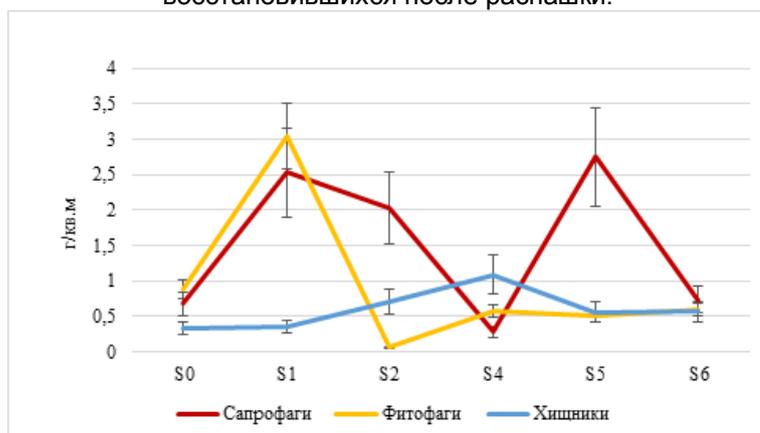


Рис. 20 – Динамика биомассы (г/кв.м) основных трофических групп макрофауны в ходе постагрогенного восстановления сосновых лесов: S0 – агроценоз и однолетняя залежь, S1 – залежный луг на месте пашни, S2 – молодой лес (возрастом 10 - 30 лет) на месте пашни, S4 – средневозрастный лес (возрастом 70 - 80 лет) на месте пашни, S5 – старовозрастный лес (возрастом 80 - 100 лет) на месте пашни, S6 – старовозрастный лес (возрастом 90 - 100 и больше лет) на не пахавшихся почвах или почвах, восстановившихся после распашки.

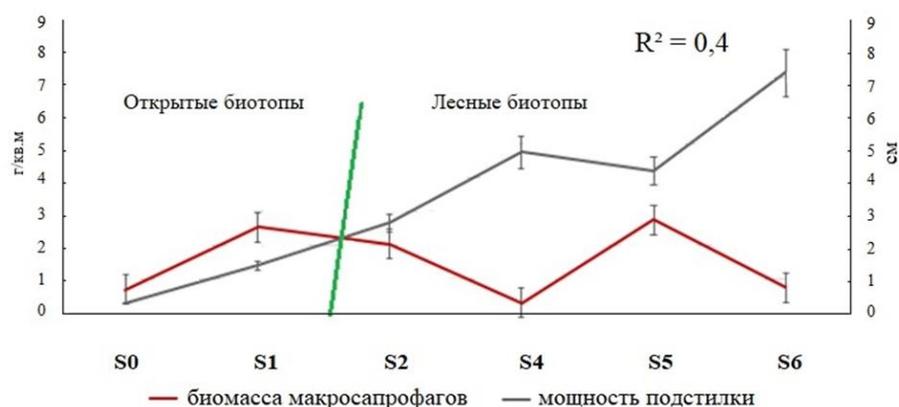


Рис. 21 – Динамика биомассы макросaproфагов (г/кв.м) и мощности подстилки (см) в почвах разных стадий (S0 - S6) постагрогенного восстановления сосновых лесов: S0 – агроценоз и однолетняя залежь, S1 – залежный луг на месте пашни, S2 – молодой лес (возраст 10 - 30 лет) на месте пашни, S4 – средневозрастный лес (возраст 70 - 80 лет) на месте пашни, S5 – старовозрастный лес (возрастом 80 - 100 лет) на месте пашни, S6 – старовозрастный лес (возраст 90 - 100 и более лет) на не пахавшихся почвах или почвах, восстановившихся после распашки.

Таблица 7. Параметры биоразнообразия почвенных зооценозов макрофауны в ходе постагрогенного восстановления сосновых лесов

Параметры биоразнообразия	Стадия					
	S0	S1	S2	S4	S5	S6
Общее число семейств	13	19	15	18	21	18
Число семейств подстилочной фауны	7	10	9	11	13	13
Число семейств почвенной фауны	6	9	6	7	8	6
Индекс разнообразия Симпсона общий ($D_{\text{общ.}}$)*	0,86	0,87	0,87	0,86	0,87	0,88
Индекс разнообразия Симпсона подстилочной фауны ($D_{\text{подст.}}$)*	0,76	0,78	0,79	0,80	0,81	0,79
Индекс разнообразия Симпсона почвенной фауны ($D_{\text{почв.}}$)*	0,64	0,78	0,85	0,76	0,74	0,72
Число экологических групп дождевых червей	1	3	1	1	2	2

D – индекс разнообразия Симпсона, $D=1/\sum(N_i/N)^2$, где N – общая численность особей (экз/кв.м), N_i – численность особей i -го таксона (экз/кв.м)

