

УДК 630*11+630*160.21+630*416.16

ЖИЗНЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ХВОИ ПИХТЫ СИБИРСКОЙ *Abies sibirica* Ledeb. В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПРОИЗРАСТАНИЯ В ЗАПАДНОМ САЯНЕ

Е. В. Бажина

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – Обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

E-mail: genetics@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 09.12.2015 г.

Проведена комплексная оценка жизненного состояния разновысотных темнохвойных лесных биоценозов северного, избыточно влажного макросклона хр. Западный Саян. Исследования проводили в течение ряда лет (2001–2013) в низкогорном (450 м над ур. м.), среднегорном (700–800 м над ур. м.) и высокогорном (1450 м над ур. м.) высотных поясах. Все обследованные биоценозы относятся к категории поврежденных, индекс жизненного состояния варьирует от 36.4 (в среднегорном умеренно холодном поясе) до 81.1 (в низкогорном умеренно теплом поясе). Деревья кедров сибирского не имеют признаков повреждения, деревья пихты сибирской усыхают по характерному для данного вида подверхушечному типу. Выявлены значительные различия продуктивности деревьев пихты в высотно-поясном отношении. Биометрические показатели (прирост и параметры хвои) побегов пихты сибирской женской и мужской сексуализации, а также вегетативных различаются. В средне- и высокогорных экосистемах биометрические показатели побегов в целом уменьшаются, а доля повреждения хвои (хлорозы и некрозы) значительно увеличивается. Элементный состав хвои деревьев пихты сибирской в горных темнохвойных лесных биоценозах изменяется: отмечено накопление таких техногенных элементов, как свинец и кадмий, при значительном снижении содержания цинка. Изменения химического состава приводят к изменениям соотношений биофильных и техногенных элементов (Mn/S, Fe/Mn, F/Ca) в высокогорных древостоях в 2.2–3.6 раза, в среднегорных сильно усыхающих – в 1.4–3.7 раза. Предполагается, что изменения элементного состава хвои пихты сибирской свидетельствуют о наличии загрязнения региона.

Ключевые слова: пихта сибирская *Abies sibirica* Ledeb., жизненное состояние разновысотных биоценозов, биометрические характеристики побегов и хвои, элементный состав хвои, Западный Саян.

DOI: 10.15372/SJFS20160610

ВВЕДЕНИЕ

Деревья являются великолепными биоиндикаторами экологической обстановки. Жизнеспособность, морфологическая структура, накопление и обмен веществ у древесных растений отражают реакцию их на режим и динамику внешних факторов (Протопопов, 1975; Горчаковский, Шиятов, 1976). В горных экосистемах значительные изменения обмена веществ и координатии процессов роста и развития деревьев приводят к уменьшению общего числа побегов, нарушениям соотношения роста терминальных и латеральных побегов, повреждениям побегов

и хвои, изменению формы крон, нарушениям репродуктивных процессов (Wardle, 1968; Воробьев, 1977; Tranquillini, 1979; Weisberg, Baker, 1995). В горах Южной Сибири (Западный и Восточный Саяны, Хамар-Дабан, Кузнецкий Алатау) в последние десятилетия наблюдается интенсивное усыхание деревьев пихты сибирской *Abies sibirica* Ledeb., сопровождающееся изменениями габитуса и нарушениями продукционных процессов, дисбалансом химического состава хвои (Бажина, Третьякова, 2001; Бажина и др., 2013).

Элементный состав растений является устойчивым генетически наследуемым пока-

зателем, жестко контролируемым системой их гомеостаза. Специфику биологического круговорота веществ и, как следствие, различия элементного состава растений одного вида в различных условиях произрастания обуславливают генетические особенности популяций (Никонов и др., 1987; Ковалевский, 1991; Тараканов и др., 2007). Однако различные типы природных и антропогенных стрессов вызывают нарушения продукционных процессов, изменения состава фитомассы и, как следствие, нарушение гомеостаза растений (Кулагин, Шагиева, 2005; Лукина, Черненкова, 2008; Михайлова и др., 2010). В ряде случаев, особенно при загрязнении, избыток (недостаток) ионов в среде приводит к значительному дисбалансу в составе ассимиляционной массы в связи с чрезмерным, в том числе и фоллиарным, поглощением химических элементов (Лукина и др., 1994; Михайлова, Бережная, 2002). Изменения химического состава фитомассы деревьев отражаются на процессах роста побегов и формирования кроны, развитии и пропорциях различных типов почек, что рассматривается в качестве макроскопических индикаторов стрессовых условий состояния (Polak et al., 2007).

Цель данной работы – оценка жизненного состояния и выявление особенностей повреждения, морфологии побегов и элементного состава хвои здоровых и усыхающих деревьев пихты сибирской *Abies sibirica* Ledeb. в разновысотных лесных экосистемах хр. Западный Саян.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в разновысотных темнохвойных лесных биоценозах северного макросклона хр. Западный Саян в 2001–2013 гг. Это избыточно влажный район темнохвойных (кедрово-пихтовых) лесов. Континентальность климата нарастает от вершин гор к межгорным котловинам (Хромов, 1983). Максимум осадков (до 1600 мм) выпадает на наветренных склонах, в подветренных частях гор и котловинах – до 500 мм (Поликарпов и др., 1986). Всего заложили 8 пробных площадей (ПП), из которых 3 – в окрестностях пос. Танзыбей (низкогорный черневой пояс, умеренно теплый, сумма активных температур 1100–1800 °С, крупнотравно-папоротниковая группа типов леса). ПП 1 и ПП 3 – в долине р. М. Кебеж, ПП 2 – в верховьях р. Белая.

