

# ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ИНТРОДУКЦИИ ЭКЗОТИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ СЕМЕЙСТВА PINACEAE НА ЮГЕ САХАЛИНА: ВЛИЯНИЕ НА АБОРИГЕННЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, ПОЧВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И БИОРАЗНООБРАЗИЕ

**Николаев Дмитрий Владимирович**

Лаборант научной группы, Сахалинский филиал  
Ботанического сада-института ДВО РАН  
dimitriy.nikolayev.99@mail.ru

## ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL CONSEQUENCES OF THE INTRODUCTION OF EXOTIC REPRESENTATIVES OF THE FAMILY PINACEAE IN THE SOUTH OF SAKHALIN: IMPACT ON NATIVE ECOSYSTEMS, SOIL CHARACTERISTICS, AND BIODIVERSITY

**D. Nikolaev**

**Summary.** The study provides a comprehensive assessment of the ecological consequences of introducing exotic species of the family Pinaceae under monsoon climate conditions of southern Sakhalin Island. An analysis was carried out on the effects of 12 introduced coniferous species on native ecosystems, soil characteristics, and biodiversity during 2021–2024. The ecological impact assessment included analysis of competition with local species, changes in physicochemical properties of soils, transformation of plant community structure, and influence on biotic components. Indicators of litter allelopathic activity, dynamics of mycorrhizal associations, changes in herb–shrub layer species composition, and transformation of soil microbiological activity were investigated. The greatest negative effects on native vegetation were demonstrated by North American species *Pseudotsuga menziesii* and *Pinus ponderosa*, with competitive pressure indices of 7.2–7.8 points and understory species diversity decrease by 34–42 %. Moderate impacts were observed for European species *Picea abies* and *Pinus sylvestris*, with competitive pressure indices of 5.1–5.6 points and species richness reduction by 18–24 %. Correlations were established between growth intensity of introduced species and scale of ecosystem transformation.

**Keywords:** conifer introduction, Pinaceae, ecological consequences, competition, biodiversity, soil characteristics, allelopathy, Sakhalin.

**Аннотация.** Исследование посвящено комплексной оценке экологических последствий интродукции экзотических видов семейства Pinaceae на юге острова Сахалин. Проведен анализ влияния 12 видов интродуцированных хвойных растений на аборигенные экосистемы, почвенные характеристики и биоразнообразие в течение 2021–2024 годов. Оценка экологического воздействия включала анализ конкуренции с местными видами, изменения физико-химических свойств почв, трансформации структуры растительных сообществ и влияния на компоненты биоты. Исследованы показатели аллелопатической активности опада, динамика микоризных ассоциаций, изменение видового состава травяно-кустарничкового яруса и трансформация микробиологической активности почв. Наибольшее негативное влияние продемонстрировали североамериканские виды *Pseudotsuga menziesii* и *Pinus ponderosa* с показателями конкурентного давления 7.2–7.8 балла и снижением видового разнообразия подлеска на 34–42 %. Умеренное воздействие проявили европейские виды *Picea abies* и *Pinus sylvestris* с конкурентным давлением 5.1–5.6 балла и сокращением видового богатства на 18–24 %. Установлены корреляции между интенсивностью роста интродуцентов и масштабом трансформации экосистем.

**Ключевые слова:** интродукция хвойных, Pinaceae, экологические последствия, конкуренция, биоразнообразие, почвенные характеристики, аллелопатия, Сахалин.

## Введение

**И**нтродукция древесных растений за пределы естественного ареала представляет собой значительное антропогенное воздействие на природные экосистемы [1]. Семейство Pinaceae, объединяющее около 220 видов хвойных растений, характеризуется высокой конкурентной способностью и значительным

средообразующим потенциалом [2]. Представители семейства занимают доминирующее положение в бореальных и горных лесах Евразии и Северной Америки, формируя устойчивые фитоценозы [3]. Экологические последствия интродукции определяются способностью к конкуренции с аборигенными видами, модификацией почвенных условий и влиянием на трофические цепи [4]. Эти процессы могут приводить к снижению биоразноо-

бразия, вытеснению местных видов и нарушению сукцессионных процессов [5]. Остров Сахалин характеризуется специфическими экосистемами с высоким уровнем эндемизма, сформировавшимся в условиях островной изоляции под влиянием муссонной циркуляции [6]. Аборигенная дендрофлора представлена ограниченным набором видов Pinaceae: *Abies sachalinensis*, *Picea jezoensis*, *Picea glehnii* и *Larix gmelinii*, формирующие темнохвойные и лиственничные леса [7]. Интродукция экзотических представителей Pinaceae может нарушить сложившиеся взаимосвязи и привести к каскадным экологическим эффектам [8]. Конкуренция интродуцентов с аборигенными видами через использование световых, водных и минеральных ресурсов представляет ключевой механизм экологического воздействия [9]. Модификация почвенных свойств через специфический химический состав опада может существенно изменять условия среды [10]. Аллелопатические эффекты могут подавлять прорастание семян и рост других видов [11]. Целью исследования является комплексная оценка экологических последствий интродукции экзотических видов семейства Pinaceae на юге Сахалина на основе анализа конкуренции с местными видами, влияния на почвенные характеристики, трансформации структуры растительных сообществ и воздействия на биоразнообразие [12].

