

На правах рукописи



ЕЖКИН
Александр Константинович

ЭПИФИТНЫЙ ЛИШАЙНИКОВЫЙ ПОКРОВ ТЕМНОХВОЙНЫХ
ЛЕСОВ ЮГА САХАЛИНСКОЙ ОБЛАСТИ В РАЙОНАХ
ТЕХНОГЕННОГО И ПРИРОДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

03.02.08 – «Экология (в биологии)»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Санкт-Петербург
2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук

Научный руководитель

кандидат биологических наук,
Галанина Ирина Александровна,
Федеральное государственное учреждение науки Биолого-почвенный институт Дальневосточного отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник

Официальные оппоненты:

Сонина Анжелла Валерьевна,
доктор биологических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Петрозаводский государственный университет», профессор
Мучник Евгения Эдуардовна,
доктор биологических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лесоведения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения Российской академии наук

Защита состоится 25 января 2017 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д002.211.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ботаническом институте им. В.Л. Комарова Российской академии наук по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 2.
Тел. (812) 372-54-42, факс (812) 372-54-43, dissovet.d00221102@binran.ru
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ботанического института им. В.Л. Комарова Российской академии наук.

Автореферат разослан « »ноября 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук



Лянгузова Ирина Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Среди множества групп организмов, используемых в биологических методах оценки наземных экосистем, наиболее оптимальными по степени надежности и изученности являются эпифитные лишайники (Nash, 1973; Skye, 1979; Richardson, Nieboer, 1981; Nash, Gries 1991; Gries, 1996; Loppi, 1996, 2000; Малышева, 1998; Бязров, 2002). Большая часть исследований, направленных на изучение влияния загрязнителей на лишайники, проводилась на территориях населенных пунктов и промышленных комплексов, при этом естественные местообитания в данном контексте изучены значительно меньше. Работ по изучению влияния вулканической активности и выбросов в местах разработок геотермальных месторождений на лишайники в мировой литературе также немного, ввиду специфики мест обитания.

Сахалин и Курильские острова – один из немногих регионов в России, где сочетаются уникальные природные комплексы и активный современный вулканизм. Исследования, направленные на изучение влияния вулканической деятельности на природные процессы, представляют теоретический и практический интерес. Помимо изучения воздействия активного вулканизма на природную среду, в связи с увеличением объемов добычи природных ресурсов в Сахалинской области, возрастает интерес к биоиндикационным исследованиям, направленным на исследования потенциально опасных для окружающей среды техногенных источников загрязнения – объектов нефтегазового комплекса на о. Сахалин и геотермальных электростанций в вулcanoопасных районах на Южных Курильских островах. Учитывая биоиндикационную ценность эпифитных лишайников, актуальность данных исследований обусловлена необходимостью изучения воздействия этих объектов на окружающую среду. Лихенобиота Сахалинской области также изучена не полностью. Таким образом, кроме биоиндикационных исследований, остается актуальным продолжение изучения лихенобиоты островов для более полной оценки разнообразия лишайников региона.

Цель исследования: Изучение эпифитного лишайникового покрова в темнохвойных лесах юга Сахалинской области и его изменения под воздействием техногенного и природного загрязнения. Для достижения намеченной цели были поставлены следующие **задачи**:

- 1) исследовать видовой состав и параметры эпифитного лишайникового покрова *Picea glehnii* и *Abies sachalinensis* в темнохвойных лесах юга Сахалинской области;
- 2) оценить изменение характеристик эпифитного лишайникового покрова основных лесообразующих видов под воздействием техногенного и природного загрязнения;
- 3) выявить основные группы видов эпифитных лишайников, различающиеся по устойчивости к различным типам атмосферного загрязнения в условиях района исследований;

- 4) оценить связь изменения характеристик эпифитного лишайникового покрова с накоплением элементов-загрязнителей в слоевищах лишайников в районах исследования;
- 5) апробировать различные методы лишайноиндикации в районах воздействия техногенного и природного загрязнения.

Научная новизна. В работе впервые выявлен видовой состав эпифитных лишайников доминирующих древесных пород темнохвойных участков леса в импактных и фоновых зонах в районах завода по сжижению природного газа (СПГ) на юге о. Сахалина, северо-западного сольфатарного поля вулкана Менделеева, геотермальной электростанции «Менделеевская» на о. Кунашир. Во время исследований в данных районах отмечены 33 вида лишайников, которые ранее не указывались для островов Сахалин и Кунашир. Из них 1 новый вид для России и 1 новый вид для Дальнего Востока.

Для районов исследования впервые дана наиболее полная характеристика лишайникового покрова на доминирующих древесных породах, включая показатели покрытия и встречаемости видов лишайников, а также показатели повреждения слоевищ. Впервые выделены индикаторные виды и основные группы устойчивости эпифитных лишайников, получены данные о содержании различных токсичных веществ в слоевищах лишайников. Впервые проведено лишайноиндикационное картирование исследованных территорий на основе различных показателей эпифитной лишайнобиоты, включая уровень накопления токсичных веществ в слоевищах лишайников. Предложен метод оценки степени повреждений слоевищ лишайников, основанный на отношении доли поврежденных участков к покрытию вида.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные результаты вносят определенный вклад в изучение лишайнобиоты исследуемой территории, а также экологии эпифитных лишайников темнохвойных лесов юга Сахалинской области в условиях техногенного и природного загрязнения. Апробированные методы, полученные исходные данные, заложенные постоянные пробные площади и картосхемы могут быть использованы в качестве основы для создания мониторинговых программ важных техногенных объектов и уникальных природных комплексов, имеющих ограниченное распространения на Земле – сольфатарных полей активных вулканов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов и 9 приложений, изложена на 445 страницах, включая приложения на 240 страницах, содержит 26 таблиц и 103 рисунка. Список литературы содержит 370 цитируемых источников, в том числе 241 на иностранных языках.

Положения, выносимые на защиту. В районах воздействия рассматриваемых техногенных источников загрязнения на юге Сахалинской области в начальный период эксплуатации (в течение первых 10–15 лет) происходит разрушение эпифитного покрова лишайников на участках темнохвойных лесов, которое выражается в увеличении доли поврежденных и мертвых слоевищ, а также в снижении показателей покрытия и

встречаемости эпифитных лишайников на стволах деревьев без заметной смены видового состава в градиенте воздействия.

В результате длительного атмосферного загрязнения активных сольфатарных полей активных вулканов в градиенте их воздействия происходит значительная смена видового состава эпифитных лишайников и лишеносинузий, изменение показателей покрытия и встречаемости отдельных видов, поселение специфичных видов и формирование особых групп лишайников с различной степенью устойчивости к фумарольным газам.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на IV межрегиональной конференции молодых ученых, приуроченной к 35-летию юбилею Музея естественной истории СВКНИИ ДВО РАН «Научная молодежь – северо-востоку России» (Магадан, 2012), II международной научной конференции по морфологии растений «Современная Фитоморфология» (Львов, 2013), VII международной научной конференции «Вулканизм, биосфера и экологические проблемы» (Майкоп, 2013), XII молодежной конференции с элементами научной школы «Географические и геоэкологические исследования на Дальнем Востоке» (Владивосток, 2014), всероссийской научной конференции с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска» (Южно-Сахалинск, 2015), XX международной конференции «Нефть и газ Сахалина» (Южно-Сахалинск, 2016), VII конференции «Растения в муссонном климате: острова и растения» (Южно-Сахалинск, 2016), VI Сахалинской молодежной научной школе «Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз» (Южно-Сахалинск, 2016).

Публикации материалов исследований. Всего по теме диссертации опубликовано 14 работ. Из них 3 в журналах, рецензируемых ВАК РФ.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю к.б.н. И.А. Галаниной за методическую помощь и критические замечания, к.б.н. А.В. Кордюкову за ценные советы и помощь в обработке данных при написании диссертации, а также к.б.н. С.И. Чабаненко, к.б.н. Л.А. Коноровой, доктору Т. Шприбилле (Австрия) за консультации и помощь в определении некоторых видов лишайников. Автор выражает признательность доктору Ф. Шуму (Германия) за помощь в определении некоторых видов эпифитных лишайников, а также предоставление лишенологической литературы. Автор благодарит к.г.н. Р.В. Жаркова, к.б.н. К.А. Корзникова, к.б.н. П.С. Ктигорова и к.б.н. О.Ж. Цырендоржиеву за консультации и сотрудничество в проведении исследований, а также д.б.н. В.В. Горшкова за ценные советы и критические замечания в работе. Часть исследований выполнена при поддержке грантов РФФИ 13-05-00239-а, 13-05-00544-а, гранта некоммерческой организации Global Green Grunts «Мониторинг окружающей среды в районе завода СПГ на острове Сахалин методом лишеноиндикации 2014 – 2015» и гранта Правительства Сахалинской области молодым ученым.