ПП 4 и 5 заложили в среднегорном таежном поясе (умеренно холодный, сумма активных

температур 700–1200 °С, крупнотравно-папоротниковая группа типов леса), ПП 6, 7 и 8 – в урочище Ойское озеро (субальпийский пояс, холодный, сумма активных температур 300–700 °С, крупнотравная субальпийская группа типов леса).

В районе исследований отсутствуют мощные промышленные источники загрязнения, проходит автомобильная трасса федерального значения М53, в низкогорном поясе расположены сельские поселения, активно функционирует дорожно-строительное управление с сопутствующим производством асфальта. Исследования сульфатов, тяжелых металлов (Pb, Cd, As, Hg) и фтора в снежном покрове хр. Западный Саян (природный парк «Ергаки») показали, что содержание их ниже ПДК, наибольшие значения отмечены в высокогорном поясе – оз. Ойское (Новоселова и др., 2008), что может быть связано с дальним переносом (100 км) со стороны Саяногорского алюминиевого завода, являющегося третьим по объемам производства предприятием в составе РУСАЛа. Специфическими элементами выбросов завода являются F, Al и Na, а заводских тепловых станций – Ca и Mg (Давыдова, 2007).

Оценку жизненного состояния биоценозов провели по методике В. А. Алексеева (1989). Описали морфоструктуру кроны 30 модельных деревьев. Возраст деревьев определили с использованием таксационных таблиц, у срубленных модельных деревьев – по числу годичных колец. Для характеристики морфологии побегов на каждой ПП с 25 деревьев в возрасте 60–250 лет (для определения возраста деревьев отбирали керны) собрали 20–25 побегов различной сексуализации последних 5–10 лет. В лабораторных условиях побеги анализировали по следующим показателям: длина, диаметр, охвоенность и ветвление побегов, длина, толщина и масса воздушно-сухой хвои, повреждения (некрозы и хлорозы) хвои (доля и характер).

Для анализа элементного состава со здоровых и усыхающих деревьев (не менее 10 экз. на ПП) в конце вегетационного периода (август) отобрали по 300 г 1–2-летней хвои. Образцы хвои объединили по высотным поясам. Хвою высушили в помещении без доступа солнца до воздушно-сухого состояния. Анализ проб проведен в аккредитованной испытательной лаборатории ФГУ Государственного центра агрохимической службы «Красноярский». Образцы хвои перед анализом не отмывали. В хвое определили содержание общего азота (ГОСТ

13496.4-93), фосфора (ГОСТ 26657-97), кальция (ГОСТ 26570-96), магния (ГОСТ 30502-97), натрия (ГОСТ 30503-97), калия (ГОСТ 30504-97), серы (МУ, 2004), меди, цинка, свинца, кадмия (ГОСТ 30692-00), марганца (ГОСТ 27998-88), железа (ГОСТ 27998-88), кобальта (ОСТ 10.155-88), ртути (МУ 5178-90), фтора (МУ 1995). Для статистической обработки материала использовали пакет программ Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пихта сибирская характеризуется рядом биологических свойств, характерных только для данного вида: узкопирамидальной формой кроны, которая создается мутовчатым ветвлением, плагиотропизмом ветвей, а также ярусностью кроны по типам сексуализации, изменяющейся по продольному градиенту (Некрасова, Рябинов, 1978; Минина, Третьякова, 1983; Третьякова, Бажина, 1995). Анализ модельных деревьев пихты сибирской в экосистемах Западного Саяна показал, что узкопирамидальность кроны сохраняется на протяжении всей жизни деревьев, значительное количество межмутовочных ветвей (до 14–23 экз./м по оси ствола) создает их густокронность. Начиная с высоты 700 м над ур. м., деревья пихты интенсивно усыхают по характерному для данного вида подверхушечному типу (Третьякова, Бажина, 1995). У усыхающих деревьев ниже усохшей части кроны и особенно в вегетативном ярусе угол отхождения ветвей от оси ствола увеличивался до 150°. Верхняя граница зоны усыхания деревьев совпадает с верхней границей мужского генеративного яруса. Морфологические параметры побегов различной сексуализации деревьев пихты сибирской, растущих в разновысотных поясах, различаются (табл. 1). Максимальным приростом характеризуются побеги деревьев, произрастающих в низкогорных условиях, что, очевидно, обусловлено большей длиной вегетационного периода (на 1–2 нед. по сравнению с высокогорьем). С увеличением высоты местности прирост и диаметр побегов уменьшаются на 2.1–46.7 и 2.2–59.2 % соответственно, тогда как количество хвои на единицу длины побега увеличивается на 0.9–39.4 %. Максимальный размах варьирования отмечен для охвоенности побегов женской сексуализации.