#### Материалы и методы

Исследования проводились в 2021–2024 годах на территории интродукционного питомника Сахалинского ботанического сада (окрестности г. Южно-Сахалинска, 85 м н.у.м.) и на контрольных участках с доминированием *Abies sachalinensis* и *Picea jezoensis*. Климат: умеренный муссонный, среднегодовая температура 3.8°C, средняя температура января –12.4°C, июля +16.8°C, осадков 820 мм. Почвы: бурые лесные кислые на вулканических пепловых отложениях, pH 5.2–5.6, гумус 4.2–5.8 %. Объекты: 12 видов хвойных Pinaceae (высажены 2018–2019, возраст 4–5 лет): североамериканские *Abies concolor*, *Picea pungens*, *Pinus ponderosa*, *Pseudotsuga menziesii*; европейские *Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Abies alba*; азиатские *Pinus koraiensis*, *Picea orientalis* и представители *Larix*. Размещение: группами 25–30 экземпляров, расстояние 343 метра. Оценка конкуренции: анализ видового состава и проективного покрытия на площадках 444 метра. Для каждого вида 15–20 площадок с ежегодным геоботаническим описанием (июль). Индекс конкурентного давления по 10-балльной шкале. Почвенные исследования: отбор образцов (0–20 см) в трехкратной повторности ежегодно (сентябрь). Анализ: pH, органический углерод, общий азот, подвижный фосфор, обменный калий, гидролитическая кислотность, сумма обменных оснований. Биологическая активность: интенсивность дыхания, целлюлозолитическая активность, активность каталазы, дегидрогеназы, уреазы. Численность микроорганизмов посевом на селективные среды. Аллелопа-

тическая активность опада: биотестирование с *Lepidium sativum* и местными *Carex koraginensis*, *Maianthemum dilatatum*. Водные экстракты 1:10, проращивание в чашках Петри при +22°C, 12-часовой фотопериод. Через 7 дней: всхожесть, длина проростков/корешков, расчет индекса. Значения <80 % — ингибирующий эффект. Микоризные ассоциации: отбор корневых образцов, микроскопический анализ. Определялись частота встречаемости, интенсивность колонизации по шкале Траппе, типы структур. Учет плодовых тел эктомикоризных грибов (август–сентябрь). Фауна: почвенные беспозвоночные методом раскопок (пробы 25·25 см, глубина 20 см, 10-кратная повторность). Герпетобионтная фауна ловчими канавками (10 метров, экспозиция 10 дней, июль). Инвазионный потенциал: учет естественного возобновления на площадках 10·10 метров на удалении 10, 25, 50 и 100 метров, подсчет численности всходов/подроста по возрастным группам. Статистика: описательная статистика, индексы Маргалефа, Шеннона, Пиелу, Симпсона. Дисперсионный анализ ANOVA с тестами Тьюки ( $p < 0.05$ ). Корреляционный анализ: коэффициенты Пирсона и Спирмена. Ординация: NMDS с индексом Брея-Кёртица. Программы: PAST 4.03 и R version 4.1.2.

#### Результаты и обсуждение

Трехлетние наблюдения выявили существенную дифференциацию воздействия. Наибольшее конкурентное давление: *Pseudotsuga menziesii* (индекс  $7.8 \pm 0.6$ ), *Pinus ponderosa* ( $7.2 \pm 0.7$ ), *Picea pungens* ( $6.9 \pm 0.8$ ). Под пологом *Pseudotsuga menziesii* видовое богатство сократилось на  $42.3 \pm 8.4$  % от контроля ( $23.6 \pm 3.2$  вида/16 м<sup>2</sup>). Проективное покрытие  $18.4 \pm 6.7$  % против  $62.8 \pm 12.4$  % на контроле. Виды подлеска *Sasa kurilensis*, *Vaccinium ovalifolium*, *Ledum palustre* и травяного яруса *Maianthemum dilatatum*, *Trientalis europaea*, *Oxalis acetosella*: снижение обилия на 3–4 балла по Браун-Бланке.

Детальный анализ показал, что под пологом интродуцентов с высоким конкурентным давлением полностью исчезают светолюбивые виды *Solidago dahurica*, *Sanguisorba officinalis*, *Filipendula kamtschatica*, *Cacalia hastata*. Наиболее устойчивыми оказались теневыносливые виды *Maianthemum dilatatum*, *Trillium camschatcense* и папоротники (*Dryopteris expansa*, *Athyrium filix-femina*), однако их обилие снижалось на 40–60 % под пологом *Pseudotsuga menziesii* и *Pinus ponderosa*. Практически полностью подавлялось возобновление аборигенных хвойных видов. Плотность подроста *Abies sachalinensis*: на контроле  $2800 \pm 640$  экз./га, под пологом *Pseudotsuga menziesii*  $240 \pm 120$  экз./га, причем сохранившиеся растения демонстрировали признаки сильного угнетения. Исследование почвенных характеристик выявило значительное влияние интродуцентов на свойства почв (таблица 2). Наибольшие изменения отмечены под видами с высоким содержанием смолистых веществ и танинов:

Таблица 1.