Глава 1. Обзор литературы

Эпифитные лишайники являются важнейшим компонентом большинства лесных экосистем. В бореальной зоне эпифитные лишайники вносят значительный вклад в общее биоразнообразие (Lesica et al., 1991; Dettki, Esseen, 1998). Лишайники-эпифиты участвуют в круговороте питательных и минеральных веществ в лесных фитоценозах (Knops et al., 1991, 1996; Pike, 1978; Rhoades, 1995). Повышенная чувствительность к изменению факторов среды, включая хозяйственную деятельность человека, загрязнение атмосферного воздуха, изменение климата и др., делает эпифитные лишайники ценными биоиндикаторами состояния окружающей среды (Ferry et al., 1973; Oksanen et al., 1990; Kuusinen et al., 1990; Richardson, 1992; McCune et al., 1997; Бязров, 2002). В районах воздействия атмосферного загрязнения происходит разрушение эпифитного лишайникового покрова на стволах деревьев, которое проявляется в снижении общего количества видов, уменьшении покрытия и встречаемости большинства видов эпифитных лишайников, уменьшении суммарного покрытия всех видов лишайников, увеличении встречаемости описаний без лишайников, снижении жизнеспособности и увеличении некротических поражений, поселении специфических видов устойчивых к атмосферному загрязнению (Gilbert, 1973; Мартин, 1982; Трасс, 1985; Горшков, 1986, 1990, 1991; Bargagli, Barghigiani, 1991; Peralta, Carmona, 1995; Михайлова, Воробейчик, 1995; Михайлова, 1996; Loppi, 1996; Loppi, Nascimbene, 1998; Ferrara et al., 1998; Loppi, Bonini, 2000). Эпифиты характеризуются более высокой скоростью поглощения загрязнителей и отличаются меньшей устойчивостью к поллютантам по сравнению с лишайниками из других групп (Daly, 1970; Gilbert, 1970; Westman, 1975; Горшков, 1990). Различные виды лишайников демонстрируют различную реакцию на поллютанты, что позволяет составить биологические шкалы чувствительности/устойчивости отдельных видов (Мартин, 1984).

Способность лишайников накапливать различные химические элементы, включая тяжелые металлы, в настоящее время активно используется в биоиндикации (Szczepaniak, Biziuk, 2003). Тяжелыми металлами нередко загрязнены районы крупных сталелитейных заводов, угольных шахт, отвалы рудников, урбанизированные территории, автодороги, а также сольфатарные поля активных вулканов и места разработок гидротермальных месторождений (Loppi, Bonini, 2000; Бязров, 2002; Жарков, Побережная, 2010).

Глава 2. Природные условия районов исследований

Исследования эпифитного лишайникового покрова были проведены в трёх районах юга Сахалинской области: 1) район северо-западного сольфатарного поля вулкана Менделеева, о. Кунашир; 2) район геотермальной электростанции «Менделеевская» на северо-восточном склоне вулкана Менделеева, о. Кунашир; 3) участок прибрежной зоны залива Анива в районе

размещения завода по сжижению природного газа (СПГ), юг о. Сахалин (рис. 1). Ниже приводятся описания природных условий для данных районов.

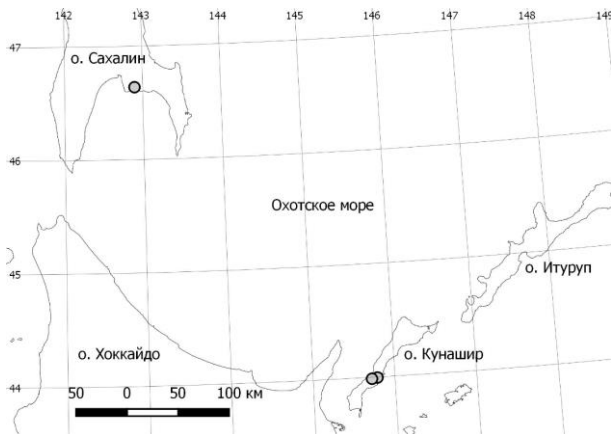


Рис. 1. Карта районов исследования.

2.1. Остров Кунашир

Остров Кунашир является самым южным островом Большой Курильской гряды. Его площадь составляет 1548 км². Вулкан Менделеева, в окрестностях которого были проведены исследования, является действующим стратовулканом в цепи вулканов Курило-Камчатской вулканической дуги (Южные..., 1992). На вулкане находятся четыре сольфатарных поля с выходами газов и термальных вод. Климат острова Кунашир типично морской, характерный для умеренных широт. Наблюдается незначительное влияние муссонов, обилие атмосферных осадков (до 1100–1400 мм/год) и высокая влажность (средняя относительная влажность воздуха 80 %). Средняя годовая температура составляет +4–5°C (Южные..., 1992).

Окрестности вулкана Менделеева на 60% представлены темнохвойными лесами с лесообразующей породой елью Глена, вместе с которой заметное участие принимает ель аянская и пихта сахалинская. Средний возраст ельников варьирует от 80 до 130 лет и более. Геотермальная электростанция «Менделеевская», в окрестностях которой были проведены исследования эпифитного лишайникового покрова, находится на северо-восточном склоне вулкана Менделеева. Здесь растительность также представлена лесами с лесообразующей породой елью Глена.

2.2. Остров Сахалин

Остров Сахалин расположен у дальневосточного побережья Евразийского материка в переходной зоне от континента к Тихому океану. Сахалин располагается в области морского муссонного климата умеренных широт. Относительная влажность воздуха в районе исследований близка к 80%. Область характеризуется более мягкой зимой и теплым летом, положительными среднегодовыми температурами (от +1,8°C до +3,0°C),

значительным выпадением осадков (в среднем до 800 мм/год) (Земцова, 1968). Район крайнего юга Сахалина, где проходили исследования, относится к подзоне темных хвойных лесов с преобладанием пихты (Толмачев, 1955). Елово-пихтовые леса в окрестностях завода СПГ сильно трансформированы, с заметными следами антропогенного вмешательства и находятся на разной стадии восстановления (Побережная и др., 2009). Средний возраст елово-пихтовых лесов здесь варьирует от 40 до 100 лет.

Глава 3. Характеристика источников загрязнения в исследуемых районах и их воздействие на окружающую среду

3.1. Северо-западное сольфатарное поле вулкана Менделеева

Северо-западное сольфатарное поле вулкана Менделеева расположено на высоте 350–400 м н.у.м. Площадь поля равна 0,062 км². На поле отмечено 7 активных сольфатар (фумарол), из которых наиболее активны две. В составе сольфатарных газов преобладают CO₂, участвуют HCl, SO₂, H₂S, CO, H₂, CH₄, O₂, N₂ и редкие газы (Лебедев и др., 1980).

Сольфатарные поля оказывают постоянное довольно мощное воздействие на окружающую среду, включая изменение микроклиматических условий вследствие выбросов большого объема нагретой парогазовой смеси из активных сольфатар, увеличение температуры и изменение химического состава субстрата, высокое развитие эрозионных процессов и сильное атмосферное загрязнение.

3.2. Геотермальная станция (ГеоТЭС) «Менделеевская»

На базе геотермального месторождения «Горячий пляж» у подножья вулкана Менделеева в 2002 году была запущена в эксплуатацию ГеоТЭС «Менделеевская», которая в настоящее время обеспечивает электричеством пгт. Южно-Курильск. Мощность станции на данный момент составляет 3,6 МВт. В непосредственной близости от ГеоТЭС можно наблюдать большое количество высохших деревьев, вероятно, погибших в результате выбросов отработанного пара геотермальной станции. Гидротермы часто содержат большое количество солей и среди них очень часто F, B, As и тяжелые металлы. Выходящий на поверхность пар содержит от 0,5 до 6% вес. неконденсирующегося газа (CO₂, H₂S, H₂, CH₄, NH₄) (Кононов, 1983).

3.3. Завод по сжижению природного газа (СПГ)

Завод СПГ является частью производственного комплекса (ПК) «Пригородное» и располагается на участке морского побережья Анивского залива острова Сахалин. Производственный комплекс включает в себя завод по сжижению природного газа (СПГ), терминал отгрузки нефти (ТОН) и порт «Пригородное». Завод СПГ был введен в эксплуатацию в 2009 году, его мощность составляет 9,6 млн. т сжиженного газа в год. Согласно нормативным документам, из 26 загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу в результате сжигания газа, основными являются NO₂, SO₂, CO

(Повторное экспертно-гигиеническое заключение..., 2007). В районе завода проходит участок автодороги общего пользования.

Глава 4. Объекты и методы исследований

Исследования особенностей лишайникового покрова были проведены в летние месяцы 2012–2015 гг. в два этапа: 1) рекогносцировочные работы, которые включали сбор гербарного материала для последующего определения и камеральной обработки, закладка пробных площадей (участков); 2) измерение параметров лишайникового покрова и отбор проб слоевищ лишайников для химического анализа.

Модельные деревья, на которых проводилась оценка состояния лишайникового покрова, выбирались одинакового диаметра, не менее 10 стволов на участке, без наклона относительно уровня почвы или с наклоном, не превышающим 10°. Для оценки состояния лишайникового покрова в районах исследования измерялись следующие параметры: количество видов, показатели покрытия, встречаемости и повреждений.

Для измерения покрытия и встречаемости использовали рамку 10×40 см (400 см²), поделенную на 4 части: микроплощадки (10×10 см) с ячейками в 1 см². Рамка прикладывалась с четырех сторон ствола дерева на высоте от 1,1 до 1,5 м. В районе северо-западного сольфатарного поля вулкана Менделеева, учитывая длительный период воздействия данного источника загрязнения, учет лишайников дополнительно был проведен на основании стволов деревьев на высоте до 0,6 м от уровня земли. Покрытие каждого вида лишайников на стволе модельного дерева измерялось в процентах относительно каждой микроплощадки (10×10 см), где 1 ячейка составляла 1%. Встречаемость также измерялась в процентах относительно всех микроплощадок (160) на каждой пробной площади для каждого уровня поселения лишайников. Всего в трех районах исследований было заложено 11040 микроплощадок: 5440 в районе северо-западного сольфатарного поля вулкана Менделеева, 2560 микроплощадок в районе геотермальной электростанции «Менделеевская» и 3040 микроплощадок в районе ПК «Пригородное». Для оценки биоразнообразия лишайников был использован индекс Шеннона (Шеннон, 1963) и индекс выравненности экологических сообществ Пиелу (Pielou, 1966, 1975).

