

## Генетическое разнообразие ценопопуляций *Larix sibirica* Ledeb. и *Picea obovata* Ledeb. на Таймыре

Н. В. ОРЕШКОВА<sup>1, 2, 3</sup>, Т. С. СЕДЕЛЬНИКОВА<sup>2</sup>, А. В. ПИМЕНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФИЦ КНЦ СО РАН  
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28  
E-mail: oreshkova@ksc.krasn.ru

<sup>2</sup>Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН  
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

<sup>3</sup>Сибирский федеральный университет  
660041, Красноярск, просп. Свободный, 79

Статья поступила 20.03.2023

После доработки 03.04.2023

Принята к печати 05.04.2023

### АННОТАЦИЯ

Исследован полиморфизм ДНК ценопопуляций *Larix sibirica* Ledeb. и *Picea obovata* Ledeb., произрастающих в различных экологических условиях южной части п-ова Таймыр, выявлено их генетическое разнообразие по ядерным микросателлитным локусам:  $N_a = 3,30$ ,  $N_e = 1,75$ ,  $H_o = 0,263$ ,  $H_e = 0,366$  – у *L. sibirica* и  $N_a = 2,92$ ,  $N_e = 1,59$ ,  $H_o = 0,351$ ,  $H_e = 0,338$  – у *P. obovata*. В целом в исследованных популяциях лиственницы сибирской отмечен дефицит гетерозиготных генотипов ( $F = 0,177$ ), а в популяциях ели сибирской – их избыток ( $F = -0,051$ ). Диагностированы генетические особенности данных видов в условиях воздействия техногенных выбросов в Норильском промышленном районе. У *L. sibirica* большее аллельное разнообразие и более высокий уровень инбридинга выявлены в ценопопуляции из экологически благополучного участка, при этом в районе с повышенным уровнем загрязнения отмечены более высокий уровень гетерозиготности и меньшее значение коэффициента инбридинга. Сравнение ценопопуляционных выборок *P. obovata* показало, что генетическая структура насаждения из экологически благополучного района находится практически в равновесном состоянии, тогда как на более загрязненном участке фиксируется 10%-й избыток гетерозигот. Несмотря на определенные отличия между двумя исследованными видами, в целом для *L. sibirica* и *P. obovata* на территории Норильского промышленного района характерны более высокие значения почти всех параметров генетической изменчивости в ценопопуляциях на участках с повышенным, но приемлемым для роста деревьев уровнем техногенной нагрузки. Сделано предположение, что выявленная закономерность отражает активизацию адаптивных процессов в популяциях хвойных из экстремальных условий произрастания.

**Ключевые слова:** *Larix sibirica*, *Picea obovata*, микросателлиты, генетическое разнообразие, гетерозиготность, Таймыр.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования популяционной структуры видов семейства сосновые (*Pinaceae* Spreng.

ex F. Rudolphi) с помощью молекулярно-генетических маркеров дают возможность оценивать уровень их генетического поли-

морфизма и степень генетической дифференциации в различных условиях произрастания. Данный подход особенно актуален при исследовании маргинальных популяций видов *Pinaceae*, произрастающих в условиях влияния экстремальных природных и антропогенных факторов среды и зачастую отличающихся своеобразием генетической структуры [Vandeligt et al., 2011; Liu et al., 2012; Шейкина и др., 2013; Орешкова и др., 2014; Kruse et al., 2018].

Лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.) и ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.) относятся к числу лесообразующих видов бореальной зоны Евразии. Эти виды имеют огромные ареалы и формируют древостой в широком диапазоне условий произрастания [Попов, 2005; Биоразнообразие..., 2010]. При исследовании генетической изменчивости популяций *L. sibirica* севера Красноярского края, Урала, Алтая и Тывы, проводившемся с использованием ядерных микросателлитных маркеров, выявлен высокий уровень внутривидовой генетической изменчивости. При этом отсутствовала тесная взаимосвязь между географическим положением выборок и степенью их генетической подразделенности [Орешкова, Белоконов, 2012; Васильева и др., 2019]. Изучение генетического полиморфизма и дифференциации *P. obovata* по ядерным микросателлитным локусам, проведенное для популяций из различных регионов азиатской части России, также выявило достаточно высокий уровень внутривидовой изменчивости и слабую межвидовую дифференциацию [Кравченко и др., 2016]. Очевидно, что основной пул генетической изменчивости *L. sibirica* и *P. obovata* сосредоточен на внутривидовом (экологическом) уровне, превышающем вклад межвидовой (географической) компоненты. Вероятно, что при оценке генетического разнообразия данных видов основное внимание необходимо сосредоточить на внутривидовых структурных элементах генетических популяций – ценопопуляций, выделяемых в пределах конкретного экотопа. При исследовании ценопопуляций некоторых видов *Pinaceae*, произрастающих на одной территории, но в экологически контрастных экотопах, удалось не только выявить их внутривидовую генетическую дифференциацию, но

и проследить микроэволюционные изменения, направления адаптации [Шейкина и др., 2013; Орешкова и др., 2014, 2020].

В настоящей работе приводятся результаты исследования генетической структуры и генетического разнообразия ценопопуляций лиственницы сибирской и ели сибирской в южной части п-ова Таймыр, проведенного с использованием ядерных микросателлитных маркеров. Особенности произрастания популяций *L. sibirica* и *P. obovata* на юге Таймыра – северной границе их ареала, определяются совместным воздействием экстремальных природных условий и техногенных выбросов, источником которых являются промышленные предприятия г. Норильска. Дифференциация произрастающих в данном регионе популяций *L. sibirica* и *P. obovata*, по всей вероятности, сопряжена с почвенно-гидрологическими и фитоценоотическими условиями, во многом также обусловленными техногенными эмиссиями [Пименов и др., 2014; Пономарева и др., 2014; Kirdeyanov et al., 2020]. Значительное влияние на смещение современной арктической границы лесов и изменение их генотипического состава может оказать потепление климата, отмечающееся в последние десятилетия в данном регионе [Kruse et al., 2018].

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектами исследования послужили четыре ценопопуляции: две – *L. sibirica* (Л-1, Л-2) и две – *P. obovata* (Е-1, Е-2), расположенные на территории Норильского промышленного района на юге п-ова Таймыр. Географическая локализация, орографическая приуроченность и лесоводственная характеристика ценопопуляций представлены в табл. 1. Экологический статус ценопопуляции – “благополучный” или “относительно неблагоприятный” – определяется по удаленности от источника загрязнения (предприятий г. Норильска) и по наличию признаков техногенной депрессии растительности [Телятников, Пристяжнюк, 2014]. Объем анализируемой выборки в каждой из четырех ценопопуляций составил 24 дерева.