Биометрические характеристики хвои деревьев пихты сибирской также изменяются в различных высотных поясах, однако отличия

Таблица 1. Характеристика побегов пихты сибирской

| № ПП | Сексуализация побегов | Прирост, см/год | Диаметр, мм | Число хвоинок на 10 см побега, шт. |
|------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------------------|
| | | | | |
| 1 | Женские | 4.5 ± 0.05 1.5 | 4.9 ± 0.60 18.4 | 175 ± 5.0 40.2 |
| | Мужские | 4.4 ± 0.40 24.0 | 4.5 ± 0.30 22.0 | 232 ± 1.9 23.0 |
| | Вегетативные | 4.8 ± 0.23 13.0 | 2.4 ± 0.27 29.2 | 153 ± 2.6 45.2 |
| 2 | Женские | 4.6 ± 0.10 1.7 | 4.7 ± 0.50 14.4 | 180 ± 5.0 38.2 |
| | Мужские | 4.5 ± 0.30 22.0 | 4.4 ± 0.40 24.0 | 232 ± 1.9 22.5 |
| | Вегетативные | 4.7 ± 0.20 14.0 | 2.2 ± 0.30 30.2 | 149 ± 2.6 42.2 |
| 3 | Женские | 3.8 ± 0.24 10.8 | 4.8 ± 0.50 18.6 | 242 ± 4.0 28.7 |
| | Мужские | 3.1 ± 0.30 18.2 | 3.9 ± 0.30 14.4 | 230 ± 3.3 24.6 |
| | Вегетативные | 4.6 ± 0.14 5.2 | 2.6 ± 0.15 9.7 | 222 ± 0.6 4.8 |
| 4, 5 | Женские | 6.2 ± 1.50 39.9 | 7.1 ± 1.40 27 | 252 ± 6.6 37.3 |
| | Мужские | 4.2 ± 0.40 13.2 | 4.1 ± 0.20 7.8 | 279 ± 3.8 19.1 |
| | Вегетативные | 4.2 ± 0.10 4.2 | 3.3 ± 0.10 2.1 | 246 ± 0.6 3.3 |
| 6, 7 | Женские | 3.6 ± 0.11 8.8 | 2.9 ± 0.12 27.4 | 190 ± 1.9 25.0 |
| | Мужские | 2.4 ± 0.01 0.5 | 3.4 ± 0.05 2.0 | 186 ± 0.1 0.2 |
| | Вегетативные | 2.6 ± 0.14 7.8 | 2.1 ± 0.04 3.0 | 218 ± 2.0 13.2 |
| 8 | Женские | 4.1 ± 0.30 16.2 | 4.6 ± 0.20 9.3 | 270 ± 2.6 21.7 |
| | Мужские | 2.5 ± 0.05 0.1 | 3.2 ± 0.10 1.0 | 182 ± 0.2 0.1 |
| | Вегетативные | 2.8 ± 0.20 6.5 | 2.3 ± 0.10 4.0 | 215 ± 2.5 9.2 |

Примечание. Здесь и в табл. 2 X_{cp} – среднее значение признака, m_x – среднеарифметическая ошибка, CV – коэффициент вариации, %.

менее значительны, чем по показателям побегов (табл. 2).

Максимальными абсолютными значениями характеризуется хвоя вегетативных побегов, которая длиннее на 37.1–51.3 %, чем генеративных. В различных условиях произрастания наиболее значительно изменялись такие показатели, как длина и повреждения хвои. Длина

Таблица 2. Морфометрические показатели хвои пихты сибирской

| № ПП | Сексуализация побегов | Длина, мм | Ширина, мм | Повреждения хвои, % |
|------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| | | $\frac{X_{cp} \pm m_x}{CV, \%}$ | | |
| 1 | Женские | $\frac{15.4 \pm 2.1}{1.3}$ | $\frac{1.3 \pm 0.03}{5.4}$ | $\frac{1.0 \pm 0.10}{5.5}$ |
| | Мужские | $\frac{16 \pm 0.1}{40.9}$ | $\frac{1.0 \pm 0.02}{9.7}$ | $\frac{4.0 \pm 0.20}{21.4}$ |
| | Вегетативные | $\frac{17.0 \pm 0.6}{30.4}$ | $\frac{1.4 \pm 0.02}{6.6}$ | $\frac{3.3 \pm 0.50}{77.4}$ |
| 2 | Женские | $\frac{18.5 \pm 0.6}{1.7}$ | $\frac{1.1 \pm 0.07}{6.4}$ | $\frac{1.0 \pm 0.10}{4.5}$ |
| | Мужские | $\frac{17 \pm 0.1}{45.9}$ | $\frac{1.4 \pm 0.02}{7.7}$ | $\frac{3.3 \pm 0.50}{121.4}$ |
| | Вегетативные | $\frac{23.3 \pm 4.1}{30.4}$ | $\frac{1.5 \pm 0.04}{66.6}$ | $\frac{0.6 \pm 0.03}{77.4}$ |
| 3 | Женские | $\frac{17.7 \pm 0.0}{0.2}$ | $\frac{1.5 \pm 0.04}{3.9}$ | $\frac{0.9 \pm 0.04}{64.3}$ |
| | Мужские | $\frac{22.1 \pm 0.2}{12.9}$ | $\frac{1.3 \pm 0.00}{0.5}$ | $\frac{0.4 \pm 0.02}{94.3}$ |
| | Вегетативные | $\frac{26.1 \pm 0.4}{19.6}$ | $\frac{1.6 \pm 0.20}{29.7}$ | $\frac{3.9 \pm 0.31}{119.1}$ |
| 4, 5 | Женские | $\frac{16.9 \pm 0.2}{2.2}$ | $\frac{1.4 \pm 0.40}{3.9}$ | $\frac{0.1 \pm 0.04}{64.3}$ |
| | Мужские | $\frac{22.6 \pm 0.2}{12.9}$ | $\frac{1.2 \pm 0.04}{4.6}$ | $\frac{0.5 \pm 0.01}{91.3}$ |
| | Вегетативные | $\frac{20.1 \pm 0.4}{9.6}$ | $\frac{1.5 \pm 0.20}{29.7}$ | $\frac{0.9 \pm 0.01}{1.9}$ |
| 6, 7 | Женские | $\frac{12.3 \pm 0.1}{4.2}$ | $\frac{1.3 \pm 0.14}{6.1}$ | $\frac{37.4 \pm 22.80}{9.8}$ |
| | Мужские | $\frac{14.2 \pm 0.2}{8.8}$ | $\frac{1.4 \pm 0.20}{0.1}$ | $\frac{17.6 \pm 12.72}{6.6}$ |
| | Вегетативные | $\frac{19.7 \pm 0.5}{12.4}$ | $\frac{1.6 \pm 0.20}{13.3}$ | $\frac{3.9 \pm 0.31}{11.2}$ |
| 8 | Женские | $\frac{16.4 \pm 0.1}{15.8}$ | $\frac{1.2 \pm 0.06}{10.7}$ | $\frac{0.6 \pm 0.05}{173.2}$ |
| | Мужские | $\frac{13.2 \pm 0.2}{9.0}$ | $\frac{1.5 \pm 0.20}{0.2}$ | $\frac{17.5 \pm 13.00}{6.2}$ |
| | Вегетативные | $\frac{18.7 \pm 0.5}{12.0}$ | $\frac{1.5 \pm 0.20}{14.4}$ | $\frac{3.6 \pm 0.29}{10.8}$ |