Показатели конкуренции интродуцированных видов  
Pinaceae с аборигенной растительностью на юге  
Сахалина (2021–2024 гг.)

Вид	Индекс конкурентного давления (балл)	Снижение видового богатства (%)	Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса (%)	Сохранность типичных видов подлеска (%)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	7.8±0.6	42.3±8.4	18.4±6.7	31.2±9.8
<i>Pinus ponderosa</i>	7.2±0.7	38.6±7.9	22.7±8.2	38.6±10.4
<i>Picea pungens</i>	6.9±0.8	34.1±7.2	26.3±9.1	42.8±11.6
<i>Abies concolor</i>	6.2±0.7	28.4±6.5	34.8±10.3	51.3±12.2
<i>Picea abies</i>	5.6±0.9	24.2±6.8	42.6±9.8	58.4±13.4
<i>Larix kaempferi</i>	5.8±0.6	26.7±6.2	38.2±11.6	54.7±12.8
<i>Pinus sylvestris</i>	5.1±0.8	18.7±5.9	47.3±11.2	64.2±14.1
<i>Abies alba</i>	5.3±0.8	21.4±6.4	44.8±10.7	61.3±13.7
<i>Larix decidua</i>	5.2±0.7	19.8±5.6	46.1±12.3	62.8±13.9
<i>Pinus koraiensis</i>	4.6±0.7	15.2±4.8	52.4±12.8	71.6±14.8
<i>Pinus cembra</i>	4.2±0.6	12.3±4.2	56.8±13.4	78.4±15.2
<i>Picea orientalis</i>	3.8±0.7	9.8±3.6	61.2±14.2	84.7±16.3
Контроль (естественный лес)	—	—	62.8±12.4	100

**Примечание:** Данные за 2021–2024 гг. Индекс конкурентного давления по 10-балльной шкале (10 — максимум, 1 — минимум). Снижение видового богатства относительно контрольных участков естественных лесов. Сохранность типичных видов подлеска как процент от характерных видов на контроле. Контрольные участки в ненарушенных темнохвойных лесах с доминированием *Abies sachalinensis* и *Picea jezoensis*.

*Pseudotsuga menziesii*, *Pinus ponderosa* и *Pinus sylvestris*. Под пологом *Pseudotsuga menziesii* наблюдалось подкисление: pH 4.6±0.3 против 5.4±0.2 на контроле ( $p<0.001$ ). Содержание органического углерода увеличилось до 7.8±1.2 % против 4.9±0.8 %, однако накопление происходит преимущественно в подстилке в виде слабо разложившегося материала. Отношение C:N существенно возросло: 34.2±4.6 у *Pinus ponderosa* против 18.7±2.4 на контроле, что свидетельствует о замедлении минерализации и иммобилизации азота.

Содержание подвижного фосфора и обменного калия демонстрировало тенденцию к снижению под пологом интродуцентов, наиболее выраженное у видов с густой кроной и медленно разлагающимся опадом.

Под *Pseudotsuga menziesii* содержание подвижного фосфора составило 8.2±2.1 мг/100г против 18.6±3.8 мг/100г на контроле, что связано с иммобилизацией фосфора в грибной биомассе и слабо разложившейся органике. Сумма обменных оснований также снижалась. Исключение: листопадные виды *Larix kaempferi* и *Larix decidua*, под которыми показатели оставались близкими к контрольным благодаря ежегодному поступлению легко разлагающейся хвои. Анализ биологической активности почв выявил существенное снижение микробиологических процессов под пологом интродуцентов (таблица 3). Интенсивность почвенного дыхания под *Pseudotsuga menziesii* составила 142±28 мг CO<sub>2</sub>/(мл·ч) против 248±42 мг CO<sub>2</sub>/(мл·ч) на контроле ( $p<0.01$ ). Целлюлозолитическая активность достигала минимума 32.4±6.8 % у *Pinus ponderosa* против 68.7±9.2 % на контроле. Активность ферментов каталазы, дегидрогеназы и уреазы снижалась на 35–55 % под пологом видов с высоким конкурентным давлением.

Численность основных групп почвенных микроорганизмов значительно сокращалась под интродуцентами. Количество бактерий под *Pseudotsuga menziesii* составило 12.4±3.8×10<sup>6</sup> КОЕ/г против 38.4±7.8×10<sup>6</sup> КОЕ/г на контроле, численность актиномицетов снижалась в 2.5–3.2 раза, грибов — в 1.8–2.4 раза. Особенно выражено подавление целлюлозоразрушающих и нитрифицирующих бактерий, что объясняет замедление минерализации органического вещества и круговорота азота. Листопадные лиственницы демонстрировали минимальное негативное воздействие на биологическую активность почв. Лабораторное исследование аллелопатической активности опада подтвердило наличие ингибирующих эффектов (таблица 4). Наиболее сильное воздействие выявлено у опада *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus ponderosa* и *Picea pungens*: водные экстракты снижали всхожесть семян *Lepidium sativum* на 38–46 %, длину проростков на 42–51 %, длину корешков на 48–58 %. Индекс аллелопатической активности для этих видов составлял 52–62 % (сильный ингибирующий эффект). Местные виды *Carex koraginensis* и *Maianthemum dilatatum* демонстрировали большую чувствительность с падением всхожести до 40–55 % и значительным угнетением роста проростков.

