

УДК 630.11:630.165:581.9
DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2018.1.08

Биоклиматические рамочные модели для климатипов лесных древесных пород

Г. А. Александров – Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, Москва, Российская Федерация

Н. Е. Проказин – Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, заведующий отделом, кандидат сельскохозяйственных наук, Пушкино, Московская обл., Российская Федерация

Предлагаются биоклиматические рамочные модели для климатипов (климатических экотипов) основных лесных древесных пород. Предлагаемые модели разделяют территорию России на климатоны – районы, которые можно считать относительно однородными по биоклиматическим факторам среды, определяющим генетическую адаптацию древесных пород к климатическим условиям.

Ключевые слова: биоклиматическое моделирование, рамочные модели, климатипы

Для ссылок: <http://dx.doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2018.1.08>
Александров, Г. А. Биоклиматические рамочные модели для климатипов лесных древесных пород [Электронный ресурс] / Г. А. Александров, Н. Е. Проказин // Лесхоз. информ. : электрон. сетевой журн. – 2018. – № 1. – С. 90–102. URL: <http://lhi.vniilm.ru/>

Введение

Географическое распространение древесных пород в значительной степени ограничивается климатическими условиями. Приспособленность к определенным климатическим условиям является результатом или фенотипической пластичности, или генетической адаптации.

Фенотипическая пластичность – способность данного генотипа продуцировать различные фенотипы в зависимости от условий окружающей среды. Фенотипические признаки проявляются в течение жизни одного поколения и, как правило, не наследуются (за исключением тех случаев, когда включается эпигенетический механизм наследования).

Генетическая адаптация происходит путем естественного отбора, в результате которого происходит генетическое разделение вида на экотипы, как результат действия отбора в своеобразных условиях внешней среды и проявления адаптации к этим условиям. Под влиянием климатических факторов возникают климатические экотипы – климатипы [1].

Таким образом, климатип может представлять собой генетически различимую популяцию (совокупность особей одного вида, заселяющих определенную территорию, свободно скрещивающихся друг с другом и в той или иной степени изолированных от других совокупностей [1]), обладающую признаками, благоприятными для адаптации к определенным климатическим условиям (например, к более холодному или к более сухому климату [2–4]), географическое распространение которой ограничено климатическими параметрами за пределами адаптации.

Метод моделирования

Для биоклиматического моделирования распространения лесных древесных пород используют рамочные модели [5–11]. Разработка таких моделей включает следующие этапы: 1) анализ данных о встречаемости изучаемой лесной породы; 2) установление климатических по-

казателей, которые влияют на ее встречаемость; 3) определение значений выявленных показателей («рамки»), в пределах которых порода встречается.

Распространение древесных пород, как правило, сдерживается общим недостатком тепла и влаги. О недостатке тепла нередко судят по биотемпературе (BT) [12] – сумме среднемесячных температур выше 0°, но ниже 30 °С, деленной на 12. В зависимости от биотемпературы выделяют 6 зон: полярная, субполярная, бореальная, суббореальная, субтропическая, тропическая. О недостатке влаги судят по коэффициенту увлажнения (MI), который характеризует отношение годового количества осадков к годовой величине испаряемости. На основании значения индекса увлажнения выделяют 8 подзон: супераридная, пераридная, аридная, семиаридная, субгумидная, гумидная, пергумидная, супергумидная.

Если в рамках ареала лесной породы климатические условия меняются в широких диапазонах, то есть основания предполагать, что существуют несколько климатипов данной лесной породы, каждый из которых приспособлен к особенностям климатических условий района произрастания. Рамочные модели климатипов, приведенные ниже, предполагают, что популяции лесной породы, произрастающие в разных биомах, могут различаться генетически. Кроме того, подразумевается, что популяции, произрастающие в пределах одного биома, могут различаться по морозостойкости и засухоустойчивости.

Результаты исследований

Распространение древесных пород сдерживается минимальной температурой воздуха и временным дефицитом влаги в жаркое время года. Поэтому в рамочных моделях, предлагаемых ниже, используются такие климатические показатели, как температура самого холодного зимнего месяца и слой осадков самого сухого летнего месяца. Кроме того, используется среднегодовая температура воздуха для выделения климатипов, произрастающих в зоне вечной мерзлоты,

а также некоторые другие показатели климатических условий.

Дуб черешчатый. Распространение дуба черешчатого сдерживается общим недостатком тепла в северной части его ареала и влаги в южной части, а также длительностью и интенсивностью морозов и засух. Ареал распространения дуба черешчатого не выходит за пределы гумидной и субгумидной подзон суббореальной зоны. В рамках этого ареала климатические показатели меняются в широких диапазонах, что дает основание предположить существование следующих климатипов:

✓ Гумидный:

$$K_1 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 6) \cdot \theta(MI(x, y) - 1.0) \cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 10) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 50)$$

✓ Гумидный засухоустойчивый:

$$K_2 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 6) \cdot \theta(MI(x, y) - 1.0) \cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 10) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 30) \cdot \theta(1 - \theta(P_{\min}(x, y) - 50))$$

✓ Гумидный морозостойкий:

$$K_3 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 6) \cdot \theta(MI(x, y) - 1.0) \cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 17) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 30) \cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 10))$$

✓ Гумидный морозостойкий засухоустойчивый:

$$K_4 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 6) \cdot \theta(MI(x, y) - 1.0) \cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 17) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 30) \cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 10)) \cdot \theta(1 - \theta(P_{\min}(x, y) - 50))$$

✓ Субгумидный:

$$K_5 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 6) \cdot \theta(MI(x, y) - 0.5) \cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 10) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 50) \cdot \theta(1 - \theta(MI(x, y) - 1.0))$$

✓ Субгумидный засухоустойчивый:

$$K_6 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 6) \cdot \theta(MI(x, y) - 0.5) \cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 10) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 30) \cdot \theta(1 - \theta(MI(x, y) - 1.0)) \cdot \theta(1 - \theta(P_{\min}(x, y) - 50))$$

✓ Субгумидный морозостойкий:

$$K_7 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 6) \cdot \theta(MI(x, y) - 0.5) \cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 17) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 50) \cdot \theta(1 - \theta(MI(x, y) - 1.0)) \cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 10))$$

✓ Субгумидный морозостойкий засухоустойчивый:

$$K_8 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 6) \cdot \theta(MI(x, y) - 0.5) \cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 17) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 30) \cdot \theta(1 - \theta(MI(x, y) - 1.0)) \cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 10)) \cdot \theta(1 - \theta(P_{\min}(x, y) - 50))$$

где:

x – широта, град.;

y – долгота, град.;

BT – биотемпература, °C;

MI – индекс увлажнения;

$T_{\min}$ – температура самого холодного зимнего месяца, °C;

$P_{\min}$ – слой осадков самого сухого летнего месяца, мм;

θ – функция Хевисайда:

$$\theta(z) = \begin{cases} \theta(0, z < 0 \\ 1, z \geq 0. \end{cases}$$

Ель европейская. Распространение ели европейской сдерживается недостатком тепла в северной части ареала и сухостью климата в его южной части. Ель европейская выдерживает морозы до -40 °C. Тем не менее при $T_{\min}$ ниже -15 °C ель европейская сменяется елью сибирской, а при $T_{\min}$ выше -2 °C – лиственными породами. Таким образом, распространение ели европейской сдерживается не только биоклиматическими, но и геоботаническими факторами. На Кавказе ель европейская сменяется елью восточной, несмотря на то что биоклиматические условия этого района мало отличаются от биоклиматических условий местопроизрастания ели европейской.

