

## ВВЕДЕНИЕ

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) является одной из основных древесных пород, применяемых при лесной рекультивации техногенных ландшафтов как в России, так и за рубежом. Вид обладает широкой экологической амплитудой в отношении влажности и плодородия почвы (мезоксерофит, олиготроф), характеризуется высокой морозостойкостью и жаростойкостью, чувствителен к промышленному загрязнению. Как вид-пионер, требовательный к свету, может колонизировать нарушенные участки. Оценка устойчивости древесных растений на техногенно нарушенных территориях необходима для повышения эффективности работ по лесовосстановлению.

**Цель работы** - выявление морфофизиологических особенностей *Pinus sylvestris* L., произрастающей в искусственных насаждениях на дражном отвале после золотодобычи (месторождение Увальное, Средний Урал), и оценка влияния свойств субстрата на анатомо-морфологические и физиологические параметры.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ



Рисунок 1 - Рядовые посадки *P. sylvestris* на дражном отвале месторождения россыпного золота Увальное

Для анатомо-морфологического анализа с середины кроны каждого модельного дерева отбирали полностью сформированную хвою второго года жизни без видимых признаков повреждений. Образцы фиксировали в 70 %-м растворе этилового спирта. Длину хвои измеряли в парах: по 100 хвоинок в каждом местообитании. Поперечные срезы хвои готовили на замораживающем микротоме МЗ-2 (Россия). Измерения анатомо-морфологических признаков проводили с помощью микроскопа Olympus CX-41 с программным обеспечением, с увеличением окуляра и объектива 10x и 40x.

В ходе исследования определяли следующие анатомические показатели хвои *P. sylvestris* (рис. 2).

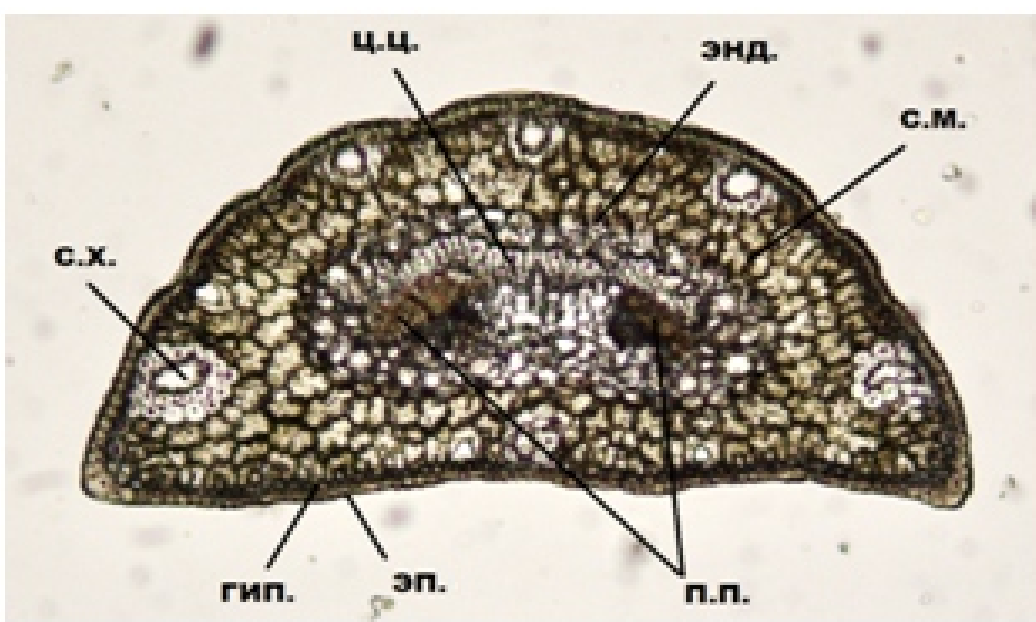


Рисунок 2 - Поперечный срез хвои *P. sylvestris*

1. Высота поперечного среза хвои, мм;
2. Ширина поперечного среза хвои, мм;
3. Высота центрального цилиндра, мм;
4. Ширина центрального цилиндра, мм;
5. Высота гиподермы, мкм;
6. Высота эпидермы, мкм;
7. Высота проводящих пучков, мм;
8. Ширина проводящих пучков, мм;
9. Число смоляных ходов, шт;
10. Диаметр смоляных ходов, мкм.