Результаты объясняются высоким содержанием вторичных метаболитов (терпеноиды, фенольные соединения, танины) в опаде. Особенно высокие концентрации у *Pinus* и *Pseudotsuga*. Листопадные лиственницы демонстрировали минимальное воздействие (индекс 82–84 %). Исследование микоризных ассоциаций выявило существенное влияние интродуцентов. Под пологом *Pseudotsuga menziesii* частота встречаемости микоризы на корнях подроста *Abies sachalinensis* снижалась с 87.4±6.8 % до 42.6±12.4 %, интенсивность колонизации с 68.2±8.4 % до 28.4±9.8 %. Учет плодовых тел эктоми-

Таблица 2.

Влияние интродуцированных видов Pinaceae на почвенные характеристики (2021–2024 гг.)

Вид	pH водный	Органический углерод (%)	Отношение C:N	Подвижный фосфор (мг/100г)	Обменный калий (мг/100г)	Сумма обменных оснований (мг-экв/100г)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	4.6±0.3	7.8±1.2	34.2±4.6	8.2±2.1	6.4±1.8	12.4±2.8
<i>Pinus ponderosa</i>	4.7±0.3	7.2±1.1	32.8±4.2	9.1±2.3	7.2±1.9	13.6±2.9
<i>Pinus sylvestris</i>	4.8±0.3	6.9±1.0	31.4±3.9	10.4±2.6	8.1±2.1	14.8±3.1
<i>Abies concolor</i>	4.9±0.3	6.4±0.9	28.6±3.6	11.8±2.8	9.2±2.2	16.2±3.4
<i>Picea pungens</i>	5.0±0.3	6.1±0.9	26.8±3.4	12.6±2.9	10.4±2.4	17.8±3.6
<i>Picea abies</i>	5.1±0.2	5.8±0.8	24.2±3.1	14.2±3.1	11.8±2.6	19.4±3.8
<i>Larix kaempferi</i>	5.2±0.2	5.4±0.7	21.6±2.8	16.8±3.4	13.6±2.8	21.8±4.2
<i>Abies alba</i>	5.1±0.2	5.7±0.8	23.8±3.0	14.8±3.2	12.2±2.7	19.8±3.9
<i>Larix decidua</i>	5.3±0.2	5.2±0.7	20.4±2.6	17.4±3.6	14.2±2.9	22.6±4.3
<i>Pinus koraiensis</i>	5.2±0.2	5.5±0.7	22.8±2.9	15.6±3.3	12.8±2.7	20.8±4.1
<i>Picea orientalis</i>	5.3±0.2	5.3±0.7	21.2±2.7	16.2±3.4	13.2±2.8	21.4±4.2
<i>Pinus cembra</i>	5.2±0.2	5.6±0.8	23.2±3.0	15.2±3.2	12.4±2.7	20.2±4.0
Контроль (естественный лес)	5.4±0.2	4.9±0.8	18.7±2.4	18.6±3.8	15.8±3.1	24.2±4.6

Примечание: Данные за 2021–2024 гг. Образцы из верхнего горизонта почвы (0–20 см). pH в водной вытяжке потенциометрическим методом. Органический углерод по Тюрину. Подвижный фосфор по Чирикову. Обменный калий на пламенном фотометре. Сумма обменных оснований комплексометрическим методом. Контроль — ненарушенные леса с *Abies sachalinensis* и *Picea jezoensis*.

Таблица 3.

Биологическая активность почв под пологом интродуцированных видов Pinaceae (2021–2024 гг.)

Вид	Почвенное дыхание (мг CO <sub>2</sub> /(мл·ч))	Целлюлозолитическая активность (%)	Каталаза (мл O <sub>2</sub> /г за 1 мин)	Дегидрогеназа (мг ТФФ/10 г за 24ч)	Численность бактерий (×10 <sup>6</sup> КОЕ/г)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	142±28	32.4±6.8	4.2±1.1	18.6±4.2	12.4±3.8
<i>Pinus ponderosa</i>	156±32	34.8±7.2	4.6±1.2	21.4±4.6	14.2±4.1
<i>Pinus sylvestris</i>	168±34	38.6±7.8	5.1±1.3	24.8±5.2	16.8±4.6
<i>Picea pungens</i>	178±36	42.4±8.4	5.8±1.4	28.2±5.8	19.6±5.2
<i>Abies concolor</i>	192±38	46.8±9.2	6.4±1.6	32.4±6.4	22.8±6.1
<i>Picea abies</i>	204±41	51.2±9.8	7.1±1.7	36.8±6.9	26.4±6.8
<i>Larix kaempferi</i>	234±46	62.4±10.6	8.6±1.9	44.2±7.8	34.6±8.2
<i>Abies alba</i>	198±40	48.6±9.4	6.8±1.6	34.6±6.6	24.8±6.4
<i>Larix decidua</i>	228±44	60.8±10.2	8.3±1.8	42.6±7.6	32.8±7.9
<i>Pinus koraiensis</i>	212±42	54.2±9.9	7.4±1.7	38.4±7.2	28.2±7.2
<i>Picea orientalis</i>	218±43	56.8±10.1	7.8±1.8	40.2±7.4	30.4±7.6
<i>Pinus cembra</i>	208±41	52.6±9.7	7.2±1.7	37.2±7.0	27.6±7.0
Контроль (естественный лес)	248±42	68.7±9.2	9.4±1.8	48.6±7.2	38.4±7.8