Климатипы ели европейской могут быть заданы в виде следующей рамочной модели:

✓ Суббореальный гумидный:

$$K_1 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 6) \cdot \theta(MI(x, y) - 1.0) \cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 15) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 40) \cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 2))$$

✓ Бореальный субгумидный:

$$K_2 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 3) \cdot \theta(MI(x, y) - 0.5) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 15) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 40) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 6)) \cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 2)) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(MI(x, y) - 1.0))$$

✓ Бореальный гумидный:

$$K_3 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 3) \cdot \theta(MI(x, y) - 1) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 15) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 40) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 6)) \cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 2))$$

✓ Субполярный гумидный:

$$K_4 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 2.5) \cdot \theta(MI(x, y) - 1) \cdot$$

$$\theta(T_{\min}(x, y) + 15) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 40) \cdot$$

$$\theta(1 - \theta(BT(x, y) - 3)) \cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 2))$$

✓ Субполярный субгумидный:

$$K_5 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 2.5) \cdot \theta(MI(x, y) - 0.5) \cdot$$

$$\theta(T_{\min}(x, y) + 15) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 40) \cdot \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 3)) \cdot$$

$$\theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 2)) \cdot \theta(1 - \theta(MI(x, y) - 1.0))$$

Ель сибирская. Распространение ели сибирской в европейской части России и на Дальнем Востоке сдерживается геоботаническими и биоклиматическими факторами. В европейской части России ель сибирская сменяется елью европейской при $T_{\min}$ выше -10°C , а на Дальнем Востоке – елью аянской в районах, где средняя температура октября выше 0°C .

Климатипы ели сибирской могут быть заданы в виде следующих рамочных моделей:

в европейской части России –

✓ Суббореальный гумидный:

$$K_1 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 6) \cdot \theta(MI(x, y) - 1.0) \cdot$$

$$\theta(T_{\min}(x, y) + 42) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 40) \cdot$$

$$\theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 10))$$

✓ Бореальный субгумидный:

$$K_2 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 3) \cdot \theta(MI(x, y) - 0.5) \cdot$$

$$\theta(T_{\min}(x, y) + 42) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 40) \cdot \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 6)) \cdot$$

$$\theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 10)) \cdot \theta(1 - \theta(MI(x, y) - 1.0))$$

✓ Бореальный гумидный:

$$K_3 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 3) \cdot \theta(MI(x, y) - 1) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 42) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 40) \cdot \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 6)) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 10))$$

✓ Субполярный гумидный:

$$K_4 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 2.5) \cdot \theta(MI(x, y) - 1) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 42) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 40) \cdot \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 3)) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 10))$$

✓ Субполярный субгумидный:

$$K_5 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 2.5) \cdot \theta(MI(x, y) - 0.5) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 42) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 40) \cdot \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 3)) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 10)) \cdot \theta(1 - \theta(MI(x, y) - 1.0))$$

в Сибири –

✓ Суббореальный гумидный:

$$K_1 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 6) \cdot \theta(MI(x, y) - 1.0) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 42) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 40) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 2)) \cdot \theta(T_a(x, y) + 5)$$

✓ Бореальный субгумидный:

$$K_2 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 3) \cdot \theta(MI(x, y) - 0.5) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 42) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 40) \cdot \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 6)) \cdot$$

$$\theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 2)) \cdot \theta(1 - \theta(MI(x, y) - 1.0)) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_a(x, y) + 5)$$

✓ Бореальный гумидный:

$$K_3 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 3) \cdot \theta(MI(x, y) - 1) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 42) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 40) \cdot \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 6)) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 2)) \cdot \theta(T_a(x, y) + 5)$$

✓ Субполярный гумидный:

$$K_4 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 2.5) \cdot \theta(MI(x, y) - 1) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 42) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 25) \cdot \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 3)) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 2)) \cdot \theta(T_{\max}(x, y) - 12.5)$$

✓ Субполярный субгумидный:

$$K_5 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 2.5) \cdot \theta(MI(x, y) - 0.25) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 42) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 25) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 3)) \cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 2)) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(MI(x, y) - 1.0)) \cdot \theta(T_{\max}(x, y) - 12.5)$$

✓ Бореальный субгумидный мерзлотный:

$$K_6 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 3) \cdot \theta(MI(x, y) - 0.25) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 42) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 25) \cdot \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 6)) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 2)) \cdot \theta(1 - \theta(MI(x, y) - 1.0)) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(T_a(x, y) + 5)) \cdot \theta(T_{\max}(x, y) - 12.5)$$

- ✓ Бореальный гумидный мерзлотный:

$$K_7 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 3) \cdot \theta(MI(x, y) - 1) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 42) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 25) \theta(1 - (BT(x, y) - 6)) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 2)) \theta(1 - \theta(T_a(x, y) + 5)) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\max}(x, y) - 12.5);$$

на Дальнем Востоке:

- ✓ Суббореальный гумидный:

$$K_1 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 6) \cdot \theta(MI(x, y) - 1.0) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 42) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 40) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 2)) \cdot \theta(T_a(x, y) + 5) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(T_{\text{oct}}(x, y)))$$

- ✓ Бореальный субгумидный:

$$K_2 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 3) \cdot \theta(MI(x, y) - 0.5) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 42) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 40) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 6)) \cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 2)) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(MI(x, y) - 1.0)) \cdot \theta(T_a(x, y) + 5) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(T_{\text{oct}}(x, y)))$$

- ✓ Бореальный гумидный:

$$K_3 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 3) \cdot \theta(MI(x, y) - 1) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 42) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 40) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 6)) \cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 2)) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_a(x, y) + 5) \theta(1 - \theta(T_{\text{oct}}(x, y)))$$

- ✓ Субполярный гумидный:

$$K_4 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 2.5) \cdot \theta(MI(x, y) - 1) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 42) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 25) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 3)) \cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 2)) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\max}(x, y) - 12.5) \theta(1 - \theta(T_{\text{oct}}(x, y)))$$

- ✓ Субполярный субгумидный:

$$K_5 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 2.5) \cdot \theta(MI(x, y) - 0.25) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 42) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 25) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 3)) \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 2)) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(MI(x, y) - 1.0)) \cdot \theta(T_{\max}(x, y) - 12.5) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(T_{\text{oct}}(x, y)))$$