Для проведения генетического анализа в выборках лиственницы сибирской были использованы микросателлитные локусы (табл. 2), разработанные сотрудниками лаборатории лесной геномики СФУ [Орешкова и др., 2019].

Биоэкологическая характеристика ценопопуляций *L. sibirica* (Л-1, Л-2) и *P. obovate* (Е-1, Е-2) на юге Таймыра (Норильский промышленный район)

Код ценопопуляционной выборки, географические координаты	Орографические и фитоценоотические условия, таксационные характеристики насаждений
Л-1 69°20' с. ш. 86°51' в. д.	<p>Экологически благополучный участок расположен в 51 км к западу от г. Норильска в верхней части плосковыпуклого склона южной экспозиции долины р. Болгохтох. Растительное сообщество – лиственничный ольховниковый травяной лес – насчитывает 37 видов растений. Древесный ярус образуют сообщества <i>L. sibirica</i>, с сомкнутостью крон 0,4–0,5, высотой и диаметром стволов соответственно <math>14,2 \pm 0,4</math> м и <math>28 \pm 1,8</math> см. Кустарниковый ярус сплошной, образован синузидиями <i>Duschekia fruticosa</i> Rupr. и <i>Betula tortuosa</i> Ledeb. Кустарниковый ярус формируют группировки <i>Betula nana</i> L., <i>Ledum palustre</i> L., <i>Vaccinium uliginosum</i> L. В травяно-кустарничковом ярусе доминируют <i>Equisetum pratense</i> Ehrh. и <i>Anthoxanthum alpinum</i> A. et D. Löve. Среди мхов наиболее многочисленны синузидии <i>Pleurozium schreberi</i> (Brid.) Mitt. В структуре фитоценоза выделяются две микроассоциации: кустарничково-хвощово-злаковая (занимает 55–60 % площади) и высокотравная (занимает 40–45 % площади)</p>
Л-2 69°24' с. ш. 88°08' в. д.	<p>Экологически относительно неблагоприятный участок расположен в 4 км к северу от г. Норильска, в долине р. Щучья. Участок характеризуется крупнобугристо-западной поверхностью, расчлененной многочисленными ручьями и озерами. Растительное сообщество – лиственничное редколесье кустарничково-кустарничково-злаковое – насчитывает 22 вида растений. Древесный ярус образован <i>L. sibirica</i> с сомкнутостью крон 0,1, высотой стволов 5–6 м. Большая часть деревьев усохшие. Подрост единичный. Кустарниковый ярус представлен четырьмя видами <i>Salix</i> sp., <i>Duschekia fruticosa</i> и <i>Betula nana</i>. Общее проективное покрытие живого напочвенного покрова варьирует в диапазоне 30–60 % в зависимости от степени увлажнения. Травяно-кустарничковый ярус образован кустарничками: <i>Ledum decumbens</i> (Ait.) Lodd. ex Steud., <i>Vaccinium uliginosum</i>, <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L., <i>Empetrum subholarcticum</i> V. N. Vassil., а также разнообразными злаками: <i>Arctagrostis</i> sp. Griseb., <i>Calamagrostis langsdorffii</i> (Link) Trin., <i>C. holmii</i> Lange, <i>Poa alpigena</i> (Blytt) Hiit., <i>P. pratensis</i> L. Отмечены единичные признаки поражения вегетативной сферы растений</p>
Е-1 69°28' с. ш. 88°30' в. д.	<p>Экологически благополучный участок расположен в 7 км на юго-восток от г. Талнах на террасе р. Листвянка. Рельеф холмисто-увалистый с заболоченными депрессиями и термокарстовыми озерами. Растительное сообщество – елово-лиственничный хвощовый лес – насчитывает 35 видов растений. Древостой елово-лиственничный (<i>L. sibirica</i>, <i>P. obovata</i>) с березой (<i>B. tortuosa</i>) во втором ярусе, сомкнутость крон 0,4–0,5. Высота первого яруса 18–22 м, второго – 8–12 м. В возобновлении и подросте преобладает ель, меньше лиственницы. Кустарниковый ярус не выражен, образован куртинами <i>Duschekia fruticosa</i> и <i>Juniperus sibirica</i> Burgsd. В травяно-кустарничковом ярусе доминирует <i>Equisetum pratense</i>. Мхи представлены латками <i>Bryum axel-blyttii</i> Kaurin ex H. Philip. и <i>Polytrichum commune</i> Hedw. В структуре фитоценоза выделяются две микроассоциации: хвощовая, занимающая 85 % площади, и мелкотравно-зеленомошная, занимающая 15 % площади</p>
Е-2 69°26' с. ш. 88°21' в. д.	<p>Экологически относительно неблагоприятный участок расположен в 14 км к северо-востоку от г. Норильска, на террасе долины р. Норильская. Рельеф холмисто-увалистый с заболоченными депрессиями и термокарстовыми озерами. Растительное сообщество – березово-елово-лиственничный хвощовый лес – включает 30 видов растений. Древостой двухъярусный. Верхний ярус образуют <i>L. sibirica</i> и <i>P. obovata</i> высотой 18–20 м и сомкнутостью крон 0,6–0,7. Второй ярус высотой 8–12 м составляет <i>Betula tortuosa</i>. В подросте доминируют ель и береза. Кустарниковый ярус не выражен, образован куртинами <i>Duschekia fruticosa</i> и <i>Juniperus sibirica</i>. В травяно-кустарничковом ярусе доминирует <i>Equisetum pratense</i>. Структура фитоценоза однородная, микроассоциации не выделяются</p>

Из микросателлитных локусов (SSR), использовавшихся для исследования генетической изменчивости *Picea*, было выбрано шесть по литературным данным [Hodgetts et al., 2001; Scotti et al., 2002; Fluch et al., 2011] (табл. 3).

Биологическим материалом послужили 96 образцов хвои *L. sibirica* (двух ценопопуля-

ций × 24 дерева) и *P. obovata* (двух ценопопуляций × 24 дерева), собранных в июле 2019 г.