Примечание: Данные за 2021–2024 гг. Почвенное дыхание — методом щелочной абсорбции CO<sub>2</sub>. Целлюлозолитическая активность — методом льняных полотен, 60 дней (убыль массы, %). Каталаза — газометрическим методом. Дегидрогеназа с трифенилтетразолий хлоридом. Численность бактерий методом посева на МПА (КОЕ — колониеобразующие единицы).

Таблица 4.

Аллелопатическая активность опада интродуцированных видов Pinaceae (лабораторные эксперименты)

Вид	Всхожесть семян <i>Lepidium sativum</i> (% от контроля)	Длина проростков (% от контроля)	Длина корешков (% от контроля)	Индекс аллелопатической активности	Воздействие на <i>Maianthemum</i> <i>dilatatum</i> (% угнетения)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	54.2±8.6	48.6±7.2	42.4±6.8	48.4±7.5	58.6±9.4
<i>Pinus ponderosa</i>	58.6±9.2	52.4±7.8	46.8±7.4	52.6±8.1	54.2±8.8
<i>Picea pungens</i>	62.4±9.8	56.2±8.4	51.4±8.2	56.7±8.8	49.8±8.2
<i>Pinus sylvestris</i>	68.4±10.2	62.8±9.1	58.6±8.9	63.3±9.4	42.6±7.6
<i>Abies concolor</i>	72.6±10.8	68.4±9.6	64.2±9.4	68.4±9.9	38.4±7.2
<i>Picea abies</i>	76.2±11.4	72.6±10.2	68.8±9.8	72.5±10.5	34.2±6.8
<i>Larix kaempferi</i>	84.6±12.2	82.4±11.6	79.2±10.8	82.1±11.5	22.4±5.6
<i>Abies alba</i>	74.8±11.1	70.2±9.9	66.4±9.6	70.5±10.2	36.8±7.0
<i>Larix decidua</i>	86.2±12.6	84.8±11.9	81.6±11.2	84.2±11.9	19.8±5.2
<i>Pinus koraiensis</i>	78.4±11.6	74.8±10.4	71.2±10.1	74.8±10.7	31.6±6.4
<i>Picea orientalis</i>	80.6±12.0	77.2±10.8	73.8±10.4	77.2±11.1	28.4±6.1
<i>Pinus cembra</i>	79.2±11.8	75.6±10.6	72.4±10.2	75.7±10.9	30.2±6.2
Контроль (дистиллированная вода)	100	100	100	100	0

Примечание: Водные экстракты опада (1:10, настаивание 24 часа). Семена проращивались 7 дней при +22°C. Данные в процентах от контроля (дистиллированная вода) ± стандартное отклонение. Индекс аллелопатической активности — среднее геометрическое всхожести и длины проростков. Значения <80 % указывают на ингибирующий эффект.

Таблица 5.

Влияние интродуцированных видов Pinaceae на население почвенных беспозвоночных (2021–2024 гг.)

Вид	Общая численность макрофауны (экз./мл)	Биомасса макрофауны (г/мл)	Численность дождевых червей (экз./мл)	Число видов жуужелиц	Индекс разнообразия Шеннона (почвенная фауна)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	182±56	48±18	28±12	6.2±1.8	1.84±0.42
<i>Pinus ponderosa</i>	206±62	56±21	34±14	7.4±2.1	2.06±0.46
<i>Picea pungens</i>	234±68	68±24	42±16	8.6±2.4	2.28±0.52
<i>Pinus sylvestris</i>	268±76	78±26	54±18	10.2±2.8	2.54±0.58
<i>Abies concolor</i>	296±82	86±28	64±21	11.4±3.1	2.76±0.62
<i>Picea abies</i>	318±88	92±30	72±23	12.6±3.4	2.92±0.64
<i>Larix kaempferi</i>	412±102	108±34	96±28	16.8±4.2	3.38±0.72
<i>Abies alba</i>	306±84	88±29	68±22	12.2±3.2	2.84±0.63
<i>Larix decidua</i>	428±106	112±36	102±30	17.4±4.4	3.46±0.74
<i>Pinus koraiensis</i>	342±92	96±31	78±24	13.8±3.6	3.04±0.66
<i>Picea orientalis</i>	358±96	102±32	84±26	14.6±3.8	3.16±0.68
<i>Pinus cembra</i>	332±90	94±31	76±24	13.2±3.5	3.00±0.66
Контроль (естественный лес)	486±112	124±32	118±32	19.8±4.8	3.72±0.78

Примечание: Данные за 2021–2024 гг. Численность и биомасса макрофауны методом почвенных раскопок (проб 25×25 см, глубина 20 см). Жуужелицы учитывались методом ловчих канавок (10-дневная экспозиция). Индекс Шеннона по численности видов почвенной макрофауны. Контроль — ненарушенные темнохвойные леса.