хвои побегов женской сексуализации в зависимости от условий произрастания (на различных ПП) варьировала на 13.1–20.1 %, мужской сексуализации – на 16.5–42.5, вегетативных – на 15.4–15.5 %. Доля повреждения хвои значительно увеличивается в высокогорном поясе (на 37.4 %). Минимальные изменения наблюдались по ширине хвои. В горных экосистемах этот показатель увеличивался на 5.3–6.6 % у вегетативных побегов и на 7.1–28.5 % – у генеративных.

Жизненное состояние лесных биоценозов и элементный состав хвои деревьев пихты сибирской разновысотных поясов северного макросклона Западного Саяна различаются (табл. 3).

Низкогорные биоценозы относятся к классам начального повреждения и здоровым. Начиная с высоты 700 м над ур. м., деревья пихты интенсивно усыхают, средне- и высокогорные биоценозы характеризуются как сильно поврежденные и поврежденные. В среднегорных экосистемах преобладают деревья второй и третьей категорий усыхания (Tretyakova, Bazhina, 2000). Крайне редко встречались суховершинные деревья четвертой категории (менее 5 %). На всех ПП значительно повреждаются деревья пихты сибирской, кедр сибирский *Pinus sibirica* Du Tour не имеет признаков усыхания.

В зависимости от высоты произрастания ряды накопления элементов имеют следующий вид:

низкогорье – N > Ca > K > P > Mg > S > Mn > Na > Fe > Cu > F > Pb > Cd > Zn = Co > Hg,

среднегорье – N > Ca > K > P > Mg > S > Mn > Na > Fe > Cu > F > Pb > Cd > Co > Zn > Hg,

высокогорье – Ca > N > K > Mg > P > S > Mn > Na > Fe > Cu > F > Pb > Zn > Co > Cd > Hg.

Максимальным содержанием азота, а также серы, железа и ртути характеризуются деревья низкогорного пояса (рис. 1, 2).

С увеличением абсолютной высоты содержание азота незначительно снижается, а малоподвижных элементов-биофилов (кальций, марганец) увеличивается. В среднегорных биоценозах с низким индексом жизненного состояния отмечены некоторое снижение содержания цинка и тенденция к увеличению содержания калия, а также техногенных элементов – свинца, кадмия, кобальта. В высокогорных биоценозах значительно (в 5 раз) увеличивается содержание фтора. Нарушения гомеостаза деревьев приводят к изменению соотношений биофильных и техногенных элементов (табл. 4). Так, например, повышение концентрации марганца в хвое деревьев высокогорного пояса, вероятно, подавляет поступление железа.

Пихта сибирская благодаря своим биологическим особенностям способна произрастать в экстремальных условиях на верхней границе леса, что свидетельствует о наличии определенных метаболических механизмов, обеспечивающих ее адаптацию. В экстремальных условиях пихта формирует приземистые формы: высокогорная кустарниковидная *A. sibirica*

Таблица 3. Индекс жизненного состояния лесных биоценозов

| № ПП | Высота над ур. м., м | Состав древостоя | Характеристики деревьев | | Индекс жизненного состояния L_n , % | Класс лесных биоценозов |
|------|----------------------|------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------------------|--|
| | | | возраст, лет | диаметр на 1.3 м, см | | |
| 1 | 500 | 6К4П | 60–180 | 9.8–26.5 | 92.0 | Здоровый Начальное повреждение |
| 2 | 450 | 7П2Ос1Б | | | 81.1 | |
| 3 | 650 | 5П5К | 60–250 | 16.7–24.0 | 81.3 | Начальное повреждение Поврежденный Сильно поврежденный |
| 4 | 700–750 | 4К6П | | | 59.9 | |
| 5 | 800 | 4К6П | | | 36.4 | |
| 6 | 1450 | 1К9П | 60–200 | 16.0–30.0 | 66.6 | Поврежденный То же » |
| 7 | 1450 | 1К9П | | | 51.9 | |
| 8 | 1450 | 2К8П | | | 55.4 | |