Содержание общего азота в хвое определяли спектрофотометрическим методом с использованием реактива Несслера, после мокрого озоления смесью концентрированных  $H_2SO_4$  и  $HClO_4$ . Содержание фотосинтетических пигментов в хвое измеряли спектрофотометрически и рассчитывали по Lichtenthaler.

Образцы грунта для исследований отбирали на каждой ОП и в контроле с глубины 0-20 см. Основные физико-химические характеристики субстрата и почв устанавливали общепринятыми в почвоведении методами. Общий органический углерод определяли по методу Тюрина; рН анализировали потенциометрически. Обменный Са и Mg устанавливали титрованием. Удельную электропроводность и общее содержание солей измеряли в водной суспензии субстрат:вода (1:2,5; вес/объем) с помощью портативного анализатора.

Статистическая обработка полученных данных выполнена с помощью стандартного пакета программ Microsoft Excel и StatSoft STATISTICA 12. Статистически значимые различия были выявлены с использованием непараметрического критерия Манна-Уитни (при  $p < 0,05$ ). Проведены однофакторной дисперсионный и дискриминантный анализы, а также корреляционный анализ с использованием коэффициента ранговой корреляции Спирмена. На рисунках и в таблице 2 представлены средние значения и их стандартные ошибки.

Разные буквы указывают на достоверные различия по изученным параметрам между исследуемыми площадками при уровне значимости  $p < 0,05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Агрохимический анализ** показал, что на всех ОП субстрат являлся слабкокислым, характеризовался низким содержанием общего органического углерода и слабой минерализацией. Содержание Са и Mg в субстрате отвала было меньше, чем в контроле (табл. 1). По гранулометрическому составу субстраты ОП варьировали от легких суглинков до легкой глины. Среднее значение электропроводности субстратов со всех ОП отвала составляло 0,045 мСм/см. По показателю удельной электропроводности и общему содержанию солей субстраты с анализируемых ОП можно отнести к слабозасоленным.

Таблица 1 - Агрохимические показатели субстратов

№ ОП	рН <sub>H2O</sub>	Содержание, мг-экв/100 г субстрата		Общий органический углерод, %	Общее содержание солей, мг/л	Гигровлага, %
		Са	Mg			
1	6,85	6,00	1,75	0,09	12,67	2,30
2	6,67	4,50	1,25	0,11	11,67	1,49
3	6,50	9,50	1,75	0,23	14,33	3,75
4	6,63	7,30	2,25	0,39	13,00	3,33
5	6,73	11,00	2,50	1,05	63,33	3,41
КП	6,32	21,8	2,8	2,33	88,90	11,35

**Анализ морфологических параметров** *P. sylvestris*, растущей в условиях дражного отвала, показал, что средняя высота 20-летних деревьев варьировала от 1,2±0,12 м (ОП1) до 4,2±0,10 м (ОП4). На дамбе (ОП5) высота культур достигала 7,3±0,59 м и не отличалась от контроля (рис. 3). На отвале на всех ОП *P. sylvestris* относится к Va классу бонитета. Средний диаметр ствола деревьев на ОП1-ОП4 составлял 1,50±0,22; 1,50±0,22; 5,0±0,34; 6,25±0,36; на ОП5 - 11,83±1,11, что было достоверно меньше, чем в КП (13,87±0,51).