- ✓ Бореальный субгумидный мерзлотный:

$$K_6 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 3) \cdot \theta(MI(x, y) - 0.25) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 42) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 25) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 6)) \cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 2)) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(MI(x, y) - 1.0)) \theta(1 - \theta(T_a(x, y) + 5)) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\max}(x, y) - 12.5) \theta(1 - \theta(T_{\text{oct}}(x, y)))$$

- ✓ Бореальный гумидный мерзлотный:

$$K_7 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \}; F(x, y) = \theta(BT(x, y) -$$

$$3) \cdot \theta(MI(x, y) - 1) \cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 42) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) -$$

$$25) \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 6)) \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 2)) \theta(1 - \theta(T_a$$

$$(x, y) + 5)) \cdot \theta(T_{\max}(x, y) - 12.5) \theta(1 - \theta(T_{\text{oct}}(x, y))),$$

где:

T_a – среднегодовая температура, °C;

$T_{\max}$ – температура самого теплого летнего месяца, °C;

T_{oct} – средняя температура октября. Критерий, на основании которого определяется граница распространения ели сибирской, связанная с геоботаническими факторами.

Предполагается, что ель аянская лучше адаптирована к условиям теплой осени, типичным для морского климата Приморья, чем ель сибирская, ареал которой в основном находится в районах с континентальным и резко континентальным климатом.

Ель аянская. Ель аянская распространена в Приморье, Корее, Японии, северо-востоке Китая, встречается в Южной Якутии. Климатические условия ее ареала характеризуются относительно теплой осенью и дождливым летом.

Климатотипы ели аянской могут быть заданы в виде следующей рамочной модели:

- ✓ Суббореальный гумидный:

$$K_1 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 6) \cdot \theta(MI(x, y) - 1.0) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 42) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 50) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 2)) \cdot \theta(T_a(x, y) + 5) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\text{oct}}(x, y) + 5))$$

- ✓ Бореальный субгумидный:

$$K_2 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 3) \cdot \theta(MI(x, y) - 0.75) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 42) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 50) \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 6)) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 2)) \theta(1 - \theta(MI(x, y) - 1.0)) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_a(x, y) + 5) \cdot \theta(T_{\text{oct}}(x, y) + 5))$$

- ✓ Бореальный гумидный:

$$K_3 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 3) \cdot \theta(MI(x, y) - 1) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 42) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 50) \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 6)) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 2)) \cdot \theta(T_a(x, y) + 5) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\text{oct}}(x, y) + 5))$$

✓ Субполярный гумидный:

$$K_4 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 2.5) \cdot \theta(MI(x, y) - 1) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 42) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 50) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 3)) \cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 2)) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\max}(x, y) - 10) \cdot \theta(T_{\text{oct}}(x, y) + 5))$$

✓ Субполярный субгумидный:

$$K_5 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 2.5) \cdot \theta(MI(x, y) - 0.75) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 42) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 50) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 3)) \cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 2)) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(MI(x, y) - 1.0)) \cdot \theta(T_{\max}(x, y) - 10) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\text{oct}}(x, y) + 5))$$

✓ Бореальный субгумидный мерзлотный:

$$K_6 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 3) \cdot \theta(MI(x, y) - 0.75) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 42) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 25) \cdot \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 6)) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 2)) \cdot \theta(1 - \theta(MI(x, y) - 1.0)) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(T_a(x, y) + 5)) \cdot \theta(T_{\max}(x, y) - 10) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\text{oct}}(x, y) + 5))$$

✓ Бореальный гумидный мерзлотный:

$$K_7 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 3) \cdot \theta(MI(x, y) - 1) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 42) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 50) \cdot \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 6)) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 2)) \cdot \theta(1 - \theta(T_a(x, y) + 5)) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\max}(x, y) - 10) \cdot \theta(T_{\text{oct}}(x, y) + 5))$$

Сосна обыкновенная. Сосна обыкновенная может произрастать в широком диапазоне климатических условий. Несмотря на высокую жароустойчивость и засухоустойчивость, происходит смена сосны обыкновенной другими породами в районах, где $T_{\min}$ выше $-0,5$ °C. В Сибири сосна распространяется не так далеко на север, как ель.

Климатипы сосны обыкновенной могут быть заданы в виде следующих рамочных моделей:

в европейской части России –

✓ Суббореальный субгумидный:

$$K_1 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 6) \cdot \theta(MI(x, y) - 0.75) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(MI(x, y) - 1.0)) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 40) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 40) \cdot (1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 0.5))$$

✓ Суббореальный гумидный:

$$K_2 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 6) \cdot \theta(MI(x, y) - 1.0) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 40) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 40) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 0.5))$$

✓ Бореальный субгумидный:

$$K_3 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 3) \cdot \theta(MI(x, y) - 0.5) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 40) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 40) \cdot \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 6)) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 0.5)) \cdot \theta(1 - \theta(MI(x, y) - 1.0)) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_a(x, y) + 5)$$

✓ Бореальный гумидный:

$$K_4 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 3) \cdot \theta(MI(x, y) - 1) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 40) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 40) \cdot \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 6)) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 0.5)) \cdot \theta(T_a(x, y) + 5)$$

✓ Субполярный гумидный:

$$K_5 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 2.5) \cdot \theta(MI(x, y) - 1) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 40) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 40) \cdot \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 3)) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 0.5))$$

✓ Субполярный субгумидный:

$$K_6 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 2.5) \cdot \theta(MI(x, y) - 0.5) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 40) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 40) \cdot \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 3)) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 0.5)) \cdot \theta(1 - \theta(MI(x, y) - 1.0));$$

в Сибири –

✓ Суббореальный субгумидный:

$$K_1 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 6) \cdot \theta(MI(x, y) - 0.75) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(MI(x, y) - 1.0)) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 40) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 40) \cdot (1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 0.5))$$

✓ Суббореальный гумидный:

$$K_2 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 6) \cdot \theta(MI(x, y) - 1.0) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 40) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 40) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 0.5))$$

✓ Бореальный субгумидный:

$$K_3 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 3) \cdot \theta(MI(x, y) - 0.5) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 40) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 40) \cdot \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 6)) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 0.5)) \cdot \theta(1 - \theta(MI(x, y) - 1.0))$$

✓ Бореальный гумидный:

$$K_4 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 3) \cdot \theta(MI(x, y) - 1) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x, y) + 40) \cdot \theta(P_{\min}(x, y) - 40) \cdot \theta(1 - \theta(BT(x, y) - 6)) \cdot$$

$$\cdot \theta(1 - \theta(T_{\min}(x, y) + 0.5))$$

✓ Субполярный гумидный:

$$K_5 = \{ \{x, y\} : F(x, y) = 1 \};$$

$$F(x, y) = \theta(BT(x, y) - 2.5) \cdot \theta(MI(x, y) - 1) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x,y)+40) \cdot \theta(P_{\min}(x,y)-40) \theta(1-\theta(BT(x,y)-3)) \cdot \\ \cdot \theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+0.5)) \cdot \theta(T_{\max}(x,y)-15)$$