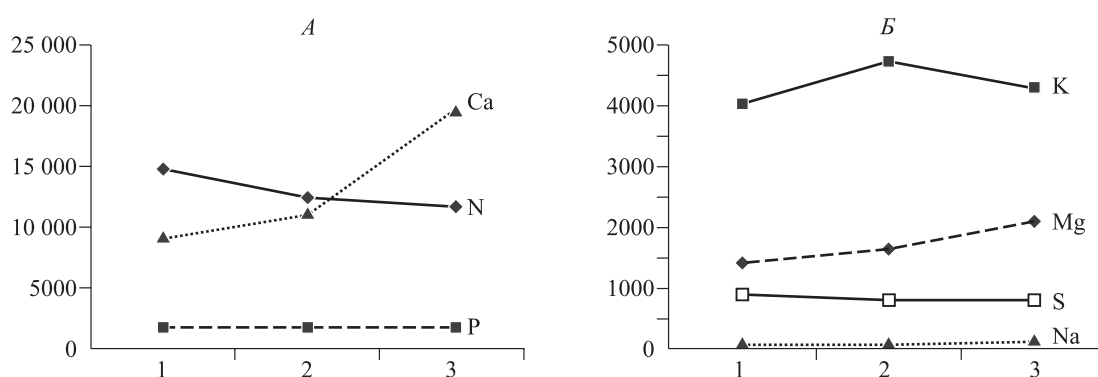


Рис. 1. Массовая доля макроэлементов в хвое деревьев пихты сибирской разновысотных поясов Западного Саяна, мг/кг: 1 – низкогорных, 2 – среднегорных, 3 – высокогорных.

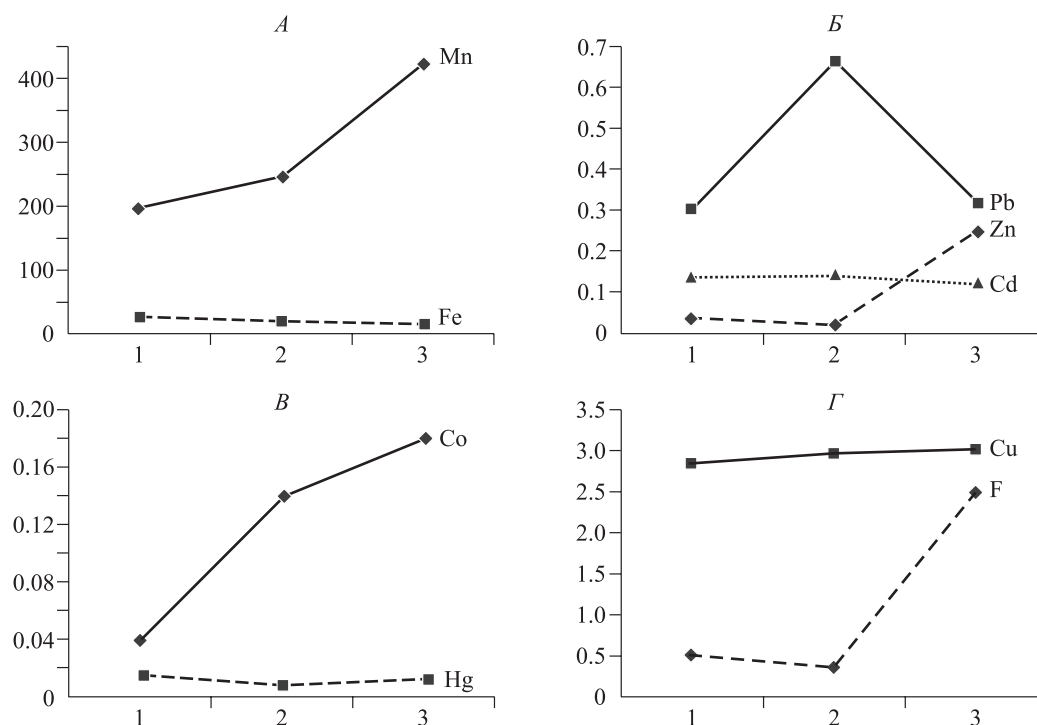


Рис. 2. Содержание микроэлементов в хвое деревьев пихты сибирской разновысотных поясов Западного Саяна, мг/кг: 1 – низкогорных, 2 – среднегорных, 3 – высокогорных.

Таблица 4. Соотношение биофильных и техногенных элементов в хвое пихты сибирской

| Высотный пояс | Mn : S | Fe : Mn | F : Ca |
|----------------------------|---------|---------|----------------|
| Низкогорный черневой | 18 : 82 | 12 : 88 | 0.006 : 99.994 |
| Среднегорный таежный | 24 : 76 | 8 : 92 | 0.003 : 99.997 |
| Высокогорный субальпийский | 35 : 65 | 4 : 96 | 0.013 : 99.987 |

Примечание. Соотношения вычислялись как процентная доля каждого элемента от суммы двух элементов в сухом веществе.

f. alpina описана на верхней границе леса в горах Южной Сибири и Якутии, полуболотная *f. nana* встречается на Западно-Сибирской низменности (Маценко, 1964; Крылов и др., 1986). В высокогорье Западного Саяна пихта сибирская сохраняет древесную форму, хотя изменения в морфоструктуре крон свидетельствуют о стрессовом состоянии.