Оценка состояния слоевищ. Состояние слоевищ оценивалось визуально по некротическим повреждениям с помощью рамки 400 см² с микроплощадками 10×10 см с ячейками в 1 см, которая использовалась для измерения покрытия. На каждой микроплощадке фиксировались покрытие и площадь поврежденных (некротированных) областей лишайников, затем на основе данных измерений для каждого вида высчитывалась средняя площадь повреждённых слоевищ (N) относительно среднего покрытия для каждой пробной площади по следующей формуле:

$$N = 100 \times \frac{\sum n}{\sum c} \quad (1)$$

где c_i – среднее покрытие вида относительно всей обследованной пробной площади (%), и n_i – показатель повреждения (некроза) талломов вида (%) относительно общего покрытия данного вида на микроплощадке 10×10 см.

Выделение зон воздействия источников загрязнения. Выделение зон воздействия выполняли с помощью кластеризации методом Уорда (Ward, 1963) на основе видовых особенностей и показателей лишенобиоты (встречаемости и покрытия), а также на основе графиков изменения показателей лишенобиоты.

Оценка чувствительности лишайников. Чувствительность лишайников определяли по приуроченности к зонам воздействия, выделенным по результатам кластеризации или на основе анализов графиков изменения показателей лишенобиоты.

Эколого-морфологический анализ. Эколого-морфологический анализ был выполнен на основании субстратной приуроченности лишайников и их жизненных форм. Жизненные формы указаны, согласно биоморфологической классификации лишайников, разработанной Н.С. Голубковой (1983). Субстратные группы лишайников указаны, согласно общепринятой классификации (Лиштва, 2007).

Анализы химических элементов. В дополнение к традиционным лишеноиндикационным методам во всех районах проведения работ были исследованы талломы эпифитных лишайников на содержание 14 химических элементов – Al, S, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd, Pb, Hg методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе Agilent 7500a по методике ФР.1.31.2009.06787.

Для оценки влияния состава земной коры на элементный состав проб были рассчитаны широко используемые (Puckett, Finegan, 1980; Nash, Gries, 1995; Paoli et al., 2015) коэффициенты накопления. В качестве эталонного материала выбрана верхняя континентальная кора (Rudnick, Gao, 2003), а эталонного элемента – алюминий.

Статистическая обработка. Для выявления потенциальных источников воздействия на состояние лишайниковых сообществ и уровни накопления химических элементов в слоевищах лишайников использовали многофакторный регрессионный анализ с использованием статистического пакета R. Для выявления основных средовых градиентов, влияющих на формирование видовой структуры лишайниковых сообществ, использовали метод непрямой ординации. Процедуру непрямой ординации проводили в программе PC-ORD 5.1.

Картирование. Картирование выполнено методом обратных взвешенных расстояний (IDW) в программе QGIS.

Определение лишайников. Идентификация лишайников проведена традиционными лишенологическими методиками, изложенными в Определителе лишайников СССР, вып.2. (Оксер, 1974). Обработка и определение материалов проводились в лаборатории береговых геосистем Института морской геологии и геофизики ДВО РАН и лаборатории низших растений Биолого-почвенного института ДВО РАН. Названия таксонов даны, согласно базе данных Index Fungorum, CABI Bioscience Databases. Во время

исследований было собрано не менее 2000 образцов лишайников. Гербарий хранится в Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН и Биолого-почвенном институте ДВО РАН (VLA).

Глава 5. Результаты исследований

5.1. Систематический и эколого-морфологический анализ лишайников *Picea glehnii*

В районах северо-западного поля вулкана Менделеева и геотермальной электростанции (ГеоТЭС) «Менделеевская» (о. Кунашир) исследования лишайникового покрова проводились на одной древесной породе, доминирующей в елово-пихтовых лесах этого района – *Picea glehnii*. Всего на *P. glehnii* в данном районе было зарегистрировано 67 видов лишайников. Выявленные виды относятся к 8 порядкам, 19 семействам и 36 родам. Большинство видов принадлежит порядку *Lecanorales* Nannf. (45 видов; 68%). Второе место по числу видов занимает порядок *Pertusariales* M. Choisy ex. D. Hawksw. et O.E. Erikss. (13 видов; 20%). Остальные порядки объединяют 1-3 вида.

К ведущим семействам по числу видов относятся *Parmeliaceae* Zenker (17 видов; 30%), *Pertusariaceae* Körb. (9 видов; 16%), *Cladoniaceae* Zenker (6 видов; 11%), *Ochrolechiaceae* R. C. Harris ex Lumbsch et I. Schmitt (4 вида; 7%) и *Ramalinaceae* Zenker (4 видов; 7%), которые объединяют более половины всего видового состава (71%). *Lecanoraceae* Körb. включает 3 вида, что составляет 5%. *Mycoblastustaceae* Hafellner включает 2 вида, что составляет 4%. Более половины семейств (12, 24%) являются одновидовыми.

К числу ведущих родов относятся *Pertusaria* DC. (9 видов; 13%), *Cladonia* P. Browne (6 видов; 9%) и *Hypogymnia* (Nyl.) Nyl. (5 видов; 7%). *Ochrolechia* A. Massal. и *Parmelia* Ach включают по 4 вида (6%), остальные роды включают 1 – 3 вида.

5.1.2. Эколого-морфологический анализ лишайников *Picea glehnii*

Спектр жизненных форм. В видовом составе *P. glehnii* зарегистрировано 9 жизненных форм. Наибольшее количество видов лишайников принадлежит к группе накипной зернисто-бородавчатой жизненной форме (16 видов; 24%). На втором месте находится накипная плотно-корковая жизненная форма (14 видов; 21%). На третьем месте листоватая рассеченно-лопастная ризидиальная (14 видов; 21%). Далее следуют кустистая повисающая радиально-лопастная и листоватая вздуто-лопастная неризидиальная формы (7 видов; 10%). Кустистая прямостоящая форма включает 6 видов (9%). Остальные жизненные формы включают 1–3 вида. При более обобщенном анализе было выделено 3 жизненные формы: накипная (33 вида; 49%), листоватая (18 видов; 27%), кустистая (16 видов; 24%).

Экологические группы лишайников по субстратной приуроченности. По субстратной приуроченности было выделено 5 экологических групп лишайников на *P. glehnii*. Эпифиты составляют

подавляющее большинство – 58 видов, т.е. 87% от всего видового состава для данной древесной породы. Остальные виды (9 видов; 13%) принадлежат к эпиксильной группе лишайников.

5.2. Систематический и эколого-морфологический анализ лишайников *Abies sachalinensis*

В районе завода СПГ (о. Сахалин) исследования лишайникового покрова проводились на одной древесной породе, доминирующей в елово-пихтовых лесах этого района – *Abies sachalinensis*. Всего на *A. sachalinensis* в данном районе было зарегистрировано 76 видов лишайников. Выявленные виды относятся к 9 порядкам, 19 семействам и 37 родам. Большинство видов принадлежит порядку *Lecanorales* (46 видов; 59%). Второе место по числу видов занимает порядок *Pertusariales* (11 видов; 14%), третье место – *Peltigerales* Walt. Watson (7 видов; 9%), четвертое – *Caliciales* Bessey (6 видов; 8%). Остальные порядки объединяют 1-3 вида.

К ведущим семействам по числу видов относятся *Parmeliaceae* (16 видов; 23%), *Ramalinaceae* (10 видов; 14%), *Pertusariaceae* (7 видов; 10%), *Lecanoraceae* (6 видов; 8%), *Physciaceae* Zahlbr. (6 видов; 8%), *Lobariaceae* Chevall. (5 видов; 7%), *Ochrolechiaceae* (4 вида; 6%). Остальные семейства включают 1-3 вида.

К числу ведущих родов относятся *Pertusaria* (7 видов; 9%), *Hypogymnia* и *Lecanora*, включающие по 6 видов (8%), *Lobaria* (Schreb.) Hoffm. (5 видов; 6%). *Biatora* Fr. и *Parmelia* включают по 4 вида (5%), остальные роды включают 1 – 3 вида.

5.2.2. Эколого-морфологический анализ лишайников *Abies sachalinensis*

Спектр жизненных форм. В видовом составе *A. sachalinensis* зарегистрировано 9 жизненных форм. Наибольшее количество видов лишайников принадлежит к группе накипной плотно-корковой жизненной форме (24 вида; 31%). Вторая по численности накипная зернисто-бородавчатая жизненная форма (15 видов; 19%). На третьем месте листоватая рассечено-лопастная ризодиальная (9 видов; 12%). Далее следует листоватая вздуто-лопастная неризодиальная (8 видов; 10%). Листоватая широколопастная и кустистая повисающая радиально-лопастная включает по 7 видов (8%). Остальные жизненные формы включают 1–2 вида.

При более обобщенном анализе было выделено 3 жизненные формы: накипная (42 вида; 54%), листоватая (24 вида; 31%), кустистая (12 видов; 16%).

Экологические группы по субстратной приуроченности. По субстратной приуроченности было выделено 4 экологические группы лишайников на *A. sachalinensis*. Эпифиты включают подавляющее большинство – 69 видов, что составляет 88% от всего видового состава для данной древесной породы. Остальные виды (9 видов; 12%) принадлежат к смешанным эпифитным, эпибриофитным и эпиксильным группам.