Препараты тотальной ДНК выделены модифицированным методом с применением цетилтриметиламмонийбромидом (СТАВ) из образцов тканей хвои, высушенной при помощи силикагеля [Devey et al., 1996]. Для проведения ПЦР использовали готовые реакционные смеси

Т а б л и ц а 2  
Отобранные микросателлитные локусы для *Larix sibirica*

Локус	Мотив	Последовательность праймеров	Длина фрагмента
<i>Ls_1008427</i>	(ATAG) <sub>13</sub>	F: CACCCCTATCCCACAAATCTTA R: ATTTATCTTTGGCCTCATGC	152–174
<i>Ls_954234</i>	(ATT) <sub>15</sub>	F: TGGCGTTTGGCTAAGTTGTAA R: GGTTGATTTATGTGTGTGTATGTGG	171–204
<i>Ls_2672894</i>	(TTTG) <sub>11</sub>	F: CAAAGGATGGAATGTGTCTCAA R: GTTGGTATGGTTTCCCAGAGTG	152–164
<i>Ls_305132</i>	(GTCGGA) <sub>7</sub>	F: GCAGAGCCGTTATTCGATCTAT R: CCCTCGTTTCTCTTCTGACTA	210–240
<i>Ls_4040657</i>	(TCACTT) <sub>11</sub>	F: TTCACCTTCAAAACCATCACC R: ACATCTGGCATTAAACCGAAGT	194–218

Т а б л и ц а 3  
Отобранные микросателлитные локусы для *Picea obovata*

Локус	Мотив	$T_m$ , °C	Последовательность праймеров	Длина фрагмента
<i>Pa_33</i>	(CGG) <sub>n</sub>	62	F: GGTCGAGGAGGAGGAGGTAG R: CACCGTAGTGCAGTCTCTG	107–119
<i>Pa_36</i>	(CGG) <sub>n</sub>	62	F: CGGCAGGAACATCACTGTTA R: ACCGTAACCTCCCCTACCAC	185–197
<i>EATC1E03</i>	(CAT) <sub>4</sub> CGT(CAT) <sub>8</sub>	58	F: CCCCTTATTCCTAACGTCAAAA R: TACCAGTGGTGACAACGATG	134–209
<i>UAPgAG150 A</i>	(AG) <sub>19</sub>	52	F: ACCAATGCTTTTACCAAACG R: TTGATTGCAAGTGATGGTTG	150–164
<i>UAPgAG150 B</i>	(AG) <sub>19</sub>	52	F: ACCAATGCTTTTACCAAACG R: TTGATTGCAAGTGATGGTTG	124–132
<i>UAPgAG105</i>	(AG) <sub>11</sub>	54	F: CAACTACCTTGAGCCAATCA R: GTCCGGCATTATTGATCATT	167–175

для амплификации ДНК “GenePakPCRCore” производства ООО “Лаборатория Изоген”, содержащие ингибированную для “горячего старта” Taq-ДНК-полимеразу, дизоксинуклеозидтрифосфаты и хлорид магния. Продукты амплификации разделяли путем электрофореза в 6%-м полиакриламидном геле с использованием трис-EDTA-боратного электродного буфера в камерах для вертикального фореза. Окраску геля проводили в растворе бромистого этидия с последующей визуализацией в ультрафиолетовом свете. В качестве маркера стандартных длин использовали ДНК плазмиды pBR322 *E. coli*, обработанную рестриктазой *Hpa* II. Молекулярный вес фрагментов определяли путем сопоставления со стандартным маркером в программе Photo-Capt.

Программа амплификации микросателлитных локусов на образцах лиственницы си-

бирской включала первичную денатурацию в течение 1 мин при 94 °C, затем 9 циклов “touchdown” с понижением на 1 °C каждый цикл: 30 с при 94 °C, 30 с при 60 °C, 1 мин при 72 °C, далее 24 цикла без “touchdown”: 30 с при 94 °C, 30 с при 50 °C, 30 с при 72 °C; финальная элонгация составляла 10 мин при 72 °C.

Амплификацию отобранных ядерных микросателлитных локусов ели сибирской проводили при следующем режиме: предварительная денатурация ДНК при 94 °C – 5 мин, далее 30 циклов, включающих плавление – 30 с при 94 °C, отжиг праймеров – 40 с, и элонгацию – 40 с при 72 °C. Завершающий цикл элонгации проходил при 72 °C в течение 5 мин.

Для оценки уровня генетического разнообразия рассчитаны следующие параметры: среднее число аллелей на локус ( $A$ ), средняя наблюдаемая ( $H_o$ ) и ожидаемая ( $H_e$ ) гетеро-

зиготности, эффективное число аллелей ( $N_e$ ). Среднее число аллелей на локус ( $N_a$ ) оценено путем деления общего числа обнаруженных аллелей на число исследуемых локусов.  $H_o$  рассчитывалась как отношение числа гетерозиготных образцов к общему числу проанализированных по данному локусу образцов. Обработка полученных данных проведена при помощи программы GenAlEx 6.5 [Peakall, Smouse, 2006].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**I. Оценка показателей внутри- и межпопуляционного генетического разнообразия *Larix sibirica*.** В процессе исследования пяти ядерных микросателлитных локусов в двух выборках лиственницы сибирской из ценопопуляций Л-1 и Л-2 выявлено 19 аллельных вариантов: Л-1 – 17 аллелей, из них шесть редких, частота встречаемости которых менее 5 %, Л-2 – 16 аллелей, из них два являются редкими. При этом идентифицированные микросателлитные локусы частично отличались по составу и частотам встречаемости выявленных аллелей. Все локусы были полиморфными. В локусе *Ls\_1008427* в обеих выборках выявлены скрытые *null*-аллели, их частоты рассчитаны исходя из предположения о том, что популяции находятся в равновесном состоянии, согласно правилу Харди – Вайнберга [Chakraborty, 1992]. Самый высокий уровень аллельного разнообразия в исследованных выборках лиственницы имеют локусы *Ls\_1008427* и *Ls\_954234*, в которых выявлено по пять аллелей.

Для выявления уровня генетического разнообразия в каждой из двух ценопопуляций лиственницы сибирской были рассчитаны основные показатели генетической изменчивости

на основании аллельных частот пяти локусов (табл. 4). Расчет основных параметров генетической изменчивости показал, что включенные в исследование ценопопуляции *L. sibirica* различны по уровню генетического разнообразия.

Из анализа полученных данных следует, что наиболее высокие значения среднего и эффективного числа аллелей на локус были выявлены в выборке Л-1 из экологически чистого района ( $N_a = 3,4$ ;  $N_e = 1,786$ ), а наиболее высокие показатели наблюдаемой и ожидаемой гетерозиготности выявлены в выборке Л-2 ( $H_o = 0,292$ ;  $H_e = 0,368$ ) из района с повышенным уровнем загрязнения. В изученных нами выборках лиственницы сибирской выявлен дефицит гетерозиготных генотипов (Л-1 –  $F = 0,227$ ; Л-2 –  $F = 0,126$ ).