Форма кроны дерева определяется ростом латеральных и терминальных побегов, который регулируется внутренними факторами. Установлено, что у кедра сибирского по мере развития дерева при переходе к женской и затем к мужской сексуализации происходит постепенное снижение показателей вегетативного роста (Некрасова, 1972; Горошкевич, 2004). Настоящие исследования показали, что показатели побегов пихты сибирской также изменяются в зависимости от сексуализации. Однако помимо внутренних генетических факторов на формирование кроны значительное влияние оказывают факторы внешней среды, определяя показатели адаптивных признаков морфогенеза и продуктивности дерева. Максимальной продуктивностью (по биометрическим характеристикам побегов) характеризуются деревья пихты, произрастающие в низко- и среднегорном черневом поясе (избыточно влажные горные районы с циклоническим режимом климата), где преобладают крупнотравные группы типов леса (Поликарпов и др., 1986), что, вероятно, объясняется оптимальными температурными условиями и более длинным вегетационным периодом. Тем не менее именно среднегорные биоценозы, растущие на высоте 700–800 м над ур. м., характеризуются наиболее низким индексом жизненного состояния. Очевидно, значительную роль здесь играет какой-то дополнительный фактор, не связанный с климатом. Аналогичное явление наблюдается в горах хр. Хамар-Дабан, а также в темнохвойных лесах с преобладанием пихты белой *Abies alba* Mill. в Бабьегурском заповеднике в Карпатах (Борусевич, 1982; Зиганшин и др., 1986). В экосистемах Хамар-Дабана, где основные очаги повреждения также приурочены к

среднегорным ярусам рельефа, зона массового повреждения лесов находится в интервале высот от 900 до 1200 м над ур. м., т. е. фактически совпадает с границами избыточно влажного пихтово-кедрового таежного высотного поясного комплекса. Ухудшение состояния древостоев не связано со старением, так как максимальное угнетение испытывают наиболее продуктивные средневозрастные древостои (Карбаинов, 1993). Установлено, что в горных экосистемах на этих высотах наблюдается максимум выпадения из атмосферы осадков, содержащих высокотоксичные примеси, основным компонентом которых является сернистый газ (Поликарпов и др., 1986; Батраева, 1990). Вполне вероятно, что эти выпадения приводят к значительным повреждениям хвои, отмеченным в средне- и высокогорном ярусах, хотя массовая доля серы в хвое пихты не увеличивается.

Содержание элементов-токсикантов в хвое деревьев пихты Западного Саяна ниже порога токсичности и не превышает эту величину для незагрязненных районов Сибири (Санина и др., 2004; Ильин, 2012). Элементный состав хвои отражает состояние деревьев пихты в различных лесорастительных условиях. В горных экосистемах возрастает содержание кальция, магния, свинца, кобальта и фтора, являющихся специфическими элементами выбросов автотранспорта, теплоэлектростанций и алюминиевого завода, а также цинка и марганца. Обогащение хвои сосны обыкновенной в высокогорных экосистемах Западного Саяна фосфором, кальцием и магнием показано ранее (Митрофанов, 1977). Мы полагаем, что изменения элементного состава и соотношений биофильных и техногенных элементов (Mn/S, Fe/Mn, F/Ca) в высоко- (в 2.2–3.6 раз) и среднегорных сильно усыхающих (в 1.4–3.7 раз) древостоях, накопление таких элементов, как свинец, кобальт и фтор, может свидетельствовать о наличии загрязнения среды региона. На загрязнение горных экосистем Западного Саяна указывает и распределение экологических групп эпифитных лишайниковых сообществ на ветвях пихты сибирской, а также изменения рН и кон-

центраций некоторых элементов в коре ветвей (Otnyukova, Sekretenko, 2008).

Изменения содержания питательных элементов хвойных связывают с их преждевременным старением и увеличением водного дефицита (Giertych et al., 1997; Schleppe et al., 2000). Для усыхающих деревьев среднегорья Западного Саяна показательным является увеличение содержания калия, что может быть связано с нарушениями водного обмена. Калий, оказывая влияние на физическое состояние коллоидов клетки, повышает водоудерживающую способность протоплазмы и тем самым увеличивает устойчивость растений к преждевременному обезвоживанию и увяданию. Нарушения гомеостаза деревьев приводят также к изменению соотношений элементов-антагонистов. В частности, значительное повышение концентрации марганца в хвое деревьев высокогорного пояса может подавлять поступление железа, входящего в состав ферментов и участвующего в окислительно-восстановительных процессах (Рубин, Чернавина, 1959).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разновысотные биоценозы северного макросклона хр. Западного Саяна характеризуются как поврежденные. Здоровые биоценозы отмечены только в низкогорном поясе. Деревья пихты сибирской в средне- и высокогорном поясах усыхают по подвехушечному типу, продуктивность побегов различной сексуализации снижается. Наиболее значительные изменения жизненного состояния биоценозов отмечены в среднегорном умеренно холодном поясе. Нарушение гомеостаза деревьев пихты приводит к изменениям элементного состава и нарушению соотношений биофильных и техногенных элементов в хвое. Накопление техногенных элементов (свинец, кобальт, фтор) может свидетельствовать о наличии загрязнения среды региона.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 11-04-00281).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев В. А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // Лесоведение. 1989. № 4. С. 51–57.
Бажина Е. В., Третьякова И. Н. К проблеме усыхания пихтовых лесов // Успехи совр. биол. 2001. Т. 121. № 6. С. 626–631.