5.3. Лишайниковый покров в районе северо-западного сольфатарного поля вулкана Менделеева

В районе северо-западного сольфатарного поля вулкана Менделеева были заложены 17 пробных площадей. Самые близкие площадки к активным сольфатарам были заложены на расстоянии 225 м, а наиболее удаленные – на расстоянии чуть более 2 км от поля.

5.3.1. Особенности изменения лишайникового покрова на стволах *Picea glehnii* на высоте 1,1–1,5 м от уровня почвы (верхнем уровне)

Общее биоразнообразие на стволах *P. glehnii* на уровне 1,1–1,5 м оценено такими характеристиками, как среднее количество видов в описаниях, индексами Шеннона и Пиелу. Среднее количество видов в описаниях составляет 15 видов, индекс Шеннона = 2,8, индекс Пиелу = 0,72.

По результатам исследований с приближением к сольфатарному полю на стволах *P. glehnii* на уровне 1,1–1,5 м происходят значительные изменения показателей эпифитного лишайникового покрова. Падает общее видовое разнообразие эпифитных лишайников, которое выражается в уменьшении среднего количества видов на пробных площадях в 3 раза – с 20–27 видов на удаленных площадках и до 2–12 видов на наиболее приближенных площадках (Adjusted $R^2 = 0,54$, $p = 0,0004$). Информационный индекс разнообразия Пиелу падает в среднем в 1,9 раза – с 0,9–1 на удаленных площадках до 0,24–0,5 на наиболее приближенных площадках. Индекс Шеннона также падает в среднем в 1,9 раза – с 3,4–3,9 на удаленных площадках до 1–2 на наиболее приближенных площадках (Adjusted $R^2 = 0,5$, $p = 0,01$) (рис. 2).

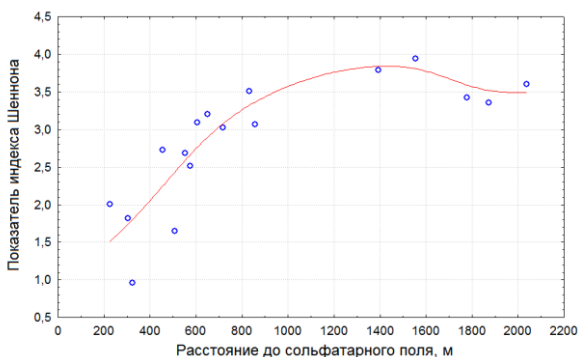


Рис. 2. Зависимость значений информационного индекса разнообразия Шеннона от расстояния до сольфатарного поля.

Заметно снижается показатель общей суммарной встречаемости всех видов эпифитных лишайников – в среднем в 3,5 раза – с 420–560 % на удаленных площадках и до 30–140 % на площадках, приближенных к сольфатарному полю (Adjusted $R^2 = 0,64$, $p = 7,529e-05$). При этом общее суммарное покрытие эпифитного лишайникового покрова незначительно

уменьшается с приближением к сольфатарному полю ($\text{Adjusted } R^2 = 0,2$, $p = 0,04$).

Изменения показателей встречаемости, количества видов и значений индексов разнообразия подтверждаются результатами многофакторного регрессионного анализа, где единственным достоверным фактором влияния на изменения лишайникового покрова в данном районе является расстояние до активных сольфатар. В регрессионном анализе были использованы 4 фактора: высота над уровнем моря, расстояние до кромки леса, сомкнутость крон, расстояние до активных сольфатар.

В градиенте воздействия сольфатарного поля происходит значительная смена видового состава эпифитных лишайников на стволах *P. glehnii*, что подтверждается результатами кластеризации исследуемых площадок (рис. 3) и непрямой ординации (рис. 4).

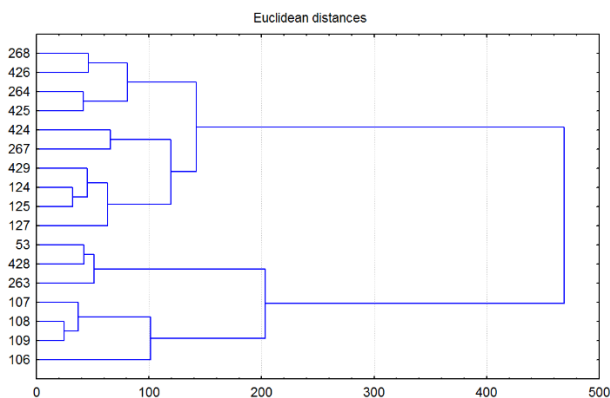


Рис. 3. Дендрограмма сходства 17 пробных площадей. Дистанции рассчитаны методом Уорда на основе характеристик лишайнобиоты.

По результатам кластеризации исследованных участков методом Уорда по значениям характеристик лишайнобиоты, включая видовые особенности распределения и значения встречаемости каждого вида, отчетливо выделяются 3 группы, которые можно интерпретировать как зоны воздействия сольфатарной активности на эпифитный лишайниковый покров на стволах *P. glehnii*: импактная (1), буферная (2) и фоновая (3) зоны.

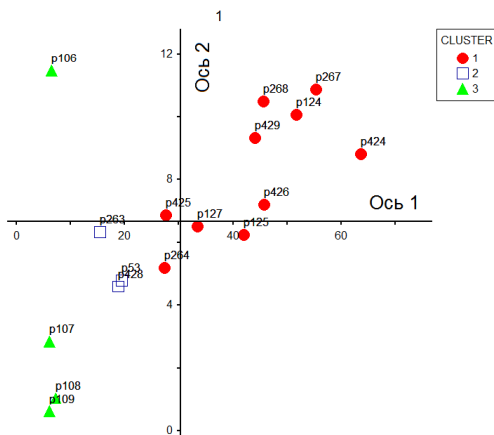


Рис. 4. Результаты непрямой ординация (DCA) пробных площадей. Ось 1: длина градиента 3,138 стандартных отклонения, EIG = 0,53. Ось 2: длина градиента 1,095 стандартных отклонения, EIG = 0,03. 1 – красные кружки (импактная зона), 2 – прозрачные квадраты (буферная зона), 3 – зеленые треугольники (фоновая зона).

На фоне изменения видового состава эпифитных лишайников на стволах *P. glehnii* в градиенте воздействия сольфатарного поля происходит значительная перестройка соотношения ведущих семейств, родов и порядков, а также их участия в сложении эпифитного лишайникового покрова.

Показатели ведущего семейства *Parmeliaceae* заметно уменьшаются с приближением к сольфатарному полю: общая суммарная встречаемость видов падает в 6 раз, общее суммарное покрытие видов падает в 3 раза, среднее количество видов на пробных площадях уменьшается в 2 раза. То есть доля в сложении эпифитного лишайникового покрова по среднему суммарному показателю покрытия всех видов этого семейства снижается с 65,8% до 26,3%.

Показатели второго ведущего семейства – *Pertusariaceae*, показывают более значительные изменения: общая суммарная встречаемость видов падает в 162 раза, общее суммарное покрытие видов в 60 раз, среднее количество видов на пробных площадях уменьшается в 4 раза. Доля в сложении эпифитного лишайникового покрова по среднему суммарному показателю покрытия всех видов этого семейства снижается с 11,4% до 0,2%. То есть наблюдается практически полное отсутствие всех представителей этого семейства на стволах *P. glehnii* с приближением к сольфатарному полю.

Значительное снижение показателей покрытия и встречаемости отмечено для большинства родов, которые образуют основные лишайниковые группировки на стволах *P. glehnii* в фоновых условиях: *Alectoria*, *Pertusaria*, *Hypogymnia*, *Parmelia*, *Bryocaulon*, *Mycoblastus*, *Ochrolechia*, *Platismatia*. Некоторые рода такие, как *Usnea*, *Lethariella*, *Megalospora* и др. полностью отсутствуют в импактной зоне.

При этом для ряда семейств и родов отмечен рост показателей встречаемости, покрытия и участия в сложении эпифитного лишайникового покрова с приближением к сольфатарному полю. Так, общее суммарное покрытие семейства *Cladoniaceae* увеличивается в 5,2 раза, встречаемость – в 1,6 раза. Доля в сложении эпифитного лишайникового покрова по среднему суммарному показателю покрытия этого семейства увеличивается с 5% до 29%, т.е. практически в 6 раз.

Заметное увеличение доли в сложении эпифитного лишайникового покрова по среднему суммарному показателю покрытия отмечено для семейства *Teloshistaceae* за счет одного вида *Caloplaca lucifuga* G. Thor. – с 1,3% до 29%, т.е. в 22,3 раза. Увеличение показателей покрытия и встречаемости в импактной зоне отмечено для таких родов, как *Cladonia*, *Caloplaca*, *Biatora*, *Imshaugia*, *Parmeliopsis*, *Xylopsora* и *Calicium*.

Для определенных родов (*Bryoria*, *Lopadium* и др.) было отмечено заметное увеличение показателей покрытия и встречаемости только в буферной зоне при достаточно сильном снижении этих показателей в фоновых условиях и на наиболее загрязненных участках.

Для порядков заметные отличия участия в различных зонах воздействия наблюдаются у *Pertusariales* и *Lecanorales*, участие видов которых уменьшается с приближением к сольфатарному полю. Представители порядков *Teloshistales* и *Umbilicariales*, напротив, увеличивают свое влияние в сложении эпифитного лишайникового покрова с приближением к сольфатарному полю за счет отдельных устойчивых видов. Порядки *Baeomycetales* и *Caliciales* увеличивают свое влияние в буферной зоне.