С помощью  $F$ -статистик Райта [Wright, 1965] предпринята попытка определить структуру и степень генетической подразделенности включенных в исследование природных ценопопуляций лиственницы сибирской. Для каждого из пяти полиморфных локусов рассчитывались коэффициенты инбридинга особи относительно популяции ( $F_{IS}$ ), инбридинга особи относительно вида ( $F_{IT}$ ) и инбридинга популяции относительно вида в целом ( $F_{ST}$ ).

Анализ популяционной структуры *L. sibirica* (табл. 5) показал, что в изучаемых выборках наблюдается 17,5%-й дефицит гетерозиготных генотипов относительно популяции ( $F_{IS} = 0,175$ ) и почти 19%-й дефицит ( $F_{IT} = 0,187$ ) относительно вида. Полокусные значения показывают, что наиболее значимый дефицит гетерозигот наблюдается в локусах *Ls\_1008427* и *Ls\_305132*. Коэффициент инбридинга популяции относительно вида в целом ( $F_{ST}$ ), отражающий степень подразделенности популяций, варьируется от 0,003

Т а б л и ц а 4  
Показатели генетической изменчивости, рассчитанные для двух выборок *Larix sibirica* по результатам SSR-анализа

Популяция	$N_a$	$N_e$	$H_o$	$H_e$	$F$
В среднем для популяции Л-1	3,400±0,510	1,786±0,309	0,233±0,054	0,365±0,111	0,227±0,118
В среднем для популяции Л-2	3,200±0,490	1,716±0,241	0,292±0,068	0,368±0,089	0,126±0,122
В среднем для всех исследованных популяций (Л-1, Л-2)	3,300±0,335	1,751±0,185	0,263±0,042	0,366±0,067	0,177±0,082

П р и м е ч а н и е.  $N_a$  – среднее число аллелей на локус;  $N_e$  – эффективное число аллелей на локус;  $H_o$  – наблюдаемая гетерозиготность;  $H_e$  – ожидаемая гетерозиготность;  $F$  – индекс фиксации, ± – стандартная ошибка.

Значение показателей *F*-статистик Райта для *Larix sibirica*

Локус	<i>N</i>	$\chi^2$	$F_{IS}$	$F_{IT}$	$F_{ST}$
<i>Ls_1008427</i>	5	56,325(0,000)***	0,486	0,488	0,003
<i>Ls_954234</i>	5	18,371(0,049)*	0,260	0,263	0,005
<i>Ls_2672894</i>	3	0,804(0,849) <sup>ns</sup>	-0,121	-0,097	0,022
<i>Ls_305132</i>	4	17,016(0,009)**	0,304	0,322	0,026
<i>Ls_4040657</i>	2	0,091(0,763) <sup>ns</sup>	-0,055	-0,043	0,011
Среднее			0,175 ± 0,114	0,187 ± 0,111	0,013 ± 0,005

П р и м е ч а н и е. *N* – число аллелей;  $\chi^2$  – тест на гетерогенность; уровень значимости ns – notsignificant; \* –  $p < 0,05$ , \*\* –  $p < 0,01$ , \*\*\* –  $p < 0,001$ ;  $F_{IS}$  – коэффициент инбридинга особи относительно популяции;  $F_{IT}$  – коэффициент инбридинга особи относительно вида;  $F_{ST}$  – коэффициент межпопуляционной дифференциации.

(*Ls\_1008427*) до 0,026 (*Ls\_305132*), составляя в среднем 0,013. Это свидетельствует о том, что только около 1,3 % выявленной генетической изменчивости у изученных выборок лиственницы сибирской распределяется между популяциями. Внутри популяций сосредоточено около 98,7 % всего генетического разнообразия. Наибольший вклад в дифференциацию изученных популяций вносят локусы *Ls\_2672894* и *Ls\_305132* (см. табл. 5).

Анализ гетерогенности аллельных частот с помощью критерия  $\chi^2$  показал, что у двух (*Ls\_2672894*, *Ls\_4040657*) из пяти исследованных локусов наблюдаемые различия статистически недостоверны. У одного локуса *Ls\_1008427* межпопуляционные различия по частотам аллелей высоко достоверны ( $p < 0,001$ ) (см. табл. 5).

**II. Оценка показателей внутри- и межпопуляционного генетического разнообразия *Picea obovata*.** При исследовании шести ядерных микросателлитных локусов в двух выборках ели сибирской из ценопопуляций Е-1 и Е-2 выявлено 18 аллельных вариантов. Ди-

агностированные микросателлитные локусы несколько отличались по составу и встречаемости выявленных аллелей. В ценопопуляции Е-2 выявлено 18 аллелей (пять из них являются редкими, их частота встречаемости составляет менее 5 %), в ценопопуляции Е-2 – 17 (из них три – редких). Все шесть локусов были полиморфными.

В локусе *UAPgAG150B*, амплификация которого проводилась той же парой праймеров, что и локуса *UAPgAG150A*, в обеих выборках обнаружены скрытые *null*-аллели (фенотипически не проявляющиеся). Расчет частот скрытых *null*-аллелей проводился в соответствии с правилом Харди – Вайнберга [Chakraborty, 1992]. Наиболее высоким уровнем аллельного разнообразия в выборках ели отличается локус *UAPgAG150B* – в нем выявлено четыре аллеля.

Уровень генетического разнообразия в исследованных ценопопуляциях ели сибирской рассчитывался по основным показателям генетической изменчивости, учитывая аллельные частоты шести локусов (табл. 6).

Показатели генетической изменчивости, рассчитанные для двух выборок *Picea obovata* по результатам *SSR*-анализа

Популяция	$N_a$	$N_e$	$H_o$	$H_e$	<i>F</i>
В среднем для популяции Е-1	2,833 ± 0,307	1,557 ± 0,144	0,319 ± 0,062	0,327 ± 0,068	-0,002 ± 0,029
В среднем для популяции Е-2	3,000 ± 0,258	1,618 ± 0,165	0,382 ± 0,069	0,349 ± 0,065	-0,100 ± 0,029
В среднем для всех исследованных популяций (Е-1, Е-2)	2,917 ± 0,193	1,588 ± 0,105	0,351 ± 0,045	0,338 ± 0,045	-0,051 ± 0,024

П р и м е ч а н и е.  $N_a$  – среднее число аллелей на локус;  $N_e$  – эффективное число аллелей на локус;  $H_o$  – наблюдаемая гетерозиготность;  $H_e$  – ожидаемая гетерозиготность; *F* – индекс фиксации; ± – стандартная ошибка.