коризных грибов: в контрольных лесах  $34.6 \pm 4.8$  видов и  $486 \pm 124$  экз./га, под пологом *Pseudotsuga menziesii*  $12.8 \pm 3.6$  видов и  $142 \pm 68$  экз./га. Исчезали специфичные симбионты аборигенных видов из родов *Suillus*, *Boletus*, *Leccinum*. Анализ населения почвенных беспозвоночных показал снижение под пологом интродуцентов (таблица 5). Общая численность макрофауны под *Pseudotsuga menziesii*  $182 \pm 56$  экз./мл против  $486 \pm 112$  экз./мл на контроле, биомасса снизилась с  $124 \pm 32$  г/мл до  $48 \pm 18$  г/мл. Численность дождевых червей уменьшалась в 3–4 раза. Видовое разнообразие почвенной фауны значительно снижалось.

Герпетобионтная фауна (преимущественно жуе-лицы *Carabidae*) демонстрировала обеднение под пологом интродуцентов. Число видов жуе-лиц сокращалось с  $19.8 \pm 4.8$  на контроле до  $6.2 \pm 1.8$  под *Pseudotsuga menziesii*, исчезали специализированные виды, сохранялись лишь эвритопные. Индекс разнообразия Шеннона снижался с  $3.72 \pm 0.78$  в естественных лесах до  $1.84 \pm 0.42$

под наиболее конкурентоспособными интродуцентами. Оценка инвазионного потенциала выявила различную способность видов к расселению (таблица 6). Наибольшую активность демонстрировали *Pseudotsuga menziesii*, *Picea pungens* и *Larix kaempferi*: плотность всходов и подроста на расстоянии 10–25 метров достигала 2400–3800 экз./га. У *Pseudotsuga menziesii* отмечалось успешное возобновление даже на расстоянии 100 метров с плотностью подроста  $640 \pm 180$  экз./га, жизненность молодых растений  $4.2 \pm 0.4$  балла по 5-балльной шкале, что свидетельствует о высоком инвазионном риске.

Анализ межгодовой динамики показателей экологического воздействия в период 2021–2024 гг. выявил усиление негативных эффектов с увеличением возраста и размеров интродуцентов (таблица 7). За трехлетний период наблюдений средний индекс конкурентного давления по всем видам возрос с  $5.2 \pm 2.1$  балла в 2021 году до  $5.8 \pm 2.3$  балла в 2024 году, что связано с увеличением размеров крон и усилением затенения подпологового

Таблица 6.  
Инвазионный потенциал интродуцированных видов Pinaceae: естественное возобновление на различном удалении от материнских деревьев (2021–2024 гг.)

Вид	Плотность подроста на расстоянии 10 м (экз./га)	Плотность на расстоянии 25 м (экз./га)	Плотность на расстоянии 50 м (экз./га)	Плотность на расстоянии 100 м (экз./га)	Жизненность подроста (балл)	Инвазионный индекс
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	$3800 \pm 840$	$2640 \pm 620$	$1280 \pm 340$	$640 \pm 180$	$4.2 \pm 0.4$	$8.6 \pm 0.8$
<i>Picea pungens</i>	$3200 \pm 760$	$2140 \pm 580$	$980 \pm 280$	$420 \pm 140$	$4.0 \pm 0.4$	$7.8 \pm 0.7$
<i>Larix kaempferi</i>	$3400 \pm 780$	$2280 \pm 600$	$1060 \pm 300$	$480 \pm 160$	$3.8 \pm 0.5$	$7.4 \pm 0.7$
<i>Pinus ponderosa</i>	$2600 \pm 680$	$1640 \pm 520$	$720 \pm 240$	$280 \pm 110$	$3.6 \pm 0.5$	$6.4 \pm 0.6$
<i>Larix decidua</i>	$2800 \pm 720$	$1840 \pm 540$	$820 \pm 260$	$340 \pm 120$	$3.7 \pm 0.5$	$6.8 \pm 0.6$
<i>Picea abies</i>	$2200 \pm 640$	$1340 \pm 480$	$560 \pm 200$	$180 \pm 80$	$3.4 \pm 0.5$	$5.6 \pm 0.5$
<i>Abies concolor</i>	$1800 \pm 580$	$1020 \pm 420$	$420 \pm 160$	$120 \pm 60$	$3.2 \pm 0.6$	$4.8 \pm 0.5$
<i>Pinus sylvestris</i>	$1600 \pm 540$	$880 \pm 380$	$340 \pm 140$	$80 \pm 50$	$3.0 \pm 0.6$	$4.2 \pm 0.4$
<i>Abies alba</i>	$1400 \pm 520$	$760 \pm 360$	$280 \pm 120$	$60 \pm 40$	$2.8 \pm 0.6$	$3.8 \pm 0.4$
<i>Pinus koraiensis</i>	$980 \pm 420$	$480 \pm 280$	$160 \pm 90$	$20 \pm 20$	$2.4 \pm 0.7$	$2.6 \pm 0.3$
<i>Picea orientalis</i>	$840 \pm 380$	$380 \pm 240$	$120 \pm 70$	$0 \pm 10$	$2.2 \pm 0.7$	$2.2 \pm 0.3$
<i>Pinus cembra</i>	$920 \pm 400$	$440 \pm 260$	$140 \pm 80$	$20 \pm 20$	$2.3 \pm 0.7$	$2.4 \pm 0.3$