Кроме значительных систематических изменений, в эпифитном лишайниковом покрове на стволах *P. glehnii* в градиенте воздействия сольфатарной активности происходит кардинальная перестройка спектра жизненных форм лишайников. Заметно сокращаются показатели листоватых и кустистых повисающих лишайников с приближением к сольфатарному полю. Общее количество видов и встречаемость всех типов листоватой жизненной формы при этом падают в 2 раза, их общее суммарное покрытие сокращается в 5 раз. Снижаются показатели кустистых повисающих лишайников: общее покрытие до 2,3 раз, общая встречаемость в 4,3 раза, количество видов в 2,7 раз. При этом кустистые повисающие лишайники сохраняют высокие показатели покрытия в буферной зоне за счет одного вида – *Bryoria capillaris* (Ach.) Brodo & D. Hawksw.

Накипные и кустистые прямостоящие лишайники увеличивают свои показатели с приближением к сольфатарному полю. Общее суммарное покрытие накипных увеличивается в 1,3 раза, встречаемость в 2,1 раза, количество видов в 2,6 раз за счет накипной однообразно-чешуйчатой жизненной формы. Кустистые прямостоящие лишайники увеличивают встречаемость в 1,6 раз, покрытие в 5,3 раз, при этом сохраняя средний показатель количества видов в описаниях практически неизменным.

С приближением к сольфатарному полю в эпифитном лишайниковом покрове на стволах *P. glehnii* происходят заметные изменения экологических групп лишайников по субстратной приуроченности. Среднее количество

эпифитов уменьшается в 2,7 раза, их общее суммарное покрытие уменьшается в 1,8 раза. При этом общее суммарное покрытие всех типов эпиксильной группы, наоборот, увеличивается в 7,1 раза. Если их общая доля от общего суммарного покрытия в фоновой зоне равна 5%, то в импактной зоне она увеличивается до 39,3%.

5.3.2. Особенности изменения лишайникового покрова на основаниях стволов *Picea glehnii* на высоте до 0,6 м от уровня почвы (нижнем уровне)

Общее биоразнообразие лишайнобиоты на основаниях стволов ниже, чем на верхнем уровне поселения лишайников; среднее количество видов в описании составляет 9 видов, средние значения индекса Шеннона = 1,25, индекса Пиелу = 0,54.

На основаниях стволов *P. glehnii* с приближением к сольфатарному полю происходят несколько иные изменения параметров лишайникового покрова, чем на высоте 1,1–1,5 м. В градиенте воздействия на основании стволов не изменяется среднее количество видов на пробных площадях ($\text{Adjusted } R^2 = -0,005$, $p = 0,45$), и как следствие, не изменяется индекс Пиелу и индекс Шеннона ($\text{Adjusted } R^2 = 0,17$, $p = 0,18$), не изменяется общая встречаемость всех видов ($\text{Adjusted } R^2 = 0,09$, $p = 0,29$) и общее покрытие остается также неизменным ($\text{Adjusted } R^2 = 0,19$, $p = 0,04$).

При этом происходит довольно резкая смена видового состава эпифитных лишайников на основаниях стволов *P. glehnii*. На основаниях деревьев буферная зона не выявляется, что подтверждается результатами кластеризации исследуемых площадок (рис. 5) и непрямой ординации (рис. 6).

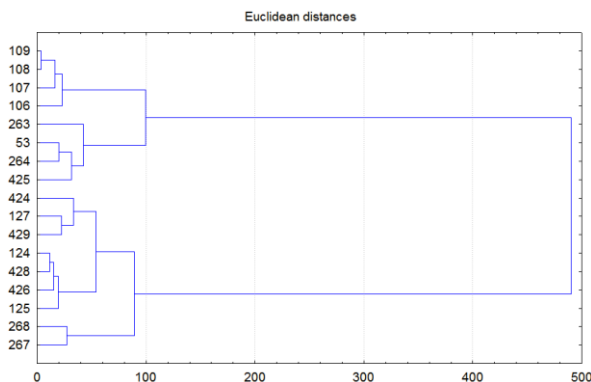


Рис. 5. Дендрограмма сходства 17 пробных площадей. Дистанции рассчитаны методом Уорда на основе характеристик лишайнобиоты.

По результатам кластеризации исследованных участков методом Уорда по значениям характеристик лишайнобиоты отчетливо выделяются 2 группы пробных площадей, которые можно интерпретировать как зоны

воздействия сольфатарной активности на эпифитный лишайниковый покров на основаниях стволов *P. glehnii*: фоновая (1) и импактная (2) зоны.

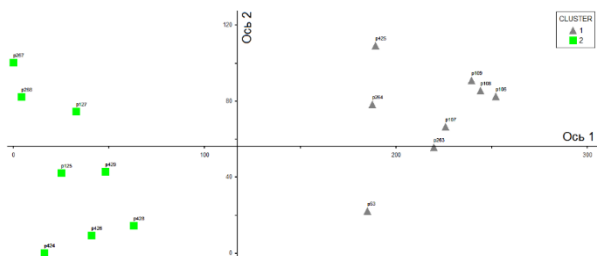


Рис. 6. Результаты непрямой ординация (DCA) пробных площадей. Ось 1: длина градиента 2,5 стандартных отклонения, EIG= 0,74. Ось 2: длина градиента 1,09 стандартных отклонения, EIG = 0,13. 1 – серые треугольнички (фоновая зона); 2 – зеленые квадраты (импактная зона).

При довольно резком изменении видового состава лишайников на основаниях стволов *P. glehnii* в градиенте воздействия сольфатарного поля не происходит значительной перестройки соотношения ведущих семейств, родов и порядков, как на верхнем уровне стволов. Ведущим семейством на основаниях стволов остается *Cladoniaceae*, суммарное покрытие всех представителей которого в фоновой зоне 21,4%, что составляет 91,9% от покрытия всех видов. В импактной зоне покрытие *Cladoniaceae* несколько увеличивается до 30,7%. Таким образом, смена видового состава происходит за счет изменения доминантных видов в пределах одного семейства – *Cladoniaceae*, и соответственно одного рода *Cladonia*. Кроме того, в импактной зоне на основаниях стволов увеличивается общее покрытие семейства *Teloshistaceae* в 3,9 раза за счет одного вида *Caloplaca lucifuga* G. Thor, доля которого составляет 11,9% от покрытия всех видов в данной зоне. Остальные рода и семейства играют менее заметную роль в сложении лишайниковых группировок на основаниях стволов. Итого, основными ведущими порядками в импактной зоне на основаниях стволов *P. glehnii* становятся *Lecanorales* и *Teloshistales*.

В спектре жизненных форм лишайников на основаниях стволов *P. glehnii* в градиенте воздействия сольфатарного поля увеличивается покрытие листоватых и накипных форм, а также отмечено некоторое увеличение кустистых прямостоящих лишайников.

С приближением к сольфатарному полю в эпифитном лишайниковом покрове на основаниях стволов *P. glehnii* увеличивается покрытие эпифитов в 8,3 раза – с 0,9% до 7,5%, а также эпиксильной группы в 6,9 раз, т.е. с 3,8% до 26,5%. Эпиксильная группа играет значительную роль на этом уровне поселения лишайников в импактной зоне, и их доля в суммарном покрытии здесь составляет 62,62%.

5.3.3. Чувствительность видов

Группы чувствительности лишайников, обитающих на *P. glehnii* были определены по приуроченности (на основании встречаемости и покрытия) видов к 3 зонам, выделенных кластеризацией методом Уорда по верхнему уровню поселения лишайников на стволах. Итого было выделено 4 группы чувствительности лишайников для *P. glehnii* к воздействию сольфатарного поля: виды толерантной группы (Т) приурочены к импактной зоне (I). Их количество не велико и насчитывает 7 видов: *Biatora* sp., *Xylopsora friesii* (Acharius) Bedinskby & Timbal, *Caloplaca lucifuga*, *Cladonia macilenta* Hoffm., *C. furcata* (Huds.) Schrad., *Imshaugia aleurites* (Ach.) S.L.F. Mey., *Parmeliopsis hyperopta* Ach. Показатели покрытия и встречаемости лишайников толерантной группы увеличиваются с приближением к сольфатарному полю.

Умеренно-толерантная группа (УТ) включает небольшое количество видов (до 9), которые отмечены во всех зонах воздействия с незначительными изменениями в градиенте воздействия либо с увеличением показателей покрытия и встречаемости в буферной зоне (2). К ним относятся группы – *B. capillaris*, *Lecanora symmicta* (Ach.) Ach., *Lopadium disciforme* (Flotow) Kullh., *Parmelia squarrosa* Hale, *Calicium* sp., *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., *Ramalina roesleri* (Hochst. ex Schaer.) Hue, *Rinodina* sp., *Tuckermannopsis americana* (Spreng.) Hale. Самый яркий представитель умеренно-толерантной группы – *B. capillaris*, его показатели покрытия и встречаемости резко увеличиваются в буферной зоне (II), в которой он становится доминантам лишайниковых группировок на *P. glehnii*.

Виды средне-чувствительной группы (СЧ) приурочены к зонам 2 и 3. Группа насчитывают 15 видов – в основном это широко распространённые лишайники *Alectoria lata* (Taylor) Linds., *Bacidia* sp., *Hypogymnia sachalinensis* Tchabanenko & McCune, *H. pseudophysodes* (Asahina) Rassad, *Cladonia coniocraea* (Flörke) Spreng., *C. gracilis* (L.) Willd., *Lepraria incana* (L.) Ach., *Cliostomum griffithii* (Sm.) Coppins, *Lepraria incana* (L.) Ach., *Scoliciosporum umbrinum* (Ach.) Arnold, *Mycoblastus sanguinarius* (L.) Norman, *Ochrolechia parella* (L.) A. Massal. и др. Средне-чувствительные виды увеличивают показатели покрытия и встречаемости с удалением от сольфатарного поля.

