

# ВЛИЯНИЕ ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ДЕРЕВЬЕВ НА ВЕТРОУСТОЙЧИВОСТЬ ОДНОЯРУСНЫХ ДРЕВЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ

© Н.В. Филенкова, Ю.В. Захаров, В.Г Суховольский

УДК 630\*181.23

ГОУ ВПО «Сибирский государственный технологический университет» г. Красноярск, Россия

Работа поддержана РФФИ грант №06-04-48303.

На основе проведенных натурных исследований рассмотрено влияние взаимного расположения деревьев на ветроустойчивость одноярусных древесных насаждений. Исследования проводились на двух пробных площадях: в горных лесах Саян (Восточная Сибирь) и на территории Инской ленты Минусинских ленточных боров (юг Красноярского края). В качестве показателей, характеризующих взаимодействие деревьев в насаждении, использовались параметры: число связей с соседними деревьями  $n$  и относительная высота дерева  $H_{rel}$ . Введены парциальные функции экологической полезности для оценки ветроустойчивости одноярусных насаждений в зависимости от взаимного расположения деревьев. Вычислены оптимальные значения числа связей с соседними деревьями и относительной высоты над пологом леса, характеризующие максимальную устойчивость дерева к ветровому воздействию.

The influence of mutual position of trees on even-ages tree stands wind stability is considered. Field studies were conducted in mountain forests of the Sayan (East of Siberia) and on the territory of Inskoy stripe of Minusinsk pine forest (South of Krasnoyarsk region). The nearby surroundings of the tree  $n$  and the relative height of tree under the stand canopy  $H_{rel}$  are used as parameters which characterized trees interaction on the stand. The functions of partial ecological utility for the estimation of the even-ages tree stands wind stability depending on mutual position of trees are introduced. The nearby surroundings of the tree and the relative height of tree under the stand canopy which characterized the maximum wind stability of tree under the wind impact are calculated.

Ветер оказывает сильное воздействие на лесные насаждения, а хозяйственная деятельность в лесу и климатические изменения повышают риск вывала дерева под воздействием ветра. Для оценки ветроустойчивости отдельного дерева ранее была введена модель, описывающая реакцию дерева на ветровое воздействие с учетом влияния структуры корневой системы [1]. Однако ветроустойчивость насаждения характеризуется не только суммой показателей ветроустойчивости отдельных деревьев в лесу, но и вследствие кооперативных эффектов взаимодействия деревьев в насаждении такая устойчивость определяется также пространственной структурой насаждения и ландшафтно-экологическими условиями произрастания.

В настоящей работе на основе проведенных натурных исследований рассмотрено влияние взаимного расположения деревьев на ветроустойчивость одноярусных древесных насаждений.

Исследования проводились на двух пробных площадях. Пробная площадь № 1 размером 3,7 га располагается в горных лесах Саян (Восточная Сибирь) и находится на высоте около 880 м над уровнем моря. В состав насаждения входили пихта сибирская *Abies sibirica* L. и кедр сибирский (сосна кедровая) *Pinus sibirica* L., породный состав насаждения 9ПК, преобладают деревья 2 класса роста. С 1979 г. с интервалом в несколько лет производилось картирование. В

июле 2003 г. проводилось картирование местоположения деревьев и определялись их координаты на пробной площади, высота, измерялся диаметр на уровне 1,3 м, размеры проекции кроны по сторонам света. В этом же году после картирования под воздействием ветра произошел вывал и излом около 10% деревьев. Новое картирование деревьев на пробной площади, включая картирование деревьев, вываленных ветром, проводилось в июле 2004 г.

Пробная площадь № 2 размером 4,1 га находится на территории Инской ленты Минусинских ленточных боров (юг Красноярского края). Насаждение представляло собой чистый сосняк (*Pinus sylvestris* L.) в возрасте 100 – 120 лет. Картирование местоположения деревьев было проведено в 1999 г. и в 2000 г. после прошедшего урагана, когда произошел вывал и излом около 50% деревьев на пробной площади.

На рисунке 1 приведены фрагменты планов насаждений на пробных площадях. На планах фрагментов пробных площадей представлены деревья первого яруса (высота деревьев выше 10 м). На рисунках крестиком обозначены координаты вываленных и изломанных деревьев, положение неповрежденных деревьев помечено точками. Положение крон деревьев аппроксимировано прямоугольниками. Пересекающиеся прямоугольники описывают перекрытие крон деревьев.