Значение показателей  $F$ -статистик Райта для *Picea obovata*

Лocus	$N$	$\chi^2$	$F_{IS}$	$F_{IT}$	$F_{ST}$
<i>EATC1EO3</i>	2	0,25(0,617) <sup>ns</sup>	-0,093	-0,072	0,019
<i>UAPgAG150A</i>	3	5,497(139) <sup>ns</sup>	0,012	0,015	0,003
<i>UAPgAG150B</i>	4	54,347(0,000) <sup>***</sup>	-0,043	-0,032	0,011
<i>UAPgAG105</i>	3	0,297(0,961) <sup>ns</sup>	-0,070	-0,068	0,002
<i>Pa_33</i>	3	0,649(0,885) <sup>ns</sup>	-0,116	-0,096	0,018
<i>Pa_36</i>	3	0,863(834) <sup>ns</sup>	-0,010	-0,010	0,001
Среднее			-0,053 ± 0,020	-0,044 ± 0,017	0,009 ± 0,003

П р и м е ч а н и е.  $N$  – число аллелей;  $\chi^2$  – тест на гетерогенность; уровень значимости ns – not significant, \*\*\* –  $p < 0,001$ ;  $F_{IS}$  – коэффициент инбридинга особи относительно популяции;  $F_{IT}$  – коэффициент инбридинга особи относительно вида;  $F_{ST}$  – коэффициент межпопуляционной дифференциации.

Анализ результатов показал, что максимально высокими значениями почти всех параметров генетической изменчивости характеризуется ценопопуляция Е-2 ( $N_a = 3$ ;  $N_e = 1,618$ ;  $H_o = 0,382$ ;  $H_e = 0,349$ ) из района с повышенным уровнем загрязнения. Более низкие показатели изменчивости выявлены в выборке Е-1 ( $N_a = 2,833$ ;  $N_e = 1,557$ ;  $H_o = 0,319$ ;  $H_e = 0,327$ ). В исследованных выборках ели сибирской выявлен 5%-й избыток гетерозиготных генотипов ( $F = -0,051$ ). В выборке Е-2 избыток гетерозигот составил 10 % ( $F = -0,100$ ).

С применением  $F$ -статистик Райта [Wright, 1965] определены структура ценопопуляций ели сибирской и степень их генетической подразделенности. Для каждого из шести полиморфных локусов были рассчитаны коэффициенты инбридинга особи относительно популяции ( $F_{IS}$ ), инбридинга особи относительно вида ( $F_{IT}$ ) и инбридинга популяции относительно вида в целом ( $F_{ST}$ ).

При оценке популяционной структуры *Picea obovata* (табл. 7) выявлено, что в исследованных выборках наблюдается 5%-й избыток гетерозиготных генотипов относительно популяции ( $F_{IS} = -0,053$ ) и 4%-й ( $F_{IT} = -0,044$ ) – относительно вида.

Анализ полокусных значений показал, что наиболее значимый дефицит гомозигот характерен для локусов *EATC1EO3* и *Pa\_33*. Коэффициент инбридинга популяции относительно вида в целом ( $F_{ST}$ ), свидетельствующий о степени подразделенности популяций, варьирует от 0,001 (*Pa\_36*) до 0,019 (*EATC1EO3*), среднее его значение составляет 0,009. Следовательно,

приблизительно 1 % выявленной генетической изменчивости у выборок ели сибирской распределяется между популяциями, а внутри них сосредоточено около 99 % всего генетического разнообразия. Наибольший вклад в дифференциацию популяций ели сибирской вносят локусы *EATC1EO3* и *Pa\_33* (см. табл. 7).

Оценка гетерогенности аллельных частот с помощью критерия  $\chi^2$  показала, что у пяти (*EATC1EO3*, *UAPgAG150A*, *UAPgAG105*, *Pa\_33*, *Pa\_36*) из шести полиморфных локусов выявленные различия статистически недостоверны. У одного локуса, *UAPgAG150B*, межпопуляционные различия по частотам аллелей оказались высокодостоверны (см. табл. 7).

## ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование генетического полиморфизма популяций лиственницы сибирской южной части п-ова Таймыр показало, что значения основных показателей генетической изменчивости соответствуют сравнительно невысокому уровню генетического разнообразия при сопоставлении с аналогичными показателями для популяций лиственницы из других местопроизрастаний [Орешкова, Белоконь, 2012; Орешкова и др., 2012, 2013; Babushkina et al., 2016; Кулаков и др., 2018; Васильева и др., 2019]. Возможно, это связано с использованием в исследованиях маркеров на основе ядерных микросателлитных локусов, разработанных для других видов рода лиственница (*Larix* Mill.) [Khasa et al., 2000; Isoda, Watanabe, 2006; Chen et al., 2009]. Поскольку в настоящей

работе применялся набор локусов, разработанный именно для лиственницы сибирской, даже при использовании всего пяти полиморфных микросателлитных локусов удалось выявить различия в исследованных выборках.

В выборке Л-1 из экологически чистого района выявлено большее аллельное разнообразие, тогда как в Л-2 из района с повышенным уровнем загрязнения отмечены более высокие значения уровня гетерозиготности ( $H_o = 0,292$ ;  $H_e = 0,368$ ). Обе исследованные выборки лиственницы характеризуются значительными коэффициентами инбридинга (соответственно  $F = 0,227$  и  $F = 0,126$ ). Повышенные значения уровня инбридинга могут быть обусловлены наличием скрытых нуль-аллелей (такие аллели могут возникать из-за неполного сродства праймеров при проведении ПЦР).