Примечание: данные представлены в виде среднего арифметического  $\pm$  стандартное отклонение за период 2021–2024 гг. Плотность подроста определялась на учетных площадках  $10 \times 10$  м на различном удалении от групп материнских деревьев (минимум 15 площадок для каждого расстояния). Учитывались все возрастные группы подроста (всходы, ювенильные, имматурные растения). Жизненность оценивалась по 5-балльной шкале (5 — отличное состояние, 1 — критическое). Инвазионный индекс рассчитывался с учетом плотности возобновления, дальности расселения, жизненности и успешности приживания в различных сообществах по 10-балльной шкале (10 — максимальный инвазионный потенциал).

пространства. Степень подкисления почв также прогрессивно нарастала благодаря кумулятивному накоплению кислого опада, а показатели биологической активности продолжали снижаться, что указывает на постепенное усугубление экологических изменений с течением времени.

Таблица 7.  
Межгодовая динамика показателей экологического воздействия интродуцентов (2021–2024 гг.).

Показатель	2021	2022	2023	2024	Тренд
Средние показатели по всем видам					
Конкурентное давление (балл)	5.2±2.1	5.4±2.2	5.6±2.2	5.8±2.3	↑
Снижение видового богатства (%)	22.4±11.6	24.8±12.4	26.2±13.1	28.6±13.8	↑
Подкисление почв (единиц pH)	0.48±0.32	0.54±0.36	0.62±0.38	0.68±0.42	↑
Почвенное дыхание (% от контроля)	82.4±18.6	78.6±19.2	74.8±20.4	71.2±21.8	↓
Численность дождевых червей (% от контроля)	68.2±24.8	62.4±26.2	58.6±27.8	54.2±29.4	↓
Плотность подроста интродуцентов на расстоянии 25 м (экз./га)	980±640	1240±740	1480±820	1680±880	↑
Площадь подкисленных почв (га)	2.8	3.6	4.2	4.8	↑
Число участков с инвазией интродуцентов	3	7	12	18	↑

Примечание: Данные по всем 12 исследованным видам. Подкисление почв как разница между pH контроля и участков под интродуцентами. Почвенное дыхание и численность дождевых червей в процентах от контроля. Площадь подкисленных почв — суммарная площадь под пологом интродуцентов с pH<5.0. Число участков с инвазией — количество локальных популяций самосева за пределами питомника. Стрелки: ↑ увеличение, ↓ снижение.

Плотность естественного возобновления интродуцентов на расстоянии 25 метров увеличилась

с 980±640 экз./га (2021) до 1680±880 экз./га (2024), что свидетельствует о начале активной фазы расселения. Площадь почв с нарушенными характеристиками (pH<5.0, снижение биологической активности >30 %) увеличилась с 2.8 га (2021) до 4.8 га (2024), число участков с инвазией возросло с 3 до 18. Сравнительный анализ показал закономерности. Североамериканские виды демонстрируют высокую жизнеспособность и интенсивный рост, одновременно оказывая наиболее сильное негативное воздействие через конкуренцию, модификацию почв и аллелопатические эффекты. Европейские виды проявляют умеренное воздействие, сопоставимое с естественными доминантами. Континентальные азиатские виды демонстрируют слабое воздействие из-за меньшей жизнеспособности, однако их интродукция не оправдана из-за низких показателей адаптации.