✓ Субполярный субгумидный:

$$K_6 = \{ \{x,y\} : F(x,y) = 1 \};$$

$$F(x,y) = \theta(BT(x,y)-2.5) \cdot \theta(MI(x,y)-0.5) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x,y)+40) \cdot \theta(P_{\min}(x,y)-40) \theta(1-\theta(BT(x,y)-3)) \cdot \\ \cdot \theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+0.5)) \theta(1-\theta(MI(x,y)-1.0)) \cdot \\ \cdot \theta(T_{\max}(x,y)-15)$$

✓ Бореальный субгумидный мерзлотный:

$$K_7 = \{ \{x,y\} : F(x,y) = 1 \};$$

$$F(x,y) = \theta(BT(x,y)-3) \cdot \theta(MI(x,y)-0.5) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x,y)+40) \cdot \theta(P_{\min}(x,y)-40) \theta(1-\theta(BT(x,y)-6)) \cdot \\ \cdot \theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+0.5)) \theta(1-\theta(MI(x,y)-1.0)) \cdot \\ \cdot \theta(T_{\max}(x,y)-15) \theta(1-\theta(T_a(x,y)+5))$$

✓ Бореальный гумидный мерзлотный:

$$K_8 = \{ \{x,y\} : F(x,y) = 1 \};$$

$$F(x,y) = \theta(BT(x,y)-3) \cdot \theta(MI(x,y)-1) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x,y)+40) \cdot \theta(P_{\min}(x,y)-40) \theta(1-\theta(BT(x,y)-6)) \cdot \\ \cdot \theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+0.5)) \cdot \theta(T_{\max}(x,y)-15) \cdot \\ \cdot \theta(1-\theta(T_a(x,y)+5))$$

на Дальнем Востоке –

✓ Суббореальный субгумидный:

$$K_1 = \{ \{x,y\} : F(x,y) = 1 \};$$

$$F(x,y) = \theta(BT(x,y)-6) \cdot \theta(MI(x,y)-0.75) \cdot$$

$$\cdot \theta(1-\theta(MI(x,y)-1.0)) \cdot \theta(P_{\min}(x,y)-40) \cdot \\ \cdot \theta(T_{\min}(x,y)+40) (1-\theta(T_{\min}(x,y)+0.5)) \cdot \\ \cdot \theta(1-\theta(T_{\text{oct}}(x,y)+3))$$

✓ Суббореальный гумидный:

$$K_2 = \{ \{x,y\} : F(x,y) = 1 \};$$

$$F(x,y) = \theta(BT(x,y)-6) \cdot \theta(MI(x,y)-1.0) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x,y)+40) \cdot \theta(P_{\min}(x,y)-40) \cdot \\ \cdot \theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+0.5)) \theta(1-\theta(T_{\text{oct}}(x,y)+3))$$

✓ Бореальный субгумидный:

$$K_3 = \{ \{x,y\} : F(x,y) = 1 \};$$

$$F(x,y) = \theta(BT(x,y)-3) \cdot \theta(MI(x,y)-0.5) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x,y)+40) \cdot \theta(P_{\min}(x,y)-40) \theta(1-\theta(BT(x,y)-6)) \cdot \\ \cdot \theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+0.5)) \theta(1-\theta(MI(x,y)-1.0)) \cdot \\ \cdot \theta(1-\theta(T_{\text{oct}}(x,y)+3))$$

✓ Бореальный гумидный:

$$K_4 = \{ \{x,y\} : F(x,y) = 1 \};$$

$$F(x,y) = \theta(BT(x,y)-3) \cdot \theta(MI(x,y)-1) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x,y)+40) \cdot \theta(P_{\min}(x,y)-40) \theta(1-\theta(BT(x,y)-6)) \cdot \\ \cdot \theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+0.5)) \theta(1-\theta(T_{\text{oct}}(x,y)+3))$$

✓ Субполярный гумидный:

$$K_5 = \{ \{x,y\} : F(x,y) = 1 \};$$

$$F(x,y) = \theta(BT(x,y)-2.5) \cdot \theta(MI(x,y)-1) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x,y)+40) \cdot \theta(P_{\min}(x,y)-40) \theta(1-\theta(BT(x,y)-3)) \cdot \\ \cdot \theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+0.5)) \cdot \theta(T_{\max}(x,y)-15) \cdot \\ \cdot \theta(1-\theta(T_{\text{oct}}(x,y)+3))$$

✓ Субполярный субгумидный:

$$K_6 = \{ \{x,y\} : F(x,y) = 1 \};$$

$$F(x,y) = \theta(BT(x,y)-2.5) \cdot \theta(MI(x,y)-0.5) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x,y)+40) \cdot \theta(P_{\min}(x,y)-40) \theta(1-\theta(BT(x,y)-3)) \cdot \\ \cdot \theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+0.5)) \theta(1-\theta(MI(x,y)-1.0)) \cdot \\ \cdot \theta(T_{\max}(x,y)-15) \theta(1-\theta(T_{\text{oct}}(x,y)+3))$$

✓ Бореальный субгумидный мерзлотный:

$$K_7 = \{ \{x,y\} : F(x,y) = 1 \};$$

$$F(x,y) = \theta(BT(x,y)-3) \cdot \theta(MI(x,y)-0.5) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x,y)+40) \cdot \theta(P_{\min}(x,y)-40) \theta(1-\theta(BT(x,y)-6)) \cdot \\ \cdot \theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+0.5)) \theta(1-\theta(MI(x,y)-1.0)) \cdot \\ \cdot \theta(T_{\max}(x,y)-15) \theta(1-\theta(T_a(x,y)+5)) \cdot \\ \cdot \theta(1-\theta(T_{\text{oct}}(x,y)+3))$$

✓ Бореальный гумидный мерзлотный:

$$K_8 = \{ \{x,y\} : F(x,y) = 1 \};$$

$$F(x,y) = \theta(BT(x,y)-3) \cdot \theta(MI(x,y)-1) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x,y)+40) \cdot \theta(P_{\min}(x,y)-40) \theta(1-\theta(BT(x,y)-6)) \cdot \\ \cdot \theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+0.5)) \cdot \theta(T_{\max}(x,y)-15) \cdot \\ \cdot \theta(1-\theta(T_a(x,y)+5)) \theta(1-\theta(T_{\text{oct}}(x,y)+3))$$

Сосна кедровая сибирская. Распространение сосны кедровой сибирской в европейской части России ограничивается районами, где $T_{\min}$ ниже -16°C , а в Сибири, в зоне вечной мерзлоты, где $T_{\max}$ выше $15,5^{\circ}\text{C}$. В Забайкалье при $T_{\max}$ ниже $16,5^{\circ}\text{C}$ и на Дальнем Востоке сосна кедровая сибирская сменяется кедровым стлаником.