Бажина Е. В., Сторожев В. П., Третьякова И. Н. Усыхание пихтово-кедровых лесов Кузнецкого Алатау в условиях техногенного загрязнения // Лесоведение. 2013. № 2. С. 15–21.
Батраева А. А. Содержание серы в хвое пихты сибирской как показатель загрязнения атмосферы // География и природ. ресурсы. 1990. № 3. С. 66–70.
Борусевич Л. Пихта *Abies alba* как объект экологического мониторинга в Бабьегурском биосферном заповеднике // Экологический мониторинг в биосферных заповедниках социалистических стран. Пушино, 1982. С. 277–279.
Воробьев В. Н. Экология произрастания и генеративного развития горных форм кедра сибирского // Вопросы изучения и освоения флоры и растительности высокогорий: тез. докл. 7-го Всесоюз. совещ. по вопросам изучения и освоения флоры и растительности высокогорий. Новосибирск, 1977. С. 147–148.
Горошкевич С. Н. Связь роста и сексуализации в развитии ветвей как фактор половой дифференциации популяций кедра сибирского // Лесоведение. 2004. № 6. С. 42–49.
Горчаковский П. Л., Шиятов С. Г. Верхняя граница в горах бореальной зоны СССР и ее динамики // Высокогорная экология. М., 1976. С. 52–55.
ГОСТ 13496.4-93. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания азота и сырого протеина. Методы анализа: сб. ГОСТов. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002.
ГОСТ 26657-97. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания фосфора. <http://www.gosthelp.ru/gost/gost18638.html>
ГОСТ 26570-96. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения кальция. <http://www.gosthelp.ru/gost/gost18638.html>
ГОСТ 30502-97. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Атомно-абсорбционный метод определения содержания магния. <http://www.gosthelp.ru/gost/gost18638.html>
ГОСТ 30503-97. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Пламенно-фотометрический метод определения содержания натрия. <http://www.gosthelp.ru/gost/gost27659.html>
ГОСТ 30504-97. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Пламенно-фотометрический метод определения содержания калия. <http://www.gosthelp.ru/gost/gost8956>
ГОСТ 30692-00. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Атомно-абсорбционный метод определения содержания меди, свинца, цинка и кадмия. <http://www.gosthelp.ru/gost/gost6792.html>

- ГОСТ 27997-88. Корма растительные. Методы определения марганца. <http://www.gosthelp.ru/gost/gost28723.html>
- ГОСТ 27998-88. Корма растительные. Методы определения железа. <http://www.gosthelp.ru/gost/gost19590.html>
- Давыдова Н. Д. Техногенные потоки и дифференциация веществ в геосистемах // Географические исследования Сибири. В 5 т. Т. 2. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2007. С. 261–277.
- Зиганшин Р. А., Карбаинов Ю. М., Киселев В. В., Моложников В. Н., Овчинникова Т. М., Воронин В. И. Пространственное распределение усыхающих темнохвойных насаждений Хамар-Дабана // Экологическая роль горных лесов: тез. докл. Всесоюз. конф. Бабушкин, 1986. С. 107–108.
- Ильин В. Б. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва–растение. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 220 с.
- Карбаинов Ю. М. Экологические последствия катастрофических нарушений в темнохвойных лесах Байкальского биосферного заповедника: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 11.00.11. М.: ИЭМЭЖ им. А. Н. Северцова, 1993. 79 с.
- Ковалевский А. Л. Биогеохимия растений. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991. 268 с.
- Крылов Г. В., Марадудин И. И., Михеев Н. И., Козакова Н. Ф. Пихта. М.: Агропромиздат, 1986. 239 с.
- Кулагин А. А., Шагиева Ю. А. Древесные растения и биологическая консервация промышленных загрязнителей. М.: Наука, 2005. 190 с.
- Лукина Н. В., Никонов В. В., Райтис Х. Химический состав сосны на Кольском полуострове // Лесоведение. 1994. № 6. С. 10–21.
- Лукина Н. В., Черненко Т. В. Техногенные сукцессии в лесах Кольского полуострова // Экология. 2008. № 5. С. 329–337.
- Маценко А. Е. Пихты Восточного полушария // Тр. Ботан. ин-та АН СССР. М.; Л.: Наука, 1964. Сер. 1. Вып. 13. С. 3–103.
- Минина Е. Г., Третьякова И. Н. Геотропизм и проявление пола у хвойных. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1983. 198 с.
- Митрофанов Д. П. Химический состав лесных растений Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. 120 с.
- Михайлова Т. А., Бережная Н. С. Динамика состояния сосновых лесов при изменениях эмиссионной нагрузки // Сиб. экол. журн. 2002. № 1. С. 113–120.
- Михайлова Т. А., Калугина О. В., Афанасьева Л. В., Нестеренко О. И. Тренды содержания химических элементов в хвое сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в разных условиях произрастания и при техногенной нагрузке // Сиб. экол. журн. 2010. № 2. С. 239–247.
- МУ 1995. Методические указания по ионометрическому определению содержания фтора в растительной продукции, кормах и комбикормах. М.: ЦИНАО, 1995. 10 с.
- МУ 2004. Методические указания по определению серы в растениях и кормах растительного происхождения. М.: Росинформагротех, 2004.
- МУ 5178-90. Методические указания по обнаружению и определению содержания общей ртути в пищевых продуктах методом беспламенной атомной абсорбции. Методика определения содержания общей ртути в пищевых продуктах методом беспламенной атомной абсорбции. М., 1989.
- Некрасова Т. П. Биологические основы плодоношения кедра сибирского. Новосибирск, 1972. 274 с.
- Некрасова Т. П., Рябинков А. П. Плодоношение пихты сибирской. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978. 150 с.
- Никонов В. В., Баскова Л. А., Сизов И. И. Химический состав хвои сосны на северном пределе распространения (Кольский полуостров). Апатиты: Кольский филиал АН СССР, 1987. С. 62–75.
- Новоселова Е. Е., Шишкин А. С., Бабина С. Г., Бондарь М. Г., Истомов С. В., Коловский Р. А., Макеева Е. Г., Чумаков С. В. Оценка загрязнения природной среды ООПТ Алтае-Саянского экорегиона на основе определения содержания в снежном покрове токсических поллютантов // Мониторинг биоразнообразия на особо охраняемых территориях Алтае-Саянского региона / Отв. ред. Е. С. Анкипович. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. С. 69–73.
- ОСТ 10.155-88. Методы агрохимического анализа. Определение кобальта в растениях и кормах растительного происхождения. Отраслевой стандарт. М.: ЦИНАО, 1988.
- Поликарпов Н. П., Чебакова Н. М., Назимова Д. И. Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1986. 226 с.
- Протопопов В. В. Средообразующая роль темнохвойного леса. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1975. 328 с.
- Рубин Б. А., Чернавина И. А. О биохимической природе хлороза растений // Вестн. Моск. ун-та. Сер. биол., почвоведение, геол., геогр. 1959. № 1. С. 10–15.
- Санина Н. Б., Чупарина Е. В., Нестерова А. А. Химический состав растительности Байкальского биосферного заповедника (в связи с проблемой