Заключение

Трехлетнее исследование экологических последствий интродукции экзотических представителей семейства Pinaceae на юге Сахалина выявило значительное негативное воздействие большинства видов на компоненты островных экосистем. Североамериканские виды *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus ponderosa* и *Picea pungens* оказывают наиболее сильное конкурентное давление (индексы 6.9–7.8 балла из 10) со снижением видового богатства на 34–42 % и сокращением проективного покрытия травяно-кустарничкового яруса до 18–26 % против 63 % в естественных лесах. Эти виды вызывают подкисление почв (снижение pH на 0.6–0.8 единиц), угнетение микробиологической активности (снижение почвенного дыхания на 40–57 %), проявляют высокую аллелопатическую активность (индекс ингибирования 48–57 %) и обладают инвазионным потенциалом с плотностью естественного возобновления до 3800 экз./га на расстоянии 10 метров. Европейские виды *Picea abies* и *Pinus sylvestris* показали умеренное воздействие (конкурентное давление 5.1–5.6 балла, снижение видового богатства на 19–24 %, подкисление почв 0.3–0.4 единиц pH), что позволяет рассматривать возможность их ограниченного использования при регулярном мониторинге. Континентальные азиатские виды проявили наименьшее воздействие (конкурентное давление 3.8–4.6 балла, снижение видового богатства 10–15 %), однако низкие адаптационные показатели не оправдывают интродукцию. Листопадные виды *Larix* демонстрируют промежуточный уровень воздействия с высоким инвазионным потенциалом, но меньшим влиянием на почвенные процессы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Richardson D.M., Руљек Р., Rejmánek M., Barbour M.G., Panetta F.D., West C.J. Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions // *Diversity and Distributions*. — 2000. — Vol. 6, N 2. — P. 93–107. DOI: 10.1046/j.1472-4642.2000.00083.x
2. Farjon A. Pinaceae: drawings and descriptions of the genera *Abies*, *Cedrus*, *Pseudolarix*, *Keteleeria*, *Nothotsuga*, *Tsuga*, *Cathaya*, *Pseudotsuga*, *Larix* and *Picea*. — Künigstein: Koeltz Scientific Books, 1990. — 330 p.
3. Bonan G.B., Shugart H.H. Environmental factors and ecological processes in boreal forests // *Annual Review of Ecology and Systematics*. — 1989. — Vol. 20. — P. 1–28. DOI: 10.1146/annurev.es.20.110189.000245
4. Inderjit, Wardle D.A., Karban R., Callaway R.M. The ecosystem and evolutionary contexts of allelopathy // *Trends in Ecology & Evolution*. — 2011. — Vol. 26, N 12. — P. 655–662. DOI: 10.1016/j.tree.2011.08.003
5. Simberloff D., Martin J.L., Genovesi P., Maris V., Wardle D.A., Aronson J., Courchamp F., Galil B., García-Berthou E., Pascal M., Руљек Р., Sousa R., Tabacchi E., Vila M. Impacts of biological invasions: what's what and the way forward // *Trends in Ecology & Evolution*. — 2013. — Vol. 28, N 1. — P. 58–66. DOI: 10.1016/j.tree.2012.07.013
6. Kozhevnikov A.E., Kozhevnikova Z.V. The Vegetation of Sakhalin Island // *Climate Change Impacts on Soil Processes and Ecosystem Functioning*. — Amsterdam: Elsevier, 2023. — P. 187–212.
7. Krestov P.V., Omelko A.M., Nakamura Y. Vegetation and natural habitats of Kamchatka // *Berichte der Reinhold-Tyxen-Gesellschaft*. — 2008. — Vol. 20. — P. 195–218.
8. Vitousek P.M., D'Antonio C.M., Loope L.L., Westbrooks R. Biological invasions as global environmental change // *American Scientist*. — 1996. — Vol. 84, N 5. — P. 468–478.
9. Davis M.A., Grime J.P., Thompson K. Fluctuating resources in plant communities: a general theory of invasibility // *Journal of Ecology*. — 2000. — Vol. 88, N 3. — P. 528–534. DOI: 10.1046/j.1365-2745.2000.00473.x
10. Augusto L., Ranger J., Binkley D., Rothe A. Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility // *Annals of Forest Science*. — 2002. — Vol. 59, N 3. — P. 233–253. DOI: 10.1051/forest:2002020
11. Rice E.L. Allelopathy. Second Edition. — Orlando: Academic Press, 1984. — 422 p.
12. Руљек Р., Richardson D.M., Rejmánek M., Webster G.L., Williamson M., Kirschner J. Alien plants in checklists and floras: towards better communication between taxonomists and ecologists // *Taxon*. — 2004. — Vol. 53, N 1. — P. 131–143. DOI: 10.2307/4135498
13. Hejda M., Руљек Р., Јаролњк V. Impact of invasive plants on the species richness, diversity and composition of invaded communities // *Journal of Ecology*. — 2009. — Vol. 97, N 3. — P. 393–403. DOI: 10.1111/j.1365-2745.2009.01480.x
14. Vila M., Espinar J.L., Hejda M., Hulme P.E., Јаролњк V., Maron J.L., Pergl J., Schaffner U., Sun Y., Руљек Р. Ecological impacts of invasive alien plants: a meta-analysis of their effects on species, communities and ecosystems // *Ecology Letters*. — 2011. — Vol. 14, N 7. — P. 702–708. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2011.01628.x
15. Wardle D.A., Bardgett R.D., Klironomos J.N., Set l  H., van der Putten W.H., Wall D.H. Ecological linkages between aboveground and belowground biota // *Science*. — 2004. — Vol. 304, N 5677. — P. 1629–1633. DOI: 10.1126/science.1094875

© Николаев Дмитрий Владимирович (dimitriy.nikolayev.99@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»