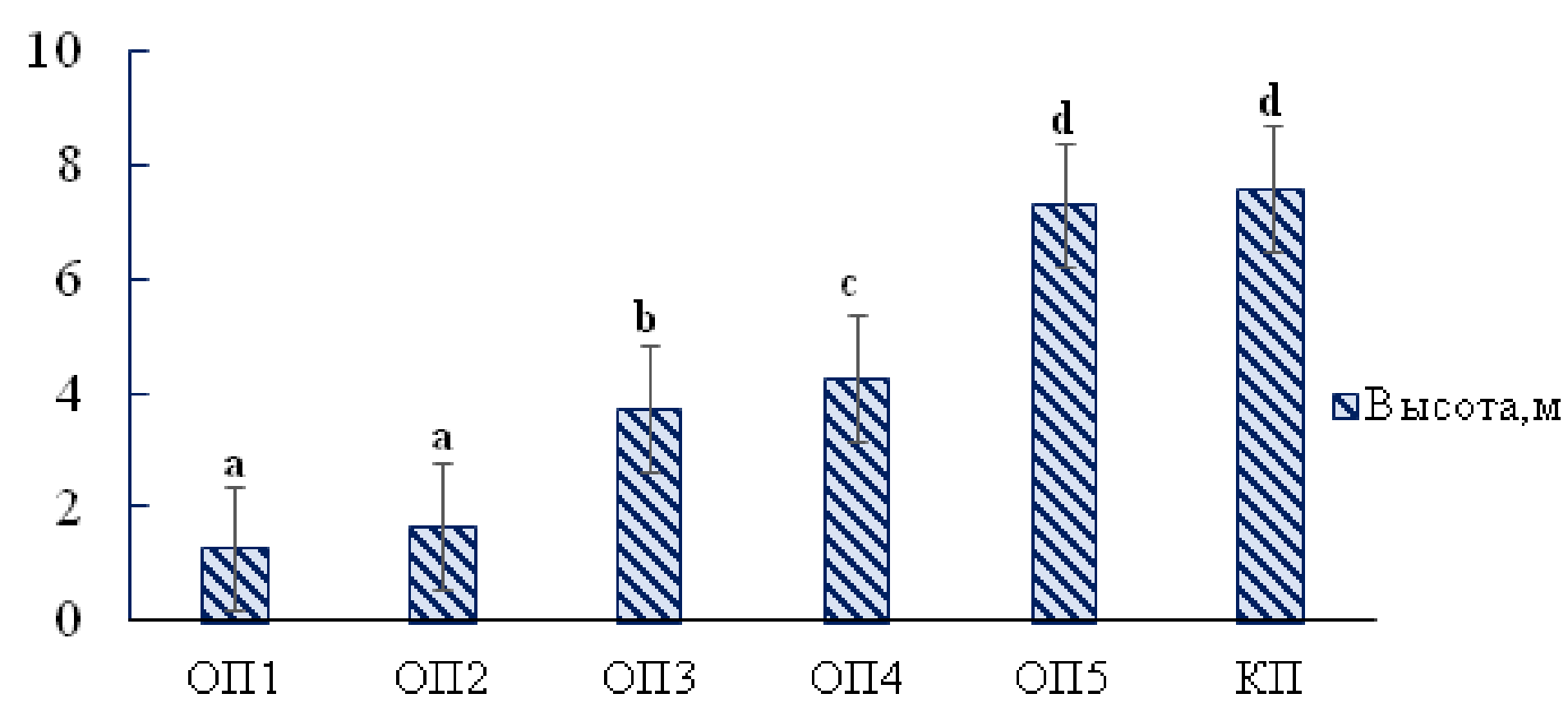


Рисунок 3 - Показатели высоты *P. sylvestris* на отвале Увального месторождения россыпного золота

В условиях дражного отвала достоверно ( $p < 0,05$ ) уменьшались средние показатели прироста ствола и длины хвои по сравнению с контрольным местообитанием (рис. 4).



Лукина Н.В. Глазырина М.А. Чукина Н.В. Филимонова Е.И. Учаев А.П. Борисова Г.Г.