Во всех изученных почвах абсолютно преобладали представители бактерий (рис. 22), вклад которых в почвах следующих стадий снижался за счет увеличения доли архей. Особенно стоит отметить, что максимальная доля архей обнаружена в пробах с площадки S62 (по всем трем опробованным глубинам), где почвы морфологически отличались наиболее восстановившимся горизонтом E, а возраст сосен был максимален. Обилие большинства отделов выявленных бактерий выше на ранних стадиях сукцессии, чем на поздних по всем исследованным глубинам. Понижено только относительное обилие представителей Dependitiae, GAL15, RCP2-54, Verrucomicrobiota и WPS-2. В почвах всех обследованных разрезов с глубиной уменьшалось обилие представителей Abditibacteriota, Armatimonadota, Bacteroidota, Cyanobacteria, Planctomycetota, Verrucomicrobiota и увеличивалось – Desulfobacterota (исчезают на стадии S6), Elusimicrobiota (в большинстве случаев), Entotheonellaeota (обнаружены только в породе). На уровне родов во всех изученных почвах преобладают представители Proteobacteria, Actinobacteriota, Acidobacteriota, Planctomycetota. Альфа-разнообразие почвенного микробиома увеличивается от ранних стадий сукцессии к более продвинутому. Построен и рассчитан прототип статистической модели для анализа совместного распределения измеренных показателей. Сформулирован ряд критических замечаний к прототипу исследования с целью дальнейшего совершенствования разработанной модели.

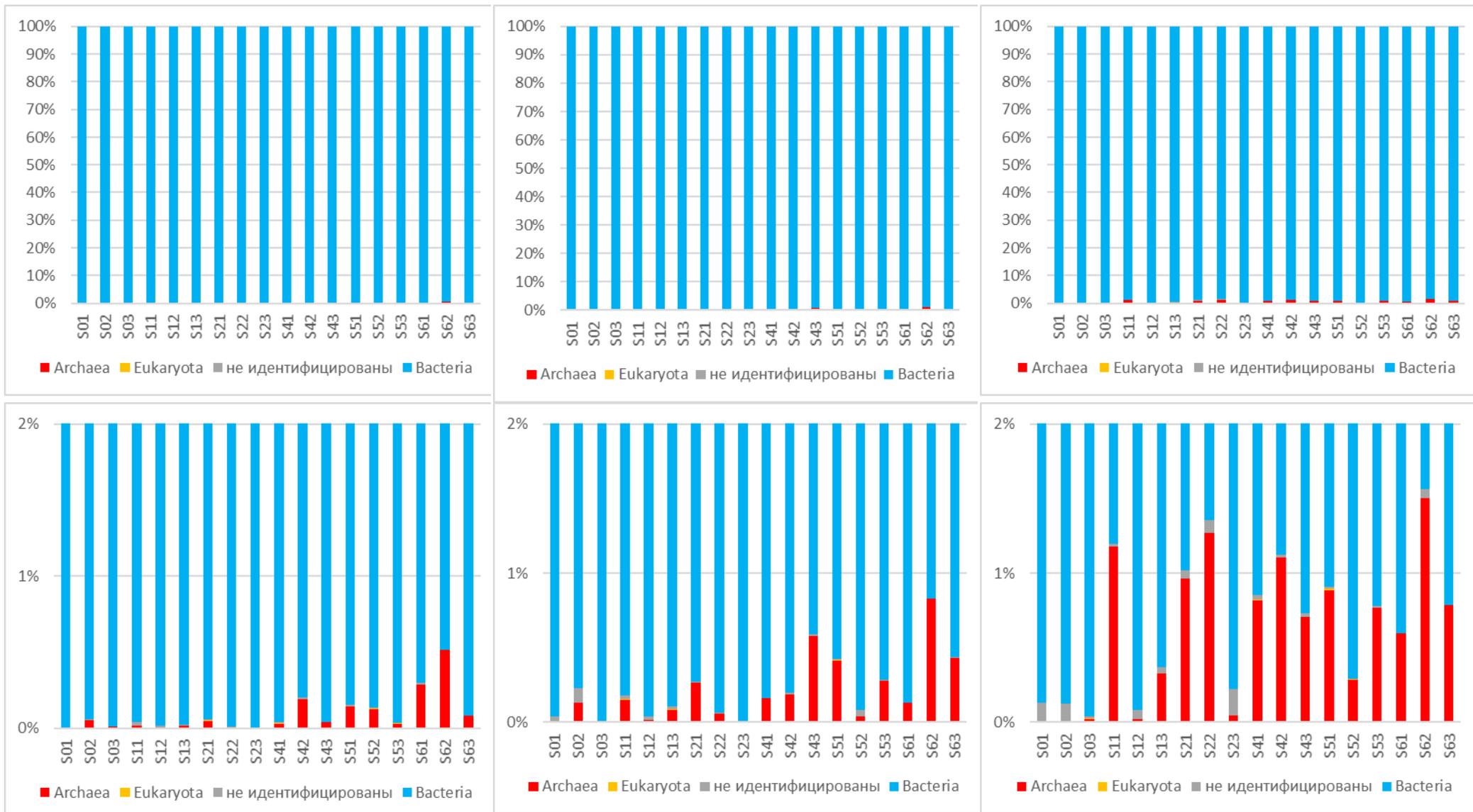


Рис. 22 – Состав на уровне царств микробного сообщества почв (слева – верхний слой горизонта А, в середине – нижний слой горизонта А, справа – почвообразующая порода; нижний ряд – увеличение на уровне 2%): S0 – агроценоз и однолетняя залежь, S1 – залежный луг на месте пашни, S2 – молодой лес (возрастом 10 - 30 лет) на месте пашни, S4 – средневозрастный лес (возрастом 70 - 80 лет) на месте пашни, S5 – старовозрастный лес (возрастом 80 - 100 лет) на месте пашни, S6 – старовозрастный лес (возрастом 90 - 100 и больше лет) на не пахавшихся почвах или почвах, восстановившихся после распашки