Климатотипы сосны кедровой сибирской могут быть заданы в виде следующих рамочных моделей:

в европейской части России –

✓ Суббореальный субгумидный:

$$K_1 = \{ \{x,y\} : F(x,y) = 1 \};$$

$$F(x,y) = \theta(BT(x,y)-6) \cdot \theta(MI(x,y)-0.75) \cdot$$

$$\cdot \theta(1-\theta(MI(x,y)-1.0)) \cdot \theta(P_{\min}(x,y)-50) \cdot \\ \cdot \theta(T_{\min}(x,y)+40) (1-\theta(T_{\min}(x,y)+16))$$

✓ Суббореальный гумидный:

$$K_2 = \{ \{x,y\} : F(x,y) = 1 \};$$

$$F(x,y) = \theta(BT(x,y)-6) \cdot \theta(MI(x,y)-1.0) \cdot$$

$$\cdot \theta(T_{\min}(x,y)+40) \cdot \theta(P_{\min}(x,y)-50) \cdot \\ \cdot \theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+16))$$

✓ Бореальный субгумидный:

$$K_3 = \{ \{x,y\} : F(x,y) = 1 \};$$

$$F(x,y)=\theta(BT(x,y)-3)\cdot\theta(MI(x,y)-0.5)\cdot$$

$$\cdot\theta(T_{\min}(x,y)+40)\cdot\theta(P_{\min}(x,y)-50)\theta(1-\theta(BT(x,y)-6))\cdot$$

$$\cdot\theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+16))\theta(1-\theta(MI(x,y)-1.0))$$

✓ Бореальный гумидный:

$$K_4=\{x,y\}: F(x,y)=1\};$$

$$F(x,y)=\theta(BT(x,y)-3)\cdot\theta(MI(x,y)-1)\cdot$$

$$\cdot\theta(T_{\min}(x,y)+40)\cdot\theta(P_{\min}(x,y)-50)\cdot$$

$$\cdot\theta(1-\theta(BT(x,y)-6))\theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+16));$$

в Сибири –

✓ Суббореальный субгумидный:

$$K_1=\{x,y\}: F(x,y)=1\};$$

$$F(x,y)=\theta(BT(x,y)-6)\cdot\theta(MI(x,y)-0.75)\cdot$$

$$\cdot\theta(1-\theta(MI(x,y)-1.0))\cdot\theta(P_{\min}(x,y)-50)\cdot$$

$$\cdot\theta(T_{\min}(x,y)+40)(1-\theta(T_{\min}(x,y)+16))$$

✓ Суббореальный гумидный:

$$K_2=\{x,y\}: F(x,y)=1\};$$

$$F(x,y)=\theta(BT(x,y)-6)\cdot\theta(MI(x,y)-1.0)\cdot$$

$$\cdot\theta(T_{\min}(x,y)+40)\cdot\theta(P_{\min}(x,y)-50)\cdot$$

$$\cdot\theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+16))$$

✓ Бореальный субгумидный:

$$K_3=\{x,y\}: F(x,y)=1\}; F(x,y)=\theta(BT(x,y)-$$

$$3)\cdot\theta(MI(x,y)-0.5)\cdot\theta(T_{\min}(x,y)+40)\cdot\theta(P_{\min}(x,y)-$$

$$50)\theta(1-\theta(BT(x,y)-6))\theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+16))\theta(1-$$

$$\theta(MI(x,y)-1.0))\cdot\theta(T_a(x,y)+5)$$

✓ Бореальный гумидный:

$$K_4=\{x,y\}: F(x,y)=1\};$$

$$F(x,y)=\theta(BT(x,y)-3)\cdot\theta(MI(x,y)-1)\cdot$$

$$\cdot\theta(T_{\min}(x,y)+40)\cdot\theta(P_{\min}(x,y)-50)\theta(1-\theta(BT(x,y)-6))\cdot$$

$$\cdot\theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+16))\cdot\theta(T_a(x,y)+5)$$

✓ Бореальный субгумидный мерзлотный:

$$K_7=\{x,y\}: F(x,y)=1\};$$

$$F(x,y)=\theta(BT(x,y)-3)\cdot\theta(MI(x,y)-0.5)\cdot$$

$$\cdot\theta(T_{\min}(x,y)+40)\cdot\theta(P_{\min}(x,y)-50)\theta(1-\theta(BT(x,y)-6))\cdot$$

$$\cdot\theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+0.5))\theta(1-\theta(MI(x,y)-1.0))\cdot$$

$$\cdot\theta(T_{\max}(x,y)-15.5)\theta(1-\theta(T_a(x,y)+5))$$

✓ Бореальный гумидный мерзлотный:

$$K_8=\{x,y\}: F(x,y)=1\};$$

$$F(x,y)=\theta(BT(x,y)-3)\cdot\theta(MI(x,y)-1)\cdot$$

$$\cdot\theta(T_{\min}(x,y)+40)\cdot\theta(P_{\min}(x,y)-50)\theta(1-\theta(BT(x,y)-6))\cdot$$

$$\cdot\theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+0.5))\cdot\theta(T_{\max}(x,y)-15.5)\cdot$$

$$\cdot\theta(1-\theta(T_a(x,y)+5)).$$

Лиственница Сукачева. Распространение лиственницы Сукачева в европейской части России ограничивается районами, где $T_{\min}$ ниже $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ее климатипы могут быть заданы в виде следующей рамочной модели:

✓ Суббореальный субгумидный:

$$K_1=\{x,y\}: F(x,y)=1\};$$

$$F(x,y)=\theta(BT(x,y)-6)\theta(1-\theta(BT(x,y)-6.5))\cdot$$

$$\cdot\theta(MI(x,y)-0.5)\theta(1-\theta(MI(x,y)-1.0))\cdot\theta(P_{\min}(x,y)-50)\cdot$$

$$\cdot\theta(T_{\min}(x,y)+50)(1-\theta(T_{\min}(x,y)+13))$$

✓ Суббореальный гумидный:

$$K_2=\{x,y\}: F(x,y)=1\};$$

$$F(x,y)=\theta(BT(x,y)-6)\theta(1-\theta(BT(x,y)-6.5))\cdot$$

$$\cdot\theta(MI(x,y)-1.0)\cdot\theta(T_{\min}(x,y)+50)\cdot$$

$$\cdot\theta(P_{\min}(x,y)-50)\theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+13))$$

✓ Бореальный субгумидный:

$$K_3=\{x,y\}: F(x,y)=1\};$$

$$F(x,y)=\theta(BT(x,y)-3)\cdot\theta(MI(x,y)-0.5)\cdot$$

$$\cdot\theta(T_{\min}(x,y)+50)\cdot\theta(P_{\min}(x,y)-50)\theta(1-\theta(BT(x,y)-6))\cdot$$

$$\cdot\theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+13))\theta(1-\theta(MI(x,y)-1.0))$$