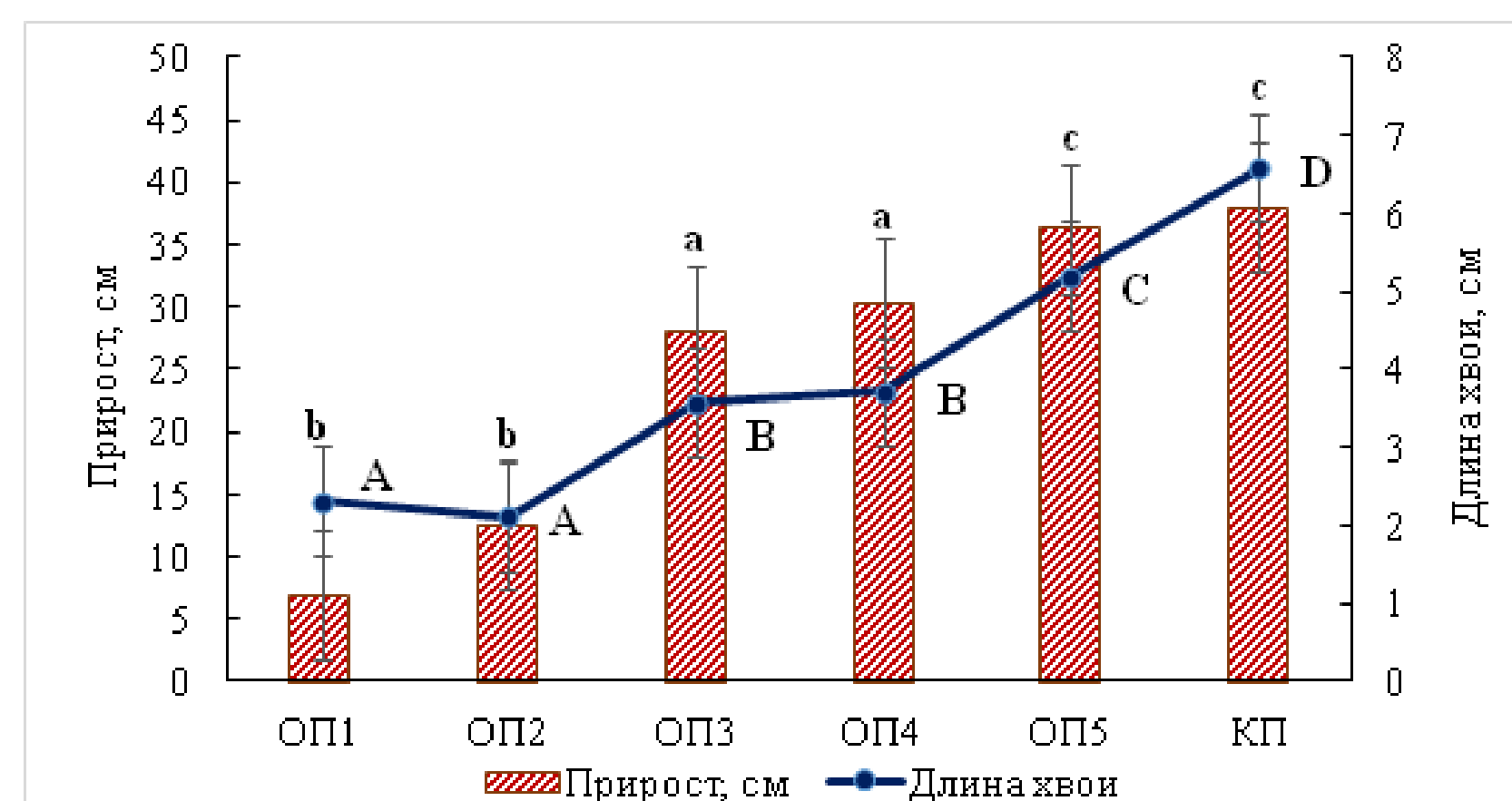


Рисунок 4 - Показатели годичного прироста и длины хвои *P. sylvestris* на отвале Увального месторождения россыпного золота

**Анализ анатомических особенностей хвои** *P. sylvestris*, произрастающей на всех ОП, выявил достоверное ( $p < 0,05$ ) уменьшение площади поперечного сечения хвои и площади центрального цилиндра по сравнению с КП. Также на всех ОП в хвое сосны отмечено уменьшение числа смоляных ходов при увеличении их диаметра (табл. 2).

Таблица 2 - Анатомические характеристики хвои *P. sylvestris* в посадках на отвале Увального месторождения россыпного золота