- деградации пихтовых лесов северного склона хр. Хамар-Дабан) // Сиб. экол. журн. 2004. № 1. С. 57–65.
- Тараканов В. В., Милютин Л. И., Куценогий К. П., Ковальская Г. А., Игнатъев Л. А., Самсонова А. Е. Элементный состав хвои в разных клонах сосны обыкновенной // Лесоведение. 2007. № 1. С. 28–35.
- Третьякова И. Н., Бажина Е. В. Морфоструктура кроны и состояние генеративной сферы у пихты сибирской в нарушенных лесных экосистемах близ озера Байкал // Изв. РАН. Сер. биол. 1995. № 6. С. 685–692.
- Хромов С. П. Метеорология и климатология для географических факультетов. 3-е изд. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 456 с.
- Giertych M. J., De Temmerman L. O., Rachwal L. Distribution of elements along the length of Scots pine needles in a heavily polluted and a control environment // Tree Physiol. 1997. V. 17. P. 697–703.
- Otnyukova T. N., Sekretenko O. P. Spatial distribution of lichens on twigs in remote Siberian silver fir forests indicates changing atmospheric conditions // The Lichenologist. 2008. V. 40. N. 3. P. 243–256.
- Polak T., Albrechtova J., Cudlin P., Moravec I., Albrechtova J. Macroscopic indicators for the retrospective assessment of Norway spruce crown response to stress in the Krkonose Mountains // Trees. 2007. V. 21. P. 23–35.
- Schleppi P., Tobler L., Bucher J. B., Wyttenbach A. Multivariate interpretation of the foliar chemical composition of Norway spruce (*Picea abies*) // Plant and Soil. 2000. V. 219. P. 251–262.
- Tranquillini W. Physiological of the alpine timberline: tree existence and high altitudes with special reference to the European Alps. New York: Springer-Verlag, 1979. 133 p.
- Tretyakova I. N., Bazhina E. V. Structure of crown as well as pollen and seed viability of fir (*Abies sibiica* Ledeb.) in disturbed forest ecosystems of the Khamar-Daban mountains // Ecology (Bratislava). 2000. V. 19. N. 3. P. 280–294.
- Wardle P. Engelmann spruce at its upper limits on the front range, Colorado // Ecology. 1968. V. 49. N. 3. P. 483–495.
- Weisberg P. J., Baker W. L. Spatial variation in tree seedling and krummholz growth in the forest-tundra ecotone of Rocky Mountain National Park, Colorado, USA // Arctic, Antarctic and Alpine Res. 1995. V. 27. N. 2. P. 116–129.

LIVING STATUS AND ELEMENT COMPOSITION OF THE SIBERIAN FIR *Abies sibirica* Ledeb. NEEDLE AT DIFFERENT CONDITIONS OF GROWTH IN WESTERN SAYAN

E. V. Bazhina

Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch – Solitary Unit V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation

E-mail: genetics@ksc.krasn.ru

A complex assessment of different elevation dark-forest stands of northern, super wet macro slope of Western Sayan was accomplished. Research was conducted during thirteen years (2001–2013) in low mountains (450 m a.s.l.), middle mountains (700–800 m a.s.l.), and high mountains (1450 m a.s.l.). The biocenoses were defined as damaged. The significant differences in the life status of stands are revealed in different elevations. The life status index is varied from 36.4 (in the middle mountains, temperately warm conditions) till 92.0 (in the low mountains, temperately cold conditions). The Siberian pine (*Pines sibirica* Du Tour.) haven't signs of damage, fir trees are drying according to species specific "under the top" type. The biometric signs (increment and needle parameters) of fir shoots of female and male shoots and vegetative shoots are differed. In whole, there are decreases in the middle mountains and high mountains ecosystems. At the same time needle damage (chlorosis and necrosis, in percent) is increased. The element content of needle is changed. In the stands with the low index in the fir needles accumulated potassium, lead, cadmium, and the zinc content decreased. The changes of element content lead to changes correlations in biophillic and technogenic elements Mn/S, Fe/Mn, F/Ca in high mountains (in 2.2–3.6 times) and in middle mountains strongly damaged (in 1.4–3.7 times) stands. It was suggested, that changes in element composition of Siberian fir needle are shown air pollution in the region.

Keywords: *Siberian fir, Abies sibirica Ledeb., life status of biocenosis at different altitude, biometric characteristics of shoots and needle, element content of needle, Southern Siberia, Krasnoyarsk Krai.*

How to cite: *Bazina E. V. Living status and element composition of the Siberian fir Abies sibirica Ledeb. needle at different conditions of growth in Western Sayan // Sibirskij Lesnoj Zurnal (Siberian Journal of Forest Science). 2016. N. 6: 103–112 (in Russian with English abstract).*