Чувствительная группа включает 24 вида, лишайники данной группы встречаются преимущественно в фоновой зоне, к ним относятся *Bryocaulon pseudosatoanum* (Asahina) Kärnefelt, *Brigantiaea nipponica* (M. Satô) Hafellner, *Bryoria nadvornikiana* (Gyeln.) Brodo & D. Hawksw., *Evernia mesomorpha* Nyl, *Hypogymnia pulverata* (Nyl. ex Cromb.) Elix, *H. vittata* (Ach.) Parrique, *Lethariella togashii* (Asahina) Krog., *Megalospora atrorubricans* subsp. *sendaiensis* (Räsänen) Sipman, *Menegazzia nipponica* K.H. Moon, Kurok. & Kashiw., *M. subsimilis* (H. Magn.) R. Sant., *Mycoblastus alpinus* (Fr.) Th. Fr. ex Hellb. и др. Лишайники чувствительной групп, как правило, имеют высокие показатели покрытия и встречаемости в фоновой зоне и никогда не встречаются в импактной зоне.

5.3.4. Содержание химических элементов в слоевищах лишайника *Bryoria capillaris* в районе северо-западного поля вулкана Менделеева

Для проведения анализов на содержание химических элементов в районе северо-западного сольфатарного поля вулкана Менделеева с 9 участков были взяты пробы широко распространённого лишайника *Bryoria capillaris* с коры *P. glehnii*. В наибольшей степени лишайниками накапливаются соединения серы. Валовое содержание общей серы варьирует от 625–745 мг/кг на контрольных участках и до 1320–3390 мг/кг в импактной зоне, т.е. максимальное превышение в лишайнике отмечено в 5,4 раза. Превышение концентраций в импактной зоне зарегистрировано также для Fe и Al – в 2,3 раза до 269 мг/кг и 2–3,5 раза до 192 мг/кг соответственно.

Для ряда элементов Al, Cr, Cu, Fe, Pb, S прослеживается статистически достоверная обратная экспоненциальная зависимость между их содержанием и расстоянием до активных сольфатар, что наиболее вероятно связано с аккумуляцией этих элементов из продуктов газовых выбросов сольфатарного поля.

Средние значения коэффициента обогащения Cu, Pb превышают 100, а S превышают 1000. Значимые коэффициенты корреляции Пирсона ($p < 0,05$) между содержанием этих элементов и расстоянием до сольфатарного поля указывают на явное не субстратное происхождение. Таким образом, в окрестностях северо-западного сольфатарного поля в слоевищах лишайниках отмечены превышения содержания ряда химических элементов как литогенного, так и вулканического происхождения.

Для пробных площадей было посчитано превышение содержания каждого из элементов в слоевище *B. capillaris* относительно пробной площади с наименьшими значениями. Данные (%) для каждой пробной площади были просуммированы. Полученные суммарные значения содержания поллютантов (%) коррелируют с такими параметрами лишайникового покрова, как среднее количество видов на пробных площадях (Adjusted R-squared: 0,47, p-value: 0,02), индекс Шеннона (Adjusted R-squared: 0,48, p-value: 0,02) и общая суммарная встречаемость всех видов лишайников (Adjusted R-squared: 0,49, p-value: 0,02).

Также была обнаружена связь между содержанием серы в талломах *B. capillaris* и покрытием доминантного индикаторного вида *C. lucifuga*, относящегося к толерантной группе. Показатели покрытия этого лишайника увеличиваются вместе со значениями содержания S (Adjusted R²: 0,68, p-value: 0,004).

5.4. Лишайниковый покров на стволах *Picea glehnii* в окрестностях геотермальной электростанции (ГеоТЭС) «Менделеевская» (о. Кунашир)

Полевые работы в районе геотермальной станции были проведены в 2014–2015 гг. в темнохвойных участках леса. В районе ГеоТЭС «Менделеевская» было заложено 16 площадок вокруг станции на различном расстоянии с минимальным расстоянием в 120 м и максимальным – в 1000 м от основных труб.

Учет лишайников проводился на одной древесной породе, доминирующей в этом районе – *P. glehnii*. Всего на ели Глена в данном районе было зарегистрировано 49 видов лишайников. Доминанты те же, что и в фоновых районах северо-западного поля вулкана Менделеева – это представители родов *Hypogymnia*, *Alectoria*, *Pertusaria*, *Bryoria*, *Cladonia*, *Usnea* и др. Период воздействия данного источника на окружающую среду составляет не более 15 лет, т.е. с момента разработки геотермальных скважин и последующего запуска электростанции. Кроме ГеоТЭС, в качестве источника загрязнения здесь отмечена действующая автодорога, ведущая к станции, которая стала активной с момента появления станции. Расстояния до данных источников были выбраны в качестве независимых переменных для проведения регрессионного анализа. Исследования лишайникового покрова *P. glehnii* в окрестностях ГеоТЭС «Менделеевская» проводились только на верхнем уровне ствола 1,1–1,5 м.

5.4.1. Особенности изменения лишайникового покрова на стволах *Picea glehnii* на высоте 1,1–1,5 м от уровня почвы (верхнем уровне)

По результатам исследования лишайникового покрова на стволах *P. glehnii* в окрестностях ГеоТЭС «Менделеевская» было отмечено, что с приближением к источникам загрязнения количество видов на площадках падает незначительно, в среднем в 1,4 раза – с 13–22 видов на удаленных площадках и до 6–15 видов на наиболее приближенных площадках. Достоверных моделей, указывающих на изменение количества видов на площадках в зависимости от расстояния до основных источников загрязнения – ГеоТЭС и автодороги получено не было (Adjusted R-squared = 0,13, p-value: 0,15). Значения индекса Шеннона и Пиелу с приближением к источникам загрязнения не изменяются: на удаленных площадках индекс Шеннона в среднем равен 3,04, индекс Пиелу равен 0,81; на наиболее приближенных площадках индекс Шеннона в среднем равен 2,99, индекс Пиелу равен 0,79.

Общее суммарное покрытие всех видов лишайников с приближением к ГеоТЭС падает в среднем в 1,7 раза – с 50,7–28,1% на удаленных площадках и до 30–9,2% на площадках, наиболее приближенных к ГеоТЭС. Для общей суммарной встречаемости всех видов лишайников отмечено падение в среднем в 1,6 раза – с 463–265% на удаленных площадках до 320–140% на площадках, наиболее приближенных к ГеоТЭС. По результатам не прямой ординации DCA не был выявлен градиент, отражающий влияние экологических факторов на формирование видовой структуры эпифитного лишайникового покрова в районе исследования. Таким образом, в районе исследования за 15 лет эксплуатации объектов не произошла смена видового состава. Следовательно, выделить устойчивые или чувствительные виды к данному типу загрязнения на этом этапе воздействия не представляется возможным.

5.4.2. Оценка повреждений слоевищ лишайников на стволах *Picea glehnii*

В районе исследований с приближением к источникам загрязнения было отмечено изменение жизнестойкости слоевищ. По этой причине для оценки

состояния лишайникового покрова в данном районе был использован метод оценки некротических поражений слоевищ. Некроз лишайников рассчитывался по предложенной формуле (1). В качестве модельных видов были выбраны широко распространённые лишайники листоватой жизненной формы, у которых наиболее заметны некротические поражения. К таким видам относятся *Hypogymnia pulverata* (Nyl. ex Cromb.) Elix, *H. sachalinensis* Tchabanenko & McCune, *H. vittata* (Ach.) Parrique, *Parmelia fertilis* Müll. Arg., *P. squarrosa* Hale и *Platismatia interrupta* W. L. Culb. & C. F. Culb. и др.

В результате проведенного регрессионного анализа был получен ряд достоверных моделей, где в качестве факторов воздействия используются расстояния до обоих источников загрязнения. Самый высокий R^2 получили модели при использовании отдельных модельных видов: *H. sachalinensis* (Adjusted R^2 : 0,72, p-value: 0,0001) и *P. interrupta* (Adjusted R^2 : 0,64, p-value: 0,0008).

При проведении однофакторных регрессионных анализов с использованием тех же факторов воздействия по отдельности, более сильное влияние на значения некроза модельных видов лишайников показал фактор расстояния до ГеоТЭС по сравнению с фактором расстояния до дороги.

По результатам значений большинства полученных вариантов оценки повреждений слоевищ (N) на графике выделяются всего 2 зоны воздействия с резким перепадом значений: импактная зона на расстоянии до 300 м, где значения N самые высокие от 40 до 85%, и условно фоновая зона на расстоянии более 300 м от ГеоТЭС, где значения N не превышают 20%, т.е. показатели повреждений основных доминантов увеличиваются с приближением к основному источнику загрязнения в среднем в 5,2 раза.