Одним из основных факторов, влияющих на вероятность вывала дерева, является тип его корневой системы. Известно, что для пихты

сибирской характерен поверхностный тип корневой системы, а для кедра сибирского и сосны обыкновенной - стержневой [2].

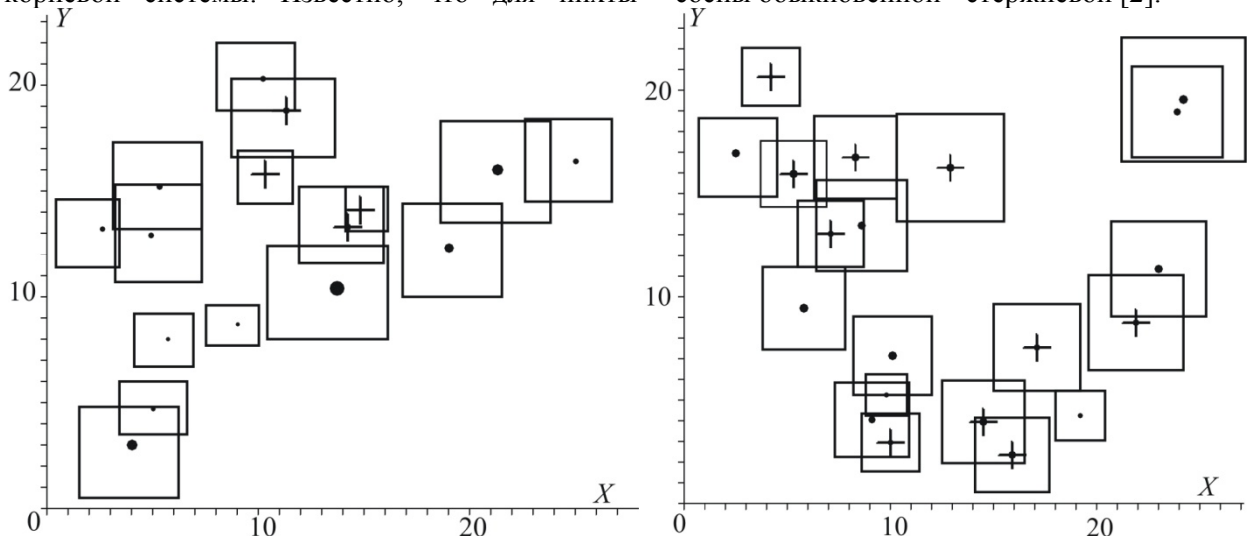


Рисунок 1 - Фрагменты плана насаждения: а - пробная площадь №1; б - пробная площадь №2

В качестве показателей, характеризующих взаимодействие деревьев в насаждении, использовались такие параметры, как число связей с соседними деревьями  $n$ , т.е. число деревьев, пересекающихся кроной с данным деревом, и  $H_{rel}$  - относительная высота дерева, равная отношению высоты дерева на среднюю высоту насаждения, характеризующая относительное превышение высоты дерева над пологом насаждения.

теоретическое уравнение неизвестно, была построена аппроксимирующая кривая в виде

$$P = \frac{a_1}{a_2 + n^k}$$

Функция выбиралась дробно-рациональной с учетом предположения монотонной зависимости  $P$  от  $n$ . Коэффициенты  $a_1$  и  $a_2$  были определены методом нелинейной регрессии с учетом требования, что в предельном случае бесконечного числа соседей (при  $n \rightarrow \infty$ ) вероятность вывала должна стремиться к нулю. Коэффициент  $k$  определялся из условия минимума квадратов невязки. Величина  $2a_1 - a_2 = n^k$  характеризует число связей с соседними деревьями  $n^k$  при вероятности вывала  $1/2$ .

При анализе влияния взаимодействия между деревьями на их ветроустойчивость было определено число связей с соседними деревьями  $n$  для каждого дерева на пробных площадях. Построена зависимость вероятности вывала дерева от числа связей с соседними деревьями (рисунок 2). Для каждой пробной площади на основе натуральных данных, в связи с тем, что