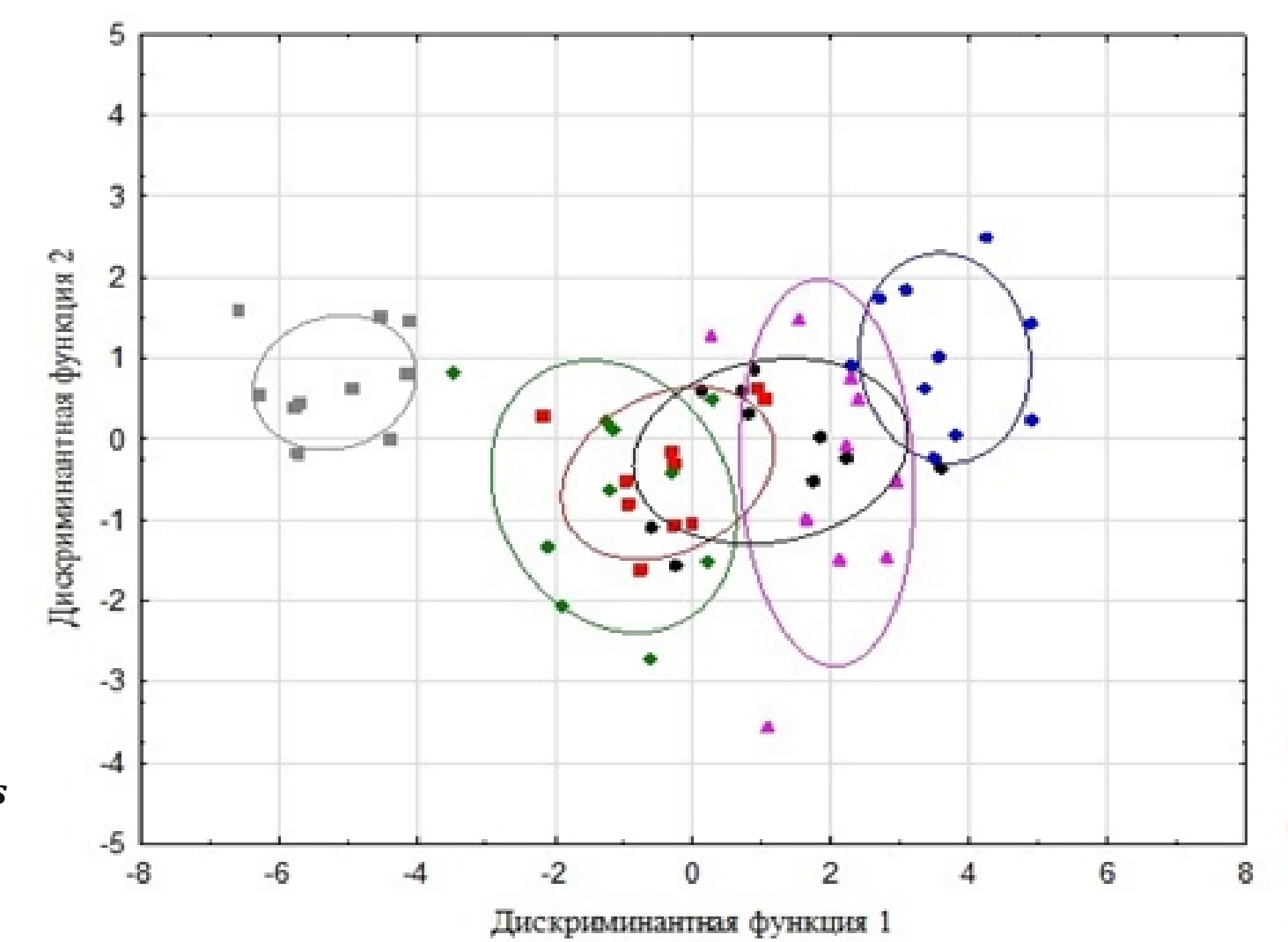
Характеристики хвои	ОП1	ОП2	ОП3	ОП4	ОП5	КП
Площадь среза, мм <sup>2</sup>	0,56±0,01c	0,70±0,02a	0,70±0,02a	0,76±0,01ab	0,85±0,02b	1,06±0,02d
Площадь центрального цилиндра, мм <sup>2</sup>	0,24±0,01c	0,29±0,01ac	0,31±0,01ab	0,33±0,01ab	0,36±0,02b	0,54±0,01d
Толщина гиподермы, мкм	13,00±0,33a	13,20±1,14a	13,50±0,40a	12,50±0,37a	11,75±0,38a	11,25±0,41a
Толщина эпидермы, мкм	12,00±0,50ab	19,55±0,77b	17,75±0,62ab	16,55±0,64ab	17,75±0,62ab	15,45±0,85a
Число смоляных ходов, шт.	5,00±0,39b	6,00±0,15bc	8,00±0,26ac	8,00±0,34a	8,00±0,70a	10,00±0,27d
Диаметр смоляных ходов, мкм	59,20±3,41a	62,30±2,96a	59,00±2,31a	56,20±1,59a	58,70±2,09a	54,40±1,63a
Площадь мезодермы, мм <sup>2</sup>	0,26±0,00b	0,33±0,01a	0,32±0,01ab	0,36±0,01ac	0,41±0,01cd	0,44±0,01d

Исследования показали, что в хвое *P. sylvestris* с ОП площадь мезодермы была в 1,2-1,7 раза меньше по сравнению с КП.