✓ Бореальный гумидный:

$$K_4=\{x,y\}: F(x,y)=1\};$$

$$F(x,y)=\theta(BT(x,y)-3)\cdot\theta(MI(x,y)-1)\cdot$$

$$\cdot\theta(T_{\min}(x,y)+50)\cdot\theta(P_{\min}(x,y)-50)\theta(1-\theta(BT(x,y)-6))\cdot$$

$$\cdot\theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+13)).$$

Лиственница сибирская. Распространение лиственницы сибирской в Сибири ограничивается районами, где T_a ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, но выше $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$. В районах, где T_a ниже $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$, а также в Забайкалье она сменяется лиственницей даурской. Климатипы лиственницы сибирской могут быть заданы в виде следующей рамочной модели:

✓ Суббореальный субгумидный:

$$K_1=\{x,y\}: F(x,y)=1\};$$

$$F(x,y)=\theta(BT(x,y)-6)\cdot\theta(MI(x,y)-0.5)\cdot$$

$$\cdot\theta(1-\theta(MI(x,y)-1.0))\cdot\theta(P_{\min}(x,y)-50)\cdot$$

$$\cdot\theta(T_{\min}(x,y)+42)(1-\theta(T_{\min}(x,y)+16))\cdot$$

$$\cdot\theta(T_a(x,y)+5)\theta(1-\theta(T_a(x,y)))$$

✓ Суббореальный гумидный:

$$K_2=\{x,y\}: F(x,y)=1\};$$

$$F(x,y)=\theta(BT(x,y)-6)\cdot\theta(MI(x,y)-1.0)\cdot$$

$$\cdot\theta(T_{\min}(x,y)+42)\cdot\theta(P_{\min}(x,y)-50)\cdot$$

$$\cdot\theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+16))\cdot\theta(T_a(x,y)+5)\theta(1-\theta(T_a(x,y)))$$

✓ Бореальный субгумидный:

$$K_3=\{x,y\}: F(x,y)=1\};$$

$$F(x,y)=\theta(BT(x,y)-3)\cdot\theta(MI(x,y)-0.5)\cdot$$

$$\cdot\theta(T_{\min}(x,y)+42)\cdot\theta(P_{\min}(x,y)-50)\theta(1-\theta(BT(x,y)-6))\cdot$$

$$\cdot\theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+16))\theta(1-\theta(MI(x,y)-1.0))\cdot$$

$$\cdot\theta(T_a(x,y)+5)\theta(1-\theta(T_a(x,y)))$$

✓ Бореальный гумидный:

$$K_4=\{x,y\}: F(x,y)=1\};$$

$$F(x,y)=\theta(BT(x,y)-3)\cdot\theta(MI(x,y)-1)\cdot$$

$$\cdot\theta(T_{\min}(x,y)+42)\cdot\theta(P_{\min}(x,y)-50)\theta(1-\theta(BT(x,y)-6))\cdot$$

$$\cdot\theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+16))\cdot\theta(T_a(x,y)+5)\theta(1-\theta(T_a(x,y)))$$

✓ Субполярный гумидный:

$$K_5=\{\{x,y\}: F(x,y)=1\};$$

$$F(x,y)=\theta(BT(x,y)-2.5)\cdot\theta(MI(x,y)-1)\cdot$$

$$\cdot\theta(T_{\min}(x,y)+42)\cdot\theta(P_{\min}(x,y)-50)\theta(1-\theta(BT(x,y)-3))\cdot$$

$$\cdot\theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+16))\cdot\theta(T_a(x,y)+6)\theta(1-\theta(T_a(x,y)))$$

✓ Субполярный субгумидный:

$$K_6=\{\{x,y\}: F(x,y)=1\};$$

$$F(x,y)=\theta(BT(x,y)-2.5)\cdot\theta(MI(x,y)-0.5)\cdot$$

$$\cdot\theta(T_{\min}(x,y)+42)\cdot\theta(P_{\min}(x,y)-50)\theta(1-\theta(BT(x,y)-3))\cdot$$

$$\cdot\theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+16))\cdot\theta(1-\theta(MI(x,y)-1.0))\cdot$$

$$\cdot\theta(T_a(x,y)+6)\theta(1-\theta(T_a(x,y)))$$

✓ Бореальный субгумидный мерзлотный:

$$K_7=\{\{x,y\}: F(x,y)=1\};$$

$$F(x,y)=\theta(BT(x,y)-3)\cdot\theta(MI(x,y)-0.5)\cdot$$

$$\cdot\theta(T_{\min}(x,y)+42)\cdot\theta(P_{\min}(x,y)-50)\theta(1-\theta(BT(x,y)-6))\cdot$$

$$\cdot\theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+16))\theta(1-\theta(MI(x,y)-1.0))\cdot$$

$$\cdot\theta(T_a(x,y)+6)\theta(1-\theta(T_a(x,y)+5))$$

✓ Бореальный гумидный мерзлотный:

$$K_8=\{\{x,y\}: F(x,y)=1\};$$

$$F(x,y)=\theta(BT(x,y)-3)\cdot\theta(MI(x,y)-1)\cdot$$

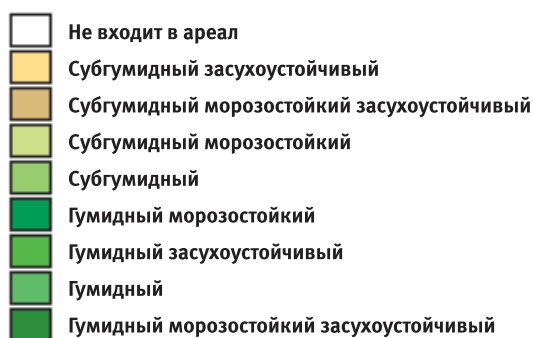
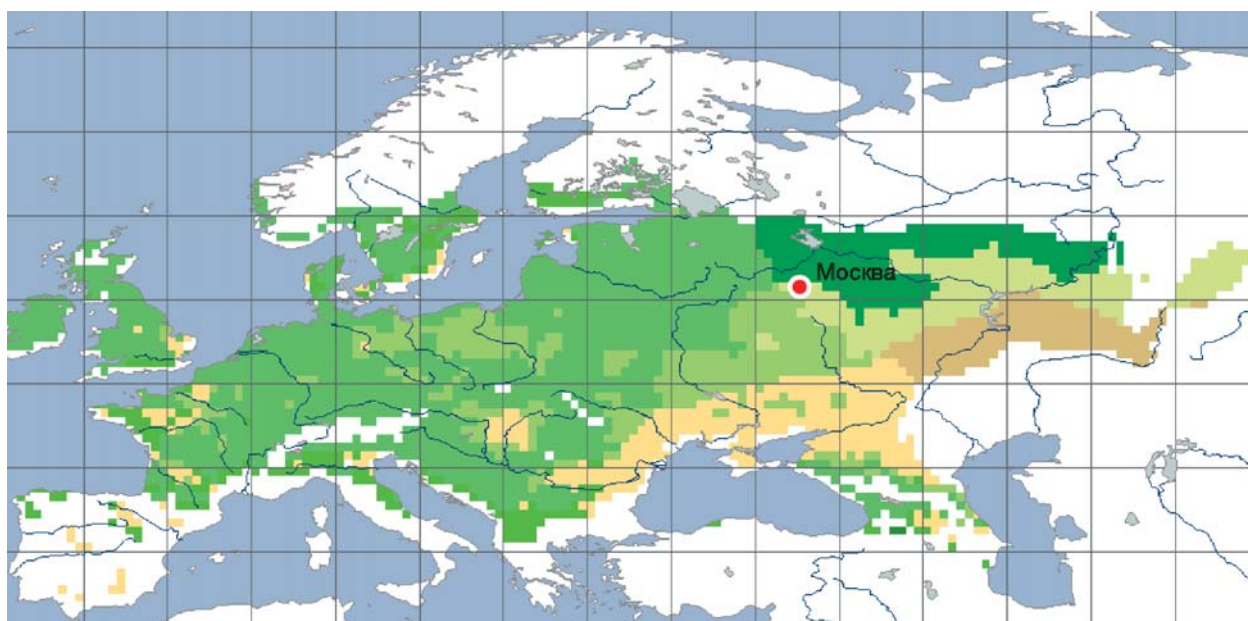
$$\cdot\theta(T_{\min}(x,y)+42)\cdot\theta(P_{\min}(x,y)-50)\theta(1-\theta(BT(x,y)-6))\cdot$$

$$\cdot\theta(1-\theta(T_{\min}(x,y)+16))\cdot\theta(T_a(x,y)+6)\cdot$$

$$\cdot\theta(1-\theta(T_a(x,y)+5)).$$

Обсуждение

Предлагаемые рамочные модели климатипов разделяют территорию России на климатопы (рисунок) – районы, которые можно считать относительно однородными по биоклиматическим факторам среды. Так как абсолютно идентичных условий произрастания практически не бывает, то



Климатопы дуба черешчатого

выделенные климатопы можно фрагментировать по задаваемым параметрам, моделируя различные варианты климатических условий. Однако не все различия в климатических условиях местопроизрастания являются существенными для инициации механизмов генетической адаптации. Вариации климатических условий, которые укладываются в рамки фенотипической пластичности древесной породы, необязательно приводят к формированию климатипов, т.е. адаптация к условиям произрастания может выражаться в фенотипических признаках, которые проявляются в течение жизни одного поколения и не передаются по наследству. Существенными можно считать межбиомные различия климатических условий [13]. Есть основания полагать, что популяции древесных пород, произрастающие в разных биомах, отличаются генетически. Чтобы проверить эту почти очевидную гипотезу, необходимо провести широкомасштабные эколого-генетические исследования. Пример таких исследований – широкомасштабное изучение генетического разнообразия дуба черешчатого (а именно, вариаций ДНК хлоропластов), проведенное с 1996 по 2000 г. [14]. В процессе исследования обследовано более 2,5 тыс. популяций, более 12,5 тыс. деревьев и выявлено 39 гаплотипов, 7 из которых встречаются на территории Российской Федера-

ции. Собранный материал предоставляет определенные возможности для разработки генетико-экологического подхода к выделению климатипов дуба черешчатого, но преждевременно предполагать, что он дает исчерпывающий ответ на вопрос о том, как выделять соответствующие им климатопы. Поэтому традиционное использование термина «климатип» для обозначения популяций древесной породы, произрастающих в существенно различающихся климатических условиях, – по-прежнему актуально.

Заключение

Рамочные модели климатипов необходимы для уточнения неблагоприятных воздействий, которые может оказать на лесное хозяйство предполагаемое изменение глобального климата. Метапопуляционный анализ [15] служит одним из инструментов для оценки реакции редких видов животных или растений на изменения окружающей среды [16]. Он также может быть использован для разработки системной стратегии адаптации лесного хозяйства к предполагаемым изменениям климата [17]. Рамочные модели климатипов основных древесных пород – первый шаг в этом направлении.

Список использованной литературы

1. Указания по лесному семеноводству в Российской Федерации. Утверждены Рослесхозом 11.01.2000. – М. : ВНИИЦлесресурс, 2000.
2. Turesson, G. The species and the varieties as ecological units / G. Turesson // *Hereditas*, 1922. – 3 (1): 100-113.
3. Linhart, Y. B. Evolutionary significance of local genetic differentiation in plants / Y. B. Linhart, M. C. Grant // *Annual Review of Ecology and Systematics*. – 1996. – 27: 237–277.
4. Savolainen, O. Gene flow and local adaptation in trees / O. Savolainen, T. Pyhäjärvi and, T. Knürr // *Annual Review of Ecology and Systematics*. – 2007. – 38: 595–619.
5. Intraspecific responses to climate in *Pinus sylvestris* / G. E. Rehfeldt, N. M. Tchepakova, Y. I. Parfenova, W. R. Wykoff, N. A. Kuzmina and, L. I. Milyutin // *Global Change Biology*. – 2002. – 8: 912–929.
6. Парфенова, Е. И. Климатические ареалы светлохвойных пород Сибири и их применение в лесоводстве / Е. И. Парфенова, Н. М. Чебакова // *Актуальные проблемы лесного комплекса: сб. науч. тр. – Вып. 8. – Брянск, 2004. – С. 41–43.*
7. Парфенова, Е. И. Климатические ареалы светлохвойных и их применение в лесоводстве / Е. И. Парфенова, Н. М. Чебакова // *Актуальные проблемы лесного комплекса: сб. науч. тр. – Вып. 9. – Брянск, 2004. – С. 36–38.*
8. Парфенова, Е. И. Биоклиматические модели горных лесов Сибири / Е. И. Парфенова, Н. М. Чебакова // *Лесоведение*. – 2009. – № 5. – С. 34–42.
9. Парфенова, Е. И. Биоклиматические модели коренных насаждений гор Южной Сибири и их применение : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.00.16, 03.00.28 / Елена Ивановна Парфенова. – Красноярск, 2007. – 17 с.
10. Изменение климата и его воздействие на экосистемы, население и хозяйство российской части Алтае-Саянского экорегиона: оценочный доклад / Под ред. А. О. Кокорина. – М. : ВВФ России, 2011. – 168 с.
11. Box, E. O. *Macroclimate and Plant Forms: An Introduction to Predictive Modeling in Phytogeography* / E. O. Box. – The Hague : Junk, 1981. – 258 p.
12. Holdridge, L. R. Determination of world plant formations from simple climate data / L. R. Holdridge // *Science*. – 1947. – 105, 367–368.
13. Kramer, W. Biome models / W. Kramer // *Encyclopedia of global environmental change*. – 2002. – 2. – P. 166–171.
14. Chloroplast DNA variation in European white oaks: phylogeography and patterns of diversity based on data from over 2,600 populations / R. I. Petit, U. M. Csaikl [edc.] // *For. Ecol. Manage.* – 2002. – 156: 5–26.
15. Levin, S. A. The problem of patterns and scales in ecology / S. A. Levin // *Ecology*. – 1992. – 73: 1943–1967.
16. Hui, C. Metapopulation dynamics and distribution, and environmental heterogeneity induced by niche construction / C. Hui, Z. Li, D-X Yue // *Ecological Modelling*. – 2004. – 177(1): 107–118.
17. Adaptive Silviculture for Climate Change: A National Experiment in Manager-Scientist Partnerships to Apply an Adaptation Framework / L. M. Nagel, B. J. Palik, M. A. Battaglia [edc.] // *Journal of Forestry*. – 2017. – 115 (to appear).