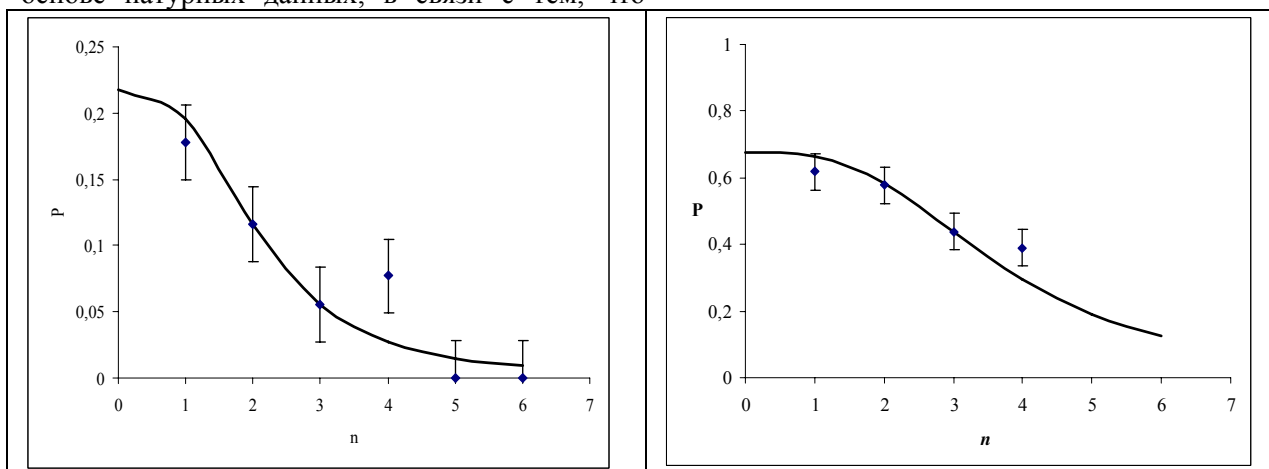


Рисунок 2 - Зависимость вероятности вывала дерева от числа связей  $n$  с соседними деревьями (столбик - стандартная ошибка данных): а - пробная площадь №1; б - пробная площадь №2

Из рисунка 2 видно, что вероятность вывала дерева уменьшается с увеличением числа соседей. Это наблюдается как в случаях вывала малого числа деревьев на пробной площади №1, так и в случае массового вывала деревьев на пробной площади №2.

Еще одним параметром, определяющим влияние взаимодействия деревьев в насаждении на ветроустойчивость, является относительная высота дерева над пологом насаждения  $H_{rel}$ . Для каждой пробной площади по данным наблюдений была построена зависимость вероятности вывала дерева от относительной высоты дерева над пологом насаждения (рисунок 3). Можно полагать, что в предельном случае при  $H_{rel} \leq$

0 вероятность  $P$  вывала должна равняться нулю, а при  $H_{rel} \rightarrow \infty P \rightarrow 1$ . Кроме того, предполагается, что зависимость между  $P$  и  $H_{rel}$  монотонна.

Из разнообразных функций, удовлетворяющих этим условиям, для аппроксимации данных натуральных наблюдений была выбрана дробно-рациональная функция  $P = \frac{H_{rel}^m}{A + H_{rel}^m}$ , где

коэффициенты  $A$  и  $m$  определялись из условия минимума квадратов невязки. Величина  $A$  характеризует относительную высоту дерева над пологом насаждения  $H_{rel}^m$  при вероятности вывала  $\frac{1}{2}$ .

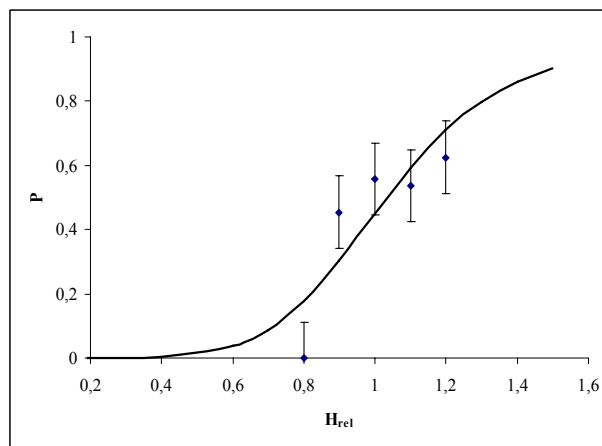
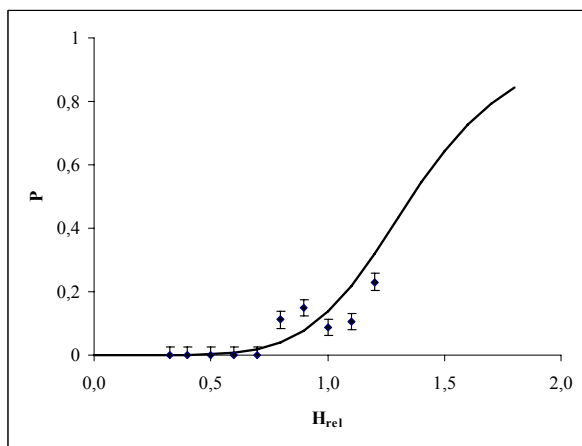