В условиях отвала также отмечено изменение смоловыделяющей системы хвои *P. sylvestris*: количество смоляных ходов уменьшалось по сравнению с контролем, но, как правило, увеличивался их средний диаметр (табл. 2). Толщина эпидермы и гиподермы хвои *P. sylvestris*, произрастающей на отвале, существенно не отличалась от контроля. Полученные нами данные согласуются с результатами аналогичных исследований других авторов, отмечающих увеличение площади мезодермы и центрального цилиндра, числа смоляных ходов и длины хвои у *P. sylvestris* в техногенных условиях.

**Дискриминантный анализ**, проведенный с использованием таких признаков, как площадь среза, площадь центрального цилиндра, число смоляных ходов и их диаметр, площадь мезодермы, отделил контрольный участок от опытных участков по дискриминантной функции 1 (рис. 5). Достоверность, с которой параметры относятся к этим группам: ОП1 - 90 %, ОП2 - 70 %, ОП3 - 60 %, ОП4 - 50 %, ОП5 - 50 %, контроля - 100 %.

Рисунок 5 - Дискриминантный анализ *P. sylvestris* по анатомическим признакам на отвале Увального месторождения россыпного золота ( $F(25,188) = 9,14$ ; ( $p < 0,00$ ))



Содержание общего азота в хвое *P. sylvestris* на всех ОП отвала варьировало от 1,08 мг/г до 1,98 мг/г сухого веса. По сравнению с контролем оно было достоверно ниже (в среднем в 1,4 раза). При этом наблюдалась высокая положительная корреляция между накоплением азота в хвое и содержанием в субстрате кальция ( $r = 0,94$ ), а также показателем гигровлаги ( $r = 0,83$ ).

В условиях отвала наблюдалось достоверное (в среднем на 30 %) уменьшение содержания зеленых пигментов в хвое по сравнению с контролем (рис. 6). При этом содержание хлорофиллов в хвое *P. sylvestris*, произрастающей на ОП5, где отмечено более высокое содержание гигровлаги, кальция, магния и общего органического углерода, достоверно не отличалось от контроля.