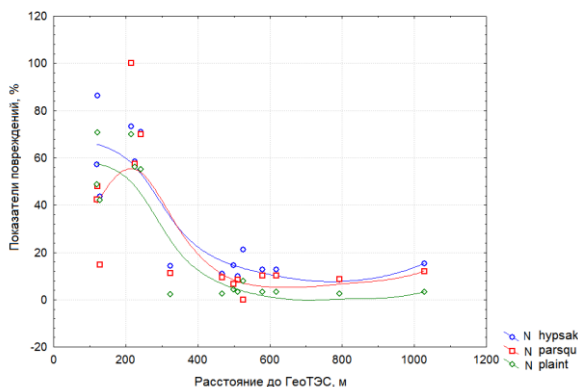


Рис. 7. Изменения показателей повреждений модельных видов *Hypogymnia sachalinensis* (N_hypsak), *Parmelia fertilis* (N_parsqu) и *Platismatia interrupta* (N_plaint) в зависимости от расстояния до ГеоТЭС

5.4.3. Содержания химических элементов в слоевищах лишайника *Platismatia interrupta* в окрестностях ГеоТЭС «Менделеевская»

Для проведения анализов на содержание химических элементов в окрестностях ГеоТЭС «Менделеевская» с 9 участков были взяты пробы широко распространённого лишайника *P. interrupta* с коры ели *P. glehnii*.

В районе исследований наибольшее превышение отмечено для As. Валовое содержание As варьирует от 0,8–2,6 мг/кг на контрольных участках и до 5–9 мг/кг в импактной зоне, т.е. максимальное превышение содержания As в лишайнике отмечено в 11,6 раза. Для других элементов сильных превышений концентраций в импактной зоне по сравнению с контрольными участками отмечено не было.

По результатам регрессионного анализа только для As прослеживается статистически достоверная обратная экспоненциальная зависимость между его содержанием и расстоянием до ГеоТЭС (Adjusted R²: 0,86, p-value: 0,001). Содержание As также имеет значимые связи со значениями общей суммарной встречаемости всех видов (Adjusted R-squared: 0,62, p-value: 0.007) и значениями общего суммарного покрытия (Adjusted R-squared: 0,42, p-value: 0.03). Более сильные связи были обнаружены между содержанием As и показателями повреждений слоевищ. Максимальные коэффициенты детерминации были получены для *Hypogymnia sachalinensis* и *Platismatia interrupta* (Adjusted R-squared: 0,86, p-value: 0,0002). Среднее значение коэффициента обогащения для As превышает 100, что говорит о не субстратном происхождении данного элемента.

5.5. Лишайниковый покров в районе завода СПГ (о. Сахалин)

Полевые работы в районе завода СПГ были проведены в 2012–2015 годах в темнохвойных участках леса. В районе исследований было заложено 19 площадок на различном расстоянии от завода – от 292 м до 7998 м, минимальное расстояние от дороги – 255 м. Период воздействия основных источников загрязнения – СПГ и автодороги, проходящей вдоль побережья Анивского залива, составляет не более 15 лет (автодорога стала наиболее активна во время строительства завода).

Учет лишайников проводился на одной древесной породе, доминирующей в этом районе – *Abies sachalinensis*. Всего на пихте сахалинской в данном районе было зарегистрировано 76 видов лишайников. Доминантами выступают представители родов *Parmelia*, *Hypogymnia*, *Pertusaria*, *Buellia*, *Lecanora*, *Graphis* и др. Исследования лишайникового покрова *A. sachalinensis* в окрестностях завода СПГ проводились только на верхнем уровне ствола 1,1–1,5 м.

5.5.1. Особенности изменения лишайникового покрова на стволах *Abies sachalinensis*

После выполнения рекогносцировочных работ было выяснено, что однородных участков темнохвойного леса со схожей возрастной структурой в данном районе нет по причине нарушенности большинства участков темнохвойного леса. Средний возраст древостоя на выбранных участках

варьировал от 41 до 86 лет, который значительно влиял на видовой состав эпифитных лишайников на пробных площадях (Adjusted R²: 0,66, p-value: 1,566e-05). Отличительной чертой для исследуемого района с приближением к источникам загрязнения было изменение жизнеспособности слоевищ. Поэтому для построения градиента воздействия на лишайниковый покров в данном районе был использован метод оценки некротических поражений слоевищ. Некроз лишайников рассчитывался по формуле (1). Для расчета показателей повреждений были выбраны широко распространённые лишайники листоватой жизненной формы, у которых наиболее заметны некротические поражения. К таким видам относятся *Hypogymnia pulverata* (Nyl. ex Cromb.) Elix, *Hypogymnia sachalinensis*, *Parmelia fertilis*, *P. squarrosa* и *P. interrupta*, *Menegazzia subsimillis* (H. Magn.) R. Sant и др.

В регрессионном анализе для выявления потенциальных источников воздействия на состояние лишайниковых сообществ был использован ряд факторов: расстояние до завода СПГ относительно периметра; расстояние до самой высокой трубы; расстояние до участков автодороги в данном районе; расстояние до активных лесных просек; расстояние до старых непроезжих просек и неактивных участков проведения строительных работ, включая периметр строительного городка, который в настоящее время не используется, но был активным во время строительства производственного комплекса «Пригородное» и мог повлиять на состояние слоевищ эпифитных лишайников; высота над уровнем моря; расстояние до моря.

По результатам сравнения информационного критерия Акаике наилучшим образом дисперсию зависимых переменных объясняют модели, в которых используется расстояние до участков автодороги.

При использовании 2-х модельных видов *Parmelia fertilis* и *P. squarrosa* (N2): Adjusted R² = 0,68, p-value: 3,057e-05. При использовании 3-х модельных видов *P. fertilis*, *P. squarrosa* и *M. subsimillis* (N3): Adjusted R² = 0,69, p-value: 0,0001463. Также был апробирован вариант подсчета средней площади повреждённых слоевищ, где все листоватые макролишайники рассматривались как единый эпифитный лишайниковый покров без видового разделения (N_{ALL}). Данный вариант также имеет значимую корреляцию с расстоянием до автодороги (Adjusted R²: 0,73, p-value: 2,2e-06).

По показателю повреждений слоевищ (рис. 8) выделяются 3 участка, которые можно интерпретировать как зоны влияния: импактная зона на расстоянии до 500 м, где значения повреждений самые высокие от 50 до 75%; буферная зона на расстоянии от 500 до 2700 м, где значения *N* находятся в пределах 35–50%, фоновая зона на расстоянии более 2700 м, где значения *N* не превышают 20%. Таким образом, с приближением к автодороге повреждения слоевищ основных доминантов увеличиваются в среднем в 3 раза.

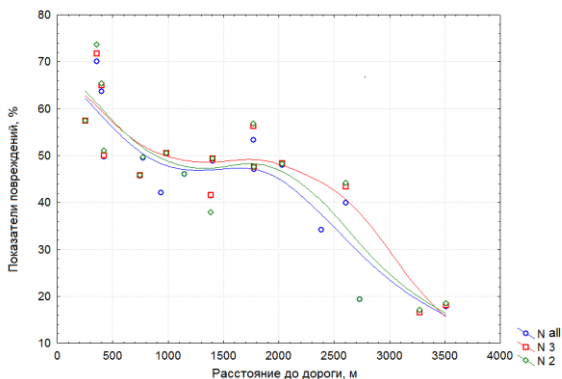


Рис. 8. Зависимость показателей повреждения слоевищ при использовании групп индикаторных видов от расстояния до дороги в районе завода СПГ.

5.5.2. Содержание химических элементов в слоевищах лишайника *Parmelia squarrosa* в окрестностях завода СПГ

Для проведения анализов на содержание химических элементов в окрестностях завода СПГ с 19 участков были взяты пробы лишайника *P. squarrosa* с коры пихты сахалинской. Участки совпадали с пробными площадями, где проводились исследования лишайникового покрова на *A. sachalinensis*.

В 6 точках отбора проб в импактной зоне, т.е. на расстоянии 1–1,3 км вдоль участка автодороги отмечено превышение концентраций большинства исследуемых элементов от 2 до 17 раз по сравнению со средними значениями удаленных точек контроля. Наибольшее превышение отмечено для Co – в 17 раз до 7,3 мг/кг, Cr – в 8 раз до 15 мг/кг, Mn – в 7 раз до 2945 мг/кг, Ni – в 5 раз до 11,4 мг/кг, Mo и Fe – в 4 раза до 0,7 мг/кг и 3693 мг/кг соответственно.

В результате проведения регрессионного анализа и ранжирования возможных моделей, описывающих воздействие факторов на значения содержания элементов в талломах *P. squarrosa* (выполнялось для каждого из элементов), по информационному критерию Акаике были установлены статистически достоверные модели для Al, Cr, Ni, Cu, As, Mo, где автодорога является основным фактором воздействия. Для Fe, Co и Pb были получены двухфакторные модели, где вместе с дорогой вторым фактором для Fe и Co стала высота над уровнем моря, а для Pb – расстояние до активных просек. Достоверных моделей, указывающих на связь воздействия завода с уровнем накопления химических элементов в слоевищах лишайников не обнаружено.

Незначительное превышение уровня накопления As, Mo и Cu (относительно условной границы литогенного/антропогенного происхождения EF = 5) в 10,5, 12,5 и 13,3 раза соответственно, а также значимая связь их содержания в лишайниках с расстоянием до автодороги свидетельствуют о том, что их содержание обусловлено разрушением дорожного полотна и переносом автотранспортом пыли.

Суммарные значения содержания поллюантов (%) коррелируют с показателями повреждений слоевищ при использовании всех видов листоватых макролишайников в районе исследований (Adjusted R-squared: 0,3, p-value: 0,01). Небольшой, но статистически достоверный коэффициент детерминации, полученный в однофакторной модели с достаточно большим весом относительно двух вариантов моделей по информационному критерию Акаике – 0,9, вероятно, объясняется нестабильным воздействием различных источников загрязнения в окрестностях завода СПГ, а также сохранением некротических поражений слоевищ лишайников в течение продолжительного периода времени, когда могли действовать другие источники загрязнения. Кроме того, не исключается вероятность воздействия других поллюантов, содержание которых не исследовалось в слоевищах лишайников.