References

1. Ukazaniya po lesnomu semenovodstvu v Rossijskoj Federacii. Utverzhdeny Rosleskhozom 11.01.2000. – М. : VNIIClesresurs, 2000.
2. Turesson, G. The species and the varieties as ecological units / G. Turesson // *Hereditas*, 1922. – 3 (1): 100-113.

3. Linhart, Y. B. Evolutionary significance of local genetic differentiation in plants / Y. B. Linhart, M. C. Grant // *Annual Review of Ecology and Systematics*. – 1996. – 27: 237–277.
4. Savolainen, O. Gene flow and local adaptation in trees / O. Savolainen, T. Pyhäjärvi, T. Knürr // *Annual Review of Ecology and Systematics*. – 2007. – 38: 595–619.
5. Intraspecific responses to climate in *Pinus sylvestris* / G. E. Rehfeldt, N. M. Tchebakova, Y. I. Parfenova, W. R. Wykoff, N. A. Kuzmina and, L. I. Milyutin // *Global Change Biology*. – 2002. – 8: 912–929.
6. Parfenova, E. I. Klimaticheskie arealy svetlohojnyh porod Sibiri i ih primenenie v lesovodstve / E. I. Parfenova, N. M. Chebakova // *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa: sb. nauch. tr.* – Vyp. 8. – Bryansk, 2004. – S. 41–43.
7. Parfenova, E. I. Klimaticheskie arealy svetlohojnyh i ih primenenie v lesovodstve / E. I. Parfenova, N. M. Chebakova // *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa: sb. nauch. tr.* – Vyp. 9. – Bryansk, 2004. – S. 36–38.
8. Parfenova, E. I. Bioklimaticheskie modeli gornyh lesov Sibiri / E. I. Parfenova, N. M. Chebakova // *Lesovedenie*. – 2009. – № 5. – S. 34–42.
9. Parfenova, E. I. Bioklimaticheskie modeli korennyh nasazhdenij gor Yuzhnoj Sibiri i ih primenenie : avtoref. dis. ... kand. biol. nauk : 03.00.16, 03.00.28 / Elena Ivanovna Parfenova. – Krasnoyarsk, 2007. – 17 s.
10. Izmenenie klimata i ego vozdejstvie na ehkositemy, naselenie i hozyajstvo rossijskoj chasti Altae-Sayanskogo ehkoregiona: ocenochnyj doklad / Pod red. A. O. Kokorina. – M. : VVF Rossii, 2011. – 168 s.
11. Box, E. O. Macrocclimate and Plant Forms: An Introduction to Predictive Modeling in Phytogeography / E. O. Box. – The Hague : Junk, 1981. – 258 s.
12. Holdridge, L. R. Determination of world plant formations from simple climate data / L. R. Holdridge // *Science*. – 1947. – 105: 367–368.
13. Kramer, W. Biome models / W. Kramer // *Encyclopedia of global environmental change*. – 2002. – 2. – P. 166–171.
14. Chloroplast DNA variation in European white oaks: phylogeography and patterns of diversity based on data from over 2,600 populations / R. I. Petit, U. M. Csaikl [edc.] // *For. Ecol. Manage.* – 2002. – 156: 5–26.
15. Levin, S. A. The problem of patterns and scales in ecology / S. A. Levin // *Ecology*. – 1992. – 73: 1943–1967.
16. Hui, C. Metapopulation dynamics and distribution, and environmental heterogeneity induced by niche construction / S. Hui, Z. Li, D-X Yue // *Ecological Modelling*. – 2004. – 177(1): 107–118.
17. Adaptive Silviculture for Climate Change: A National Experiment in Manager-Scientist Partnerships to Apply an Adaptation Framework / L. M. Nagel, B. J. Palik, M. A. Battaglia [edc.] // *Journal of Forestry*. – 2017. – 115 (to appear).

Bioclimatic Framework Models for Forest Tree Species Provenances

G. Alexandrov – *A. Obukhov Atmosphere Physics Institute, RAS, Senior Researcher, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Moscow, Russian Federation*
N. Prokazin – *Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, Head of the Department, Candidate of Agricultural Sciences, Pushkino, Moscow region, Russian Federation*

Key words: bioclimatic modeling, climatic ecotypes, provenances.

The paper highlights issues of key tree species adaptation to climatic conditions. It is suggested that climatic factors impact genetic division of species into ecotypes [1] according to the site climatic conditions and development of genetically various population provenances with features favourable for adaptation to certain climatic conditions for instance colder or drier climate. Provenance geographical distribution is specified with bioclimatic framework models [2].

The authors shaped bioclimatic framework models for provenances of Common oak, Norway spruce, Siberian spruce, Ajan spruce, Scots pine, Siberian stone pine, Sukachev larch and Siberian larch. The offered provenance framework models divide Russian territory into climatopes – areas presumably with relatively uniform habitat bioclimatic factors. In author's opinion provenance framework models are needed to specify adverse impacts of climate change on forest management which is critical for development of forest management adaptation strategy to estimated global climate change [3].

References

1. Linhart, Y. B. Evolutionary significance of local genetic differentiation in plants / Y. B. Linhart, M. C. Grant // *Annual Review of Ecology and Systematics*. – 1996. – 27: 237–277.
2. Intraspecific responses to climate in *Pinus sylvestris* / G. E. Rehfeldt, N. M. Tchebakova, Y. I. Parfenova, W. R. Wykoff, N. A. Kuzmina and, L. I. Milyutin // *Global Change Biology*. – 2002. – 8: 912–929.
3. Adaptive Silviculture for Climate Change: A National Experiment in Manager-Scientist Partnerships to Apply an Adaptation Framework / L. M. Nagel, B. J. Palik, M. A. Battaglia [edc.] // *Journal of Forestry*. – 2017. – 115 (to appear).