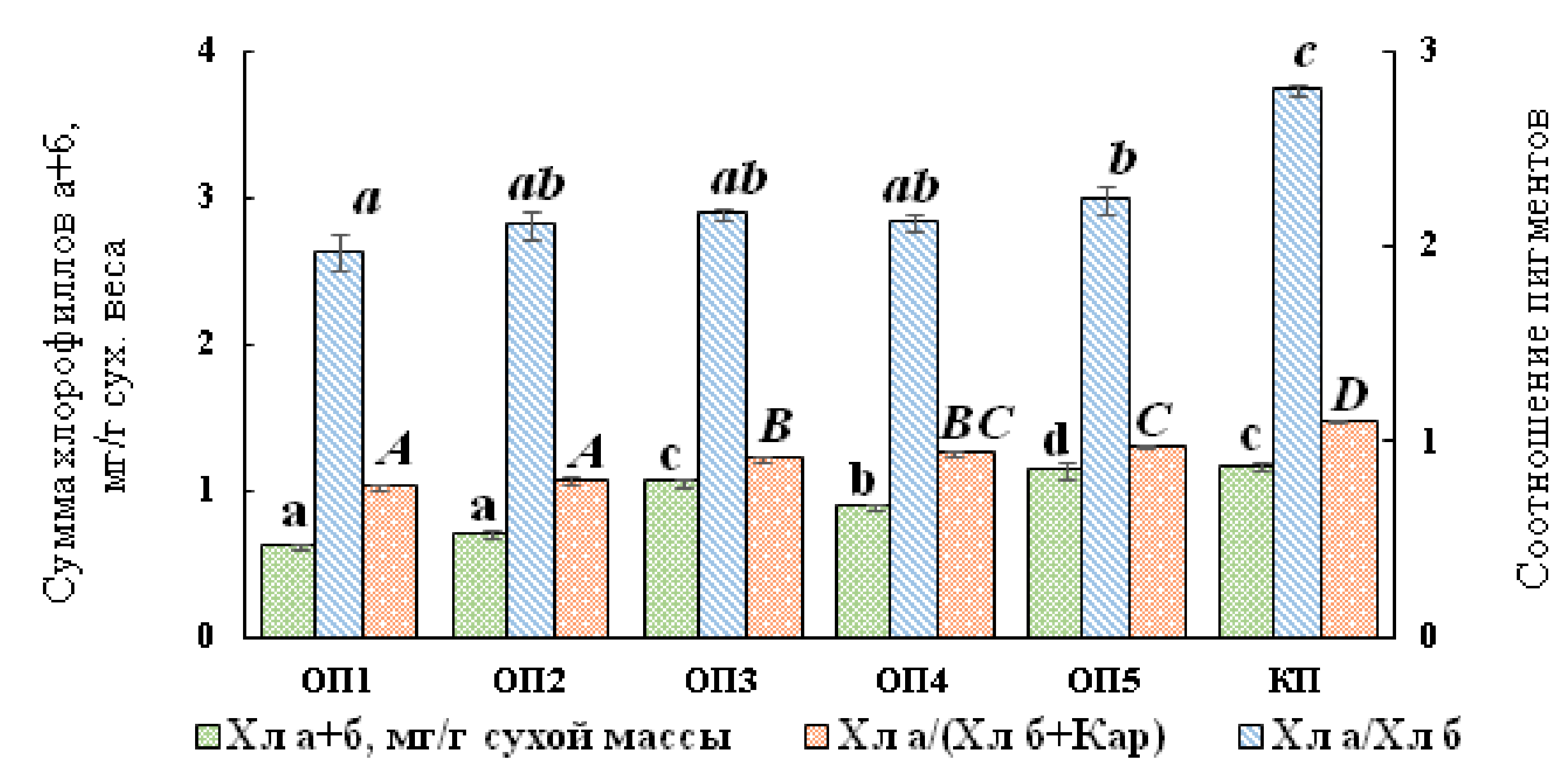


Рисунок 6 - Содержание хлорофиллов и соотношение пигментов в хвое *P. sylvestris* на дражном отвале Увального месторождения россыпного золота

**Корреляционный анализ** продемонстрировал достоверно значимую связь между изученными морфологическими показателями *P. sylvestris* (диаметром и приростом ствола, длиной хвои) и агрохимическим составом субстратов, а именно: содержанием Са ( $r = 0,80$ ), Mg ( $r = 0,80$ ) и С ( $r = 0,90$ ).

На основе корреляционного анализа также была выявлена достоверно значимая связь между анатомическими показателями хвои *P. sylvestris* и агрохимическим составом субстратов: показано влияние содержания углерода и гигровлаги на площадь центрального цилиндра ( $r = 0,96$ ;  $r = 0,90$  соответственно) и число смоляных ходов ( $r = 0,86$ ;  $r = 0,90$  соответственно). На диаметр смоляных ходов достоверно значимое влияние также оказывали величина рН почвенной вытяжки ( $r = 0,88$ ) и содержание Mg ( $r = -0,92$ ).

Отмечена также высокая положительная корреляция между содержанием в хвое зеленых пигментов и содержанием в субстрате Са, Mg и органического углерода, а также показателем гигровлаги и общей минерализацией. При этом обнаружена достоверная отрицательная корреляция с величиной рН ( $r = -0,66$ ).

## ВЫВОДЫ

Оценка состояния 20-летних посадок *P. sylvestris* на дражном отвале месторождения россыпного золота Увальное показала, что у *P. sylvestris* происходило уменьшение величин таких морфологических параметров, как высота деревьев, ежегодный прирост, диаметр ствола, длина хвои. Формирующийся на отвале древостой *P. sylvestris* относится к Va классу бонитета.

Из анатомических признаков важно отметить уменьшение числа смоляных ходов в хвое при увеличении их диаметра, уменьшение диаметра центрального цилиндра и площади мезодермы. Снижение анатомо-морфологических показателей у *P. sylvestris* можно рассматривать как процесс адаптации, направленный на сохранение влаги и повышение устойчивости деревьев к неблагоприятным условиям.

В условиях отвала наблюдалось достоверное уменьшение содержания общего азота и зеленых пигментов в хвое *P. sylvestris* по сравнению с контрольным местообитанием.

На морфологические параметры *P. sylvestris*, произрастающей в условиях дражного отвала после золотодобычи, достоверно значимое влияние оказывали содержание гигровлаги, Са, Mg и рН.

Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при оценке состояния древесных растений и в качестве информативного параметра при биомониторинге окружающей среды, а также учитываться при проведении биологической рекультивации.