ВЫВОДЫ

1. В районах исследований на стволах *Picea glehnii* было зарегистрировано 67 видов лишайников, относящихся к 8 порядкам, 19 семействам и 36 родам. К ведущим семействам по числу видов относятся *Parmeliaceae*, *Pertusariaceae*, *Cladoniaceae*. На стволах *Abies sachalinensis* было зарегистрировано 76 видов лишайников, которые относятся к 9 порядкам, 19 семействам и 37 родам. К ведущим семействам по числу видов относятся *Parmeliaceae*, *Ramalinaceae*, *Pertusariaceae*. В общем списке видов выявлено 33 вида лишайников, новых для островов Сахалин и Кунашир, из них 1 вид новый для России и 1 вид новый для Дальнего Востока.
2. В сообществах пихтово-еловых лесов фоновой зоны лишайниковый покров на стволах *Picea glehnii* на высоте 1,1–1,5 м характеризуется относительно невысоким видовым разнообразием (20–27 видов) и значительной выравненностью участия видов (индекс Пиелу – 0,85–0,96). Основу покрова формируют представители родов *Alectoria*, *Bryoria*, *Hypogymnia*, *Pertusaria*, *Bryocaulon*. На основаниях стволов число видов эпифитных лишайников составляет 6–14, видовая структура покрова отличается большей неоднородностью (индекс Пиелу – 0,55–0,82), обусловленной доминированием представителей одного рода – *Cladonia*.
3. В окрестностях сольфатарного поля вулкана Менделеева общее проективное покрытие эпифитных лишайников на высоте 1,1–1,5 м и на основаниях стволов *Picea glehnii* по сравнению с фоном не изменяется. По видовой структуре эпифитного лишайникового покрова выделяются 2 зоны воздействия – импактная и буферная. В пределах буферной зоны изменения наблюдаются только на высоте 1,1–1,5 м и проявляются в снижении участия в покрове представителей родов *Alectoria*, *Pertusaria*, *Bryocaulon*. В импактной зоне в пределах до 700 м от сольфатарного поля происходит в среднем 3-кратное снижение числа видов эпифитных лишайников, существенное изменение видового состава и усиление неоднородности распределения покрытий видов (индекс Пиелу до 0,24–0,55). На высоте 1,1–1,5 м и на основаниях стволов выраженными доминантами эпифитного покрова

становятся *Calopla calucifuga* и *Cladonia macilenta*, кроме того, на стволах появляются *Xylopsora friesii* и *Parmeliopsis hyperopta*.

4. На основе оценки воздействия сольфатарного поля на эпифитный лишайниковый покров выделены 4 группы лишайников с различной степенью устойчивости к фумарольным газам: толерантные, умеренно-толерантные, средне-чувствительные и чувствительные. К группе толерантных видов, отсутствующих в фоновой зоне и формирующих основу покрова в импактной зоне, относятся *Xylopsora friesii*, *Caloplaca lucifuga* и *Cladonia macilenta*. К группе умеренно-толерантных видов, встречаемость которых существенно не меняется по градиенту загрязнения, относятся *Bryoria capillaris* и *Lopadium disciforme*. К группе средне-чувствительных видов, отсутствующих в импактной зоне, относятся *Alectoria lata*, *Hypogymnia sachalinensis*, *Ochrolechia parella*. К группе чувствительных видов, не переносящих загрязнение данного типа, относятся *Bryocaulon pseudosatoanum*, *Lethariella togashii*, *Megalospora atrorubricans*. Индикаторами данного типа загрязнения служат толерантные виды *Xylopsora friesii*, *Calopla calucifuga*, *Cladonia macilenta*, а также отличающиеся высокой чувствительностью представители родов *Bryocaulon*, *Usnea* и *Pertusaria*.

5. В импактной зоне на расстоянии до 300 м от геотермальной электростанции «Менделеевская» наблюдается снижение общего покрытия эпифитного лишайникового покрова в среднем в 1,7 раза и увеличение площади повреждений слоевищ доминантных видов лишайников в среднем в 5,2 раза при отсутствии существенного изменения видового состава.

6. На расстоянии до 3 км от завода по сжижению природного газа наблюдается в среднем 3-кратное увеличение площади повреждений слоевищ доминантных видов лишайников, которое не коррелирует с расстоянием до источника выбросов. Причина повреждения талломов лишайников не установлена.

7. В районах сольфатарного поля и геотермальной электростанции выявлена значимая связь уровня накопления элементов-загрязнителей в слоевищах лишайников с параметрами эпифитного лишайникового покрова. Для буферной зоны сольфатарного поля характерно 2-кратное превышение фоновых значений содержания серы в слоевищах *Bryoria capillaris*, для импактной зоны — 3–5-кратное. Импактная зона геотермальной электростанции «Менделеевская» характеризуется 6–12-кратным превышением фонового содержания мышьяка в слоевищах *Platismatia interrupta*.

8. При лишеноиндикационной оценке влияния сольфатарной деятельности на окружающую среду оптимально использование методов, базирующихся на оценке видового разнообразия и встречаемости видов. На ранних этапах эксплуатации техногенных объектов рекомендуется оценка повреждений талломов лишайников.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК

1. **Ежкин А.К.**, Цырендоржиева О.Ж. Условия обитания и распространение рода *Menegazzia* A. Massal. в южной части острова Сахалин // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Том 14, № 1. С.1727–1730.
2. **Ежкин А.К.**, Жарков Р.В., Кордюков А.В. Оценка воздействия геотермальной электростанции «Океанская» (вулкан Баранского, о-в Итуруп) на окружающую среду методом лишеноиндикации // Вестник ДВО РАН. 2015. № 2. С 109–117.
3. Кордюков А.В., **Ежкин А.К.**, Жарков Р.В. Содержание тяжелых металлов и серы в лишайнике *Bryoria capillaris* в окрестностях северо-западного сольфатарного поля вулкана Менделеева (о. Кунашир, Курильские о-ва) // Проблемы региональной экологии. 2016. №1. С. 50–54.

Статьи в прочих изданиях

1. **Ежкин А.К.**, Цырендоржиева О.Ж. Индикаторные виды лишайников елово-пихтовых лесов юга острова Сахалин // Научная молодежь – северо-востоку России. Материалы IV межрегиональной конференции молодых ученых, приуроченной к 35-летию юбилею Музея естественной истории СВКНИИ ДВО РАН. Магадан, 2012. С. 120–122.
2. **Ezhkin A.K.** Morphological changes and damages of indicator lichens of the Sakhalin Island // Современная Фитоморфология. Материалы II международной научной конференции по морфологии растений. Львов, 2013. С. 115–116.
3. **Ежкин А.К.**, Жарков Р.В. Оценка воздействия старозаводского сольфатарного поля и ГеоТЭС "Океанская" на природную среду вулкана Баранского методом лишеноиндикации // Вулканизм, биосфера и экологические проблемы. Материалы VII международной научной конференции. Майкоп, 2013. С. 218–221.
4. Kondratyuk S.Y., Lőkös L., Zarei-Darki B., Haji Moniri M., Tchabanenko S.I., Galanina I., Yakovchenko L., Hooshmand F., **Ezhkin A.K.**, Hur J.-S. Five New *Caloplaca* species (*Teloschistaceae*, *Ascomycota*) from Asia // Acta Botanica Hungarica. 2013. P. 41–60.
5. Сабиров Р.Н., Сабирова Н.Д., Ктиторов П.С., Сундуков Ю.Н., Савченко Г. Г., **Ежкин А.К.**, Грищенко М.Ю. Памятник природы «Вулкан Менделеева» на острове Кунашир // Вестник Сахалинского музея. 2014. № 21. С. 290–318.
6. **Ежкин А.К.**, Галанина И.А. Дополнение к лишенобиоте острова Сахалин // Новости систематики низших растений. 2014. Т. 48. С. 233–248.
7. **Ежкин А.К.**, Кордюков А.В. Оценка влияния фумарольной активности вулкана Менделеева на природную среду методом лишеноиндикации // Географические и геоэкологические исследования на Дальнем Востоке. Материалы XII молодежной конференции с элементами научной школы. Владивосток, 2014. Вып. 10. С. 46–48.

8. Кордюков А.В., **Ежкин А.К.** ГИС-технологии в экологических исследованиях (опыт использования на примере лишеноиндикации) // Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска. Материалы всероссийской научной конференции с международным участием. Южно-Сахалинск, 2015. Т. 2. С. 383–387.

9. **Ежкин А.К.**, Кордюков А.В. Особенности изменения параметров эпифитного лишайникового покрова в окрестностях вулкана Менделеева (о-в. Кунашир, Южные Курилы) // Бюллетень Ботанического сада-института ДВО РАН. 2016. № 15. С.26–28.

10. **Ежкин А.К.**, Кордюков А.В. Оценка разрушения эпифитного лишайникового покрова в окрестностях завода СПГ, о. Сахалин // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз. Материалы VI Сахалинской молодежной научной школы. Южно-Сахалинск, 2016. С. 368–372.

11. **Ежкин А.К.** Лишайники древесных субстратов в местах проявления сольфатарной активности вулкана Менделеева, о. Кунашир // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз. Материалы VI Сахалинской молодежной научной школы. Южно-Сахалинск, 2016. С. 372–374.