Также необходимо отметить, что повышенный уровень инбридинга в целом свойственен представителям рода *Larix*, что может быть связано с особенностями строения пыльцы. Пыльцевые зерна у всех видов *Larix* не имеют воздушных мешков и не могут переноситься на далекие расстояния, поэтому для лиственниц характерно самоопыление [Сурсо и др., 2012]. Особенно это может проявляться в суровых условиях произрастания. Установлено, что северные популяции лиственницы отличаются недостатком гетерозигот. Изучение генетического полиморфизма в популяциях лиственницы сибирской, лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.) и лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr) из северных регионов Евразии показало, что во всех популяциях наблюдается дефицит гетерозиготных генотипов [Орешкова и др., 2013]. В недавнем исследовании также выявлено, что популяции лиственницы Гмелина на Таймыре характеризуются дефицитом гетерозигот и генетически слабо подразделены [Kruse et al., 2018]. Очень важно принимать во внимание тот факт, что в суровых климатических условиях у лиственниц включается механизм вегетативного размножения [Абаимов и др., 2004], что снижает показатели генетического разнообразия и увеличивает значение коэффициента инбридинга.

Анализ основных показателей генетического полиморфизма ( $N_a = 2,6$ ;  $N_e = 1,588$ ;  $H_o = 0,351$ ;  $H_e = 0,338$ ) популяций ели сибирской юга Таймыра свидетельствует об отно-

сительно невысоком уровне генетического разнообразия по сравнению с аналогичными показателями, приведенными в предыдущих исследованиях видов *Picea* [Орешкова и др., 2013; Babushkina et al., 2016]. Сходные значения генетического разнообразия с использованием микросателлитных локусов получены при изучении северных популяций ели сибирской, что в первую очередь связано с сокращением численности маргинальных популяций ели в прошлом (bottleneck) [Кравченко и др., 2016].

В изученных нами ценопопуляциях ели сибирской (Е-1 и Е-2) выявлен избыток гетерозиготных генотипов. Самый высокий коэффициент инбридинга отмечен в ценопопуляции Е-2 ( $F = -0,100$ ). Особенностью этой выборки, приведшей к такому высокому значению индекса фиксации ( $F$ ), является произрастание ее в зоне, подверженной промышленным выбросам предприятий г. Норильска, что может быть связано с балансирующим отбором в пользу гетерозигот по функциональным генам, сцепленным с нейтральными микросателлитными локусами. Некоторые авторы также указывают на избыток гетерозиготности у хвойных во взрослой части популяции за счет элиминации гомозиготных особей [Крутовский и др., 1989].

Анализ литературных данных показал, что для северных популяций ели не является характерным избыток гетерозиготных генотипов. При исследовании полиморфизма популяций ели обыкновенной (*Picea abies* (L.) H. Karst.), ели сибирской и ели финской (*Picea × fennica* (Regel) Kom.) Северо-Запада России для всех локусов наблюдался дефицит гетерозигот ( $H_o$ ) по сравнению с ожидаемым значением ( $H_e$ ) [Потокина и др., 2012].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования полиморфизма ДНК ценопопуляций *L. sibirica* и *P. obovata*, произрастающих в различных экологических условиях южной части п-ова Таймыр, выявлено их генетическое разнообразие по ядерным микросателлитным локусам: среднее число аллелей на локус составляет у *L. sibirica* 3,8, у *P. obovata* – 3,1. В целом, в исследованных популяциях лиственницы сибирской отмечен дефицит гетерозиготных

генотипов, а в популяциях ели сибирской – их избыток.

Диагностированы генетические особенности данных видов в условиях воздействия техногенных выбросов в Норильском промышленном районе. У *L. sibirica* большее аллельное разнообразие и более высокий уровень инбридинга выявлены в ценопопуляции из экологически благополучного участка, при этом в районе с повышенным уровнем загрязнения отмечены более высокий уровень гетерозиготности и меньшее значение коэффициента инбридинга. Сравнение ценопопуляционных выборок *P. obovata* показало, что генетическая структура насаждения из экологически благополучного района находится практически в равновесном состоянии, тогда как на более загрязненном участке фиксируется 10%-й избыток гетерозигот.

Несмотря на определенные отличия между двумя исследованными видами, в целом для *L. sibirica* и *P. obovata* на территории Норильского промышленного района характерны более высокие значения почти всех параметров генетической изменчивости в ценопопуляциях на участках с повышенным, но приемлемым для роста деревьев уровнем техногенной нагрузки. Вероятно, выявленная закономерность отражает активизацию адаптивных процессов в популяциях хвойных из экстремальных условий произрастания.

Авторы благодарят Яну Викторовну Стенину, выпускницу магистерской программы “Геномика и биоинформатика” кафедры геномики и биоинформатики ИФБ и БТ СФУ за участие в лабораторных исследованиях и помощь в обработке полученных данных.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ КНЦ СО РАН по теме “Функционально-динамическая индикация биоразнообразия лесов Сибири”, № FWES-2021-0009.

#### ЛИТЕРАТУРА

Абаимов А. П., Прокушкин С. Г., Суховольский В. Г., Овчинникова Т. М. Оценка и прогноз послепожарного состояния лиственницы Гмелина на мерзлотных почвах Средней Сибири // Лесоведение. 2004. № 2. С. 3–11.  
Биоразнообразие лиственниц Азиатской России. Новосибирск: Академ. изд-во “Гео”, 2010. 159 с.  
Васильева Ю. С., Сбоева Я. В., Чертов Н. В., Жуланов А. А. Оценка состояния генофонда западной расы лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) Урала на основании полиморфизма микросателлитных

маркеров // Бюл. науки и практики. 2019. Т. 5, № 12. С. 98–110.  
Кравченко А. Н., Экарт А. К., Ларионова А. Я. Генетическое разнообразие и дифференциация популяций ели сибирской по ядерным микросателлитным локусам // Генетика. 2016. Т. 52, № 11. С. 1262–1269 [Kravchenko A. N., Ekart A. K., Larionova A. Ya. Genetic diversity and differentiation of Siberian spruce populations at nuclear microsatellite loci // Rus. J. Genet. 2016. Vol. 52, N 11. P. 1142–1148].  
Крутовский К. В., Политов Д. В., Алтухов Ю. П., Милютин Л. И., Кузнецова Г. В., Ирошников А. П., Воробьев В. Н., Воробьева Н. А. Генетическая изменчивость сибирской кедровой сосны *Pinus sibirica* Du Tour. Сообщение IV. Генетическое разнообразие и степень генетической дифференциации между популяциями // Генетика. 1989. Т. 25, № 11. С. 2009–2032 [Krutovsky K. V., Politov, D. V., Altukhov Yu. P., Milyutin L. I., Kuznetsova G. V., Iroshnikov A. P., Vorobyev V. N., Vorobyeva N. A. Genetic variability in Siberian stone pine *Pinus sibirica* Du Tour. IV. Genetic diversity and differentiation between populations // Soviet Genet. 1989. Vol. 25, N 11. P. 1343–1362].  
Кулаков Е. Е., Сиволапов В. А., Воробьев Е. А., Сиволапов А. И. Генетическая изменчивость лиственницы Сукачева (*Larix sukaczewii* Djl.) в географических культурах под Воронежем // Лесотехн. журн. 2018. Т. 8, № 1 (29). С. 35–42.  
Орешкова Н. В., Белоконов М. М. Оценка генетической изменчивости лиственницы сибирской с использованием микросателлитного анализа // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2012. № 1 (84). С. 118–122.  
Орешкова Н. В., Белоконов М. М., Жамъянсурен С. Изменчивость ядерных микросателлитных локусов у лиственниц Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.) и камчатской (*Larix kamtchatica* (Rupr.) Carr) // Хвойные бореальной зоны. 2012. Т. 30, № 1-2. С. 145–151.  
Орешкова Н. В., Белоконов М. М., Жамъянсурен С. Генетическое разнообразие, популяционная структура и дифференциация лиственниц сибирской, Гмелина и Каяндера по данным SSR-маркеров // Генетика. 2013. Т. 49, № 2. С. 204–213 [Oreshkova N. V., Belokon M. M., Jamiyansuren S. Genetic diversity, population structure, and differentiation of Siberian larch, Gmelin larch, and Cajander larch on SSR-marker data // Rus. J. Genet. 2013. Vol. 49, N 2. P. 178–186].  
Орешкова Н. В., Бондар Е. И., Путинцева Ю. А., Шаров В. В., Кузьмин Д. А., Крутовский К. В. Разработка ядерных микросателлитных маркеров с длинными (трех-, четырех-, пяти- и шестинуклеотидными) мотивами для трех видов лиственницы на основе полногеномного *de novo* секвенирования лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) // Генетика. 2019. Т. 55, № 4. С. 418–425 [Oreshkova N. V., Bondar E. I., Putintseva Yu. A., Sharov V. V., Kuzmin D. A., Krutovsky K. V. Development of Nuclear Microsatellite Markers with Long (tri-, tetra-, penta-, and hexanucleotide) Motifs for Three Larch Species Based on the *de novo* Whole Genome Sequencing of Siberian Larch (*Larix sibirica* Ledeb.) // Rus. J. Genet. 2019. Vol. 55, N 4. P. 444–450].  
Орешкова Н. В., Седелникова Т. С., Ефремов С. П., Пименов А. В. Генетический полиморфизм сосны сибирской кедровой (*Pinus sibirica* Du Tour) в Кузнецком

- Алатау // Сиб. экол. журн. 2020. Т. 27, № 6. С. 677–688 [Oreshkova N. V., Sedel'nikova T. S., Efremov S. P., Pimenov A. V. Genetic Polymorphism of Siberian Stone Pine (*Pinus sibirica* Du Tour) in Kuznetsk Alatau // Contemporary Problems of Ecology. 2020. Vol. 13, N 6. P. 569–576].
- Орешкова Н. В., Седельникова Т. С., Пименов А. В., Ефремов С. П. Генетическая структура и дифференциация болотных и суходольных популяций сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) по ядерным микросателлитным локусам // Генетика. 2014. Т. 50, № 9. С. 1059–1066 [Oreshkova N. V., Sedel'nikova T. S., Pimenov A. V., Efremov S. P. Analysis of genetic structure and differentiation of the bog and dry land populations of *Pinus sibirica* Du Tour based on nuclear microsatellite loci // Rus. J. Genet. 2014. Vol. 50, N 9. P. 934–941].
- Пименов А. В., Ефимов Д. Ю., Первунин В. А. Топоэкологическая дифференциация растительности в Норильском промышленном районе // Сиб. экол. журн. 2014. Т. 21, № 6. С. 923–931 [Pimenov A. V., Efimov D. Yu., Pervunin V. A. Topoecological differentiation of vegetation in the Norilsk industrial region // Contemporary Problems of Ecology. 2014. Vol. 7, N 6. P. 923–931].
- Пономарева Т. В., Трефилова О. В., Богородская А. В., Шапченкова О. А. Эколого-функциональная оценка состояния почв в зоне аэротехногенного воздействия Норильского промышленного комплекса // Сиб. экол. журн. 2014. Т. 21, № 6. С. 987–996 [Ponomareva T. V., Trefilova O. V., Bogorodskaya A. V., Shapchenkova O. A. Ecological and functional estimation of soil condition within the zone of technogenic impact of Norilsk industrial complex // Contemporary Problems of Ecology. 2014. Vol. 7, N 6. P. 694–700].
- Попов П. П. Ель европейская и сибирская: структура, интерградация и дифференциация популяционных систем. Новосибирск: Наука, 2005. 231 с.
- Потокина Е. К., Орлова Л. В., Вишневская М. С., Алексеева Е. А., Потокин А. Ф., Егоров А. А. Генетическая дифференциация популяций ели на северо-западе России по результатам маркирования микросателлитных локусов // Экол. генетика. 2012. Т. 10, № 2. С. 40–49 [Potokina E. K., Orlova L. V., Vishnevskaya M. S., Alekseeva E. A., Potokin A. F., Egorov A. A. Genetic differentiation of spruce populations in northwest Russia according to the results of microsatellite loci analysis // Rus. J. Genet.: Appl. Res. 2013. Vol. 3. P. 352–360].
- Сурсо М. В., Барабин А. И., Болотов И. Н., Филиппов Б. Ю. Весеннее развитие пыльцы у лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) в северной подзоне тайги // Изв. вузов. Лесн. журн. 2012. № 6. С. 7–15.
- Телятников М. Ю., Пристяжнюк С. А. Антропогенное влияние предприятий Норильского промышленного района на растительный покров тундры и лесотундры // Сиб. экол. журн. 2014. Т. 21, № 6. С. 903–922 [Telyatnikov M. Yu., Pristyazhnyuk S. A. Anthropogenic influence of Norilsk industrial area on plant vegetation cover of the tundra and forest tundra // Contemporary Problems of Ecology. 2014. Vol. 7, N 6. P. 654–668].
- Шейкина О. В., Демаков Ю. П., Гладков Ю. Ф., Унженина О. В. Генетическая изменчивость и дифференциация суходольной и болотной ценопопуляций сосны обыкновенной в Республике Марий Эл // Науч. журн. КубГАУ. 2013. № 94 (10). С. 1–12.
- Babushkina E. A., Vaganov E. A., Gracheva A. M., Oreshkova N. V., Belokopytova L. V., Kostyakova T. V., Krutovsky K. V. The effect of individual genetic heterozygosity on general homeostasis, heterosis and resilience in Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.) using dendrochronology and microsatellite loci genotyping // Dendrochronologia. 2016. Vol. 38 (3). P. 26–37.
- Chakraborty R. Apparent heterozygote deficiencies observed in DNA typing data and their implications in forensic applications // Ann. Human Genet. 1992. Vol. 56, N 1. P. 45–57.
- Chen C., Liewlaksaneeyanawin C., Funda T., Kenawy A., Newton C. H., El-Kassaby Y. A. Development and characterization of microsatellite loci in western larch (*Larix occidentalis* Nutt.) // Mol. Ecol. Res. 2009. Vol. 9, N 3. P. 843–845.
- Devey M. E., Bell J. C., Smith D. N., Neale D. B., Moran G. F. A genetic linkage map for *Pinus radiata* based on RFLP, RAPD, and microsatellite markers // Theoret. Appl. Genet. 1996. Vol. 92, N 6. P. 673–679.
- Fluch S., Burg A., Kopecky D., Homolka A., Spiess N., Vondramin G. G. Characterization of variable EST SSR markers for Norway spruce (*Picea abies* L.) // BMC Res. Notes. 2011. Vol. 4 (401).
- Hodgetts R. B., Aleksyuk M. A., Brown A., Clarke C., MacDonald E., Nadeem S., Khaza D. Development of microsatellite markers for white spruce (*Picea glauca*) and related species // Theoret. Appl. Genet. 2001. Vol. 102, N 8. P. 1252–1258.
- Isoda K., Watanabe A. Isolation and characterization of microsatellite loci from *Larix kaempferi* // Mol. Ecol. Notes. 2006. Vol. 6, N 3. P. 664–666.
- Khaza P. D., Newton C. H., Rahman M. H., Jaquish B., Dancik B. P. Isolation, characterization, and inheritance of microsatellite loci in alpine larch and western larch // Genome. 2000. Vol. 43, N 3. P. 439–448.
- Kirdeyanov A. V., Krusic P. J., Shishov V. V., Vaganov E. A., Fertikov A. I., Myglan V. S., Barinov V. V., Browse J., Esper J., Ilyin V. A., Knorre A. A., Korets M. A., Kukarskikh V. V., Mashukov D. A., Onuchin A. A., Piermattei A., Pimenov A. V., Prokushkin A. S., Ryzhkova V. A., Shishikin A. S., Smith K. T., Taynik A. V., Wild M., Zorita E., Buntgen U. Ecological and conceptual consequences of Arctic pollution // Ecol. Lett. 2020. Vol. 23, N 12. P. 1827–1837.
- Kruse S., Epp L. S., Wiczorek M., Pestryakova L. A., Stoof-Leichsenring K. R., Herzschuh U. High gene flow and complex treeline dynamics of *Larix* Mill. stands on the Taymyr Peninsula (north-central Siberia) revealed by nuclear microsatellites // Tree Genet. & Genom. 2018. Vol. 14 (19).
- Liu Z.-L., Cheng Ch., Li J. High genetic differentiation in natural populations of *Pinus henryi* and *Pinus tabulaeformis* as revealed by nuclear microsatellites // Biochem. Syst. Ecol. 2012. Vol. 42. P. 1–9.
- Peakall R. O. D., Smouse P. E. GENALEX 6: genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research // Mol. Ecol. Notes. 2006. Vol. 6, N 1. P. 288–295.
- Scotti I., Magni F., Paglia G. P., Morgante M. Trinucleotide microsatellites in Norway spruce (*Picea abies*): their features and the development of molecular markers // Theoret. Appl. Genet. 2002. Vol. 106, N 1. P. 40–50.

Vandelight K. K., Nkongolo K. K., Mehes M., Beckett P. Genetic analysis of *Pinus banksiana* and *Pinus resinosa* populations from stressed sites contaminated with metals in Northern Ontario (Canada) // Chem. Ecol. 2011. Vol. 27, N 4. P. 369–380.

Wright S. The interpretation of population structure by F-statistics with special regard to systems of mating // Evolution. 1965. Vol. 19, N 3. P. 395–420.

## Genetic diversity of cenopopulations of *Larix sibirica* Ledeb. and *Picea obovata* Ledeb. on Taimyr

N. V. ORESHKOVA<sup>1, 2, 3</sup>, T. S. SEDEL'NIKOVA<sup>2</sup>, A. V. PIMENOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup> FRC KSC SB RAS  
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28  
E-mail: oreshkova@ksc.krasn.ru

<sup>2</sup> V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS  
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28

<sup>3</sup> Siberian Federal University  
660041, Krasnoyarsk, Svobodny av., 79

DNA polymorphism of cenopopulations *Larix sibirica* Ledeb. and *Picea obovata* Ledeb., growing in different ecological conditions of the southern part of the Taimyr Peninsula, was studied, their genetic diversity in nuclear microsatellite loci was estimated:  $N_a = 3.30$ ,  $N_e = 1.75$ ,  $H_o = 0.263$ ,  $H_e = 0.366$  – in *L. sibirica* and  $N_a = 2.92$ ,  $N_e = 1.59$ ,  $H_o = 0.351$ ,  $H_e = 0.338$  – in *P. obovata*. In general, a deficiency of heterozygous genotypes ( $F = 0.177$ ) in the studied populations of Siberian larch, and an excess of heterozygous genotypes ( $F = -0.051$ ) in populations of Siberian spruce were noted. The genetic features of these species under the influence of technogenic emissions in the Norilsk industrial region were examined. In *L. sibirica*, a higher allelic diversity and a higher level of inbreeding were found in the cenopopulation from an ecologically safe area, while a higher level of heterozygosity and a lower value of the inbreeding coefficient were noted in the area with an increased level of pollution. Comparison of the cenopopulation samples of *P. obovata* showed that the genetic structure of the stand from the ecologically favorable area is practically in equilibrium, while a 10 % excess of heterozygotes is recorded in the more polluted area. Despite certain differences between the two studied species, in general, cenopopulations of *L. sibirica* and *P. obovata* growing in the areas with an increased, but acceptable level of technogenic load in the Norilsk industrial region are characterized by higher values of almost all parameters of genetic variability. We suggest that this pattern reflects the activation of adaptive processes in coniferous populations from extreme growing conditions.

**Key words:** *Larix sibirica*, *Picea obovata*, microsatellites, genetic diversity, heterozygosity, Taimyr.