Рисунок 3 - Зависимости вероятности вывала дерева от относительной высоты дерева над пологом леса (столбик - стандартная ошибка данных): *a* - пробная площадь №1; *b* - пробная площадь №2

На рисунке 3 видно, что для обеих площадей вероятность вывала дерева с высотой, меньшей высоты полога леса, близка к нулю. На пробной площади №2 для деревьев с высотой, близкой к высоте полога леса, вероятность вывала достаточно высока (фактически произошел массовый вывал таких деревьев), а для таких же деревьев на пробной площади №1 вероятность вывала мала. Как видно, форма графиков на рис. 3 качественно совпадает, это говорит о независимости этого кооперативного эффекта от места и условий произрастания дерева.

Вероятность вывала дерева тем меньше, чем больше число связей с соседними деревьями и чем меньше относительная высота дерева над пологом насаждения. Однако, чем ниже дерево по сравнению со своими соседями и чем больше число соседних деревьев, тем

выше конкуренция за свет, минеральные вещества и влагу со стороны соседних деревьев, и тем больше опасность гибели этого дерева вследствие нехватки ресурсов. Таким образом, можно говорить об оптимальности условий произрастания дерева, рассматривая оптимальные условия как компромисс между необходимостью доступа к свету и сопротивлением ветру.

Вероятности интенсивности конкурентных и кооперативных эффектов воздействия на дерево соседних деревьев характеризуют так называемые функции парциальной экологической полезности [3]. Парциальная функция экологической полезности кооперативного эффекта устойчивости дерева в зависимости от относительной высоты  $H_{rel}$  имеет следующий вид:

$$r_1 = 1 - \frac{H_{rel}^m}{A + H_{rel}^m},$$

где  $A$  и  $m$  – константы, определяемые из натуральных данных.

Функция экологической полезности конкуренции деревьев за свет минимальна, когда превышение высоты дерева над соседями стремится к нулю. В качестве функции парциальной экологической полезности конкуренции деревьев за свет, в зависимости от относительной высоты дерева над пологом леса  $H_{rel}$ , можно использовать функцию

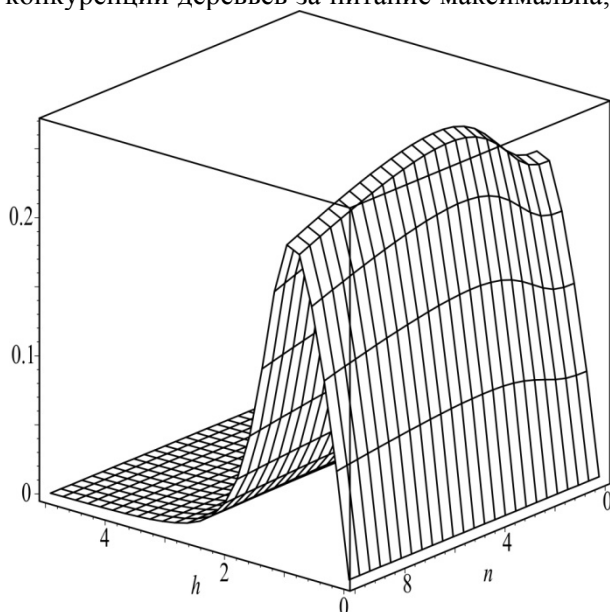
$$r_2 = 1 - \frac{B}{B + H_{rel}}.$$

Парциальная функция экологической полезности кооперативного эффекта устойчивости дерева в зависимости от числа связей с ближайшими соседями  $n$  имеет следующий вид

$$r_3 = 1 - \frac{t_1}{t_2 + n^k},$$

где  $t_1$ ,  $t_2$  и  $k$  – константы, определяемые из натуральных данных.

Функция экологической полезности конкуренции деревьев за питание максимальна,



когда число ближайших соседей стремится к нулю. В качестве парциальной функции экологической полезности конкуренции деревьев за питание в зависимости от числа ближайших соседей  $n$ , можно использовать функцию

$$r_4 = 1 - \frac{n^2}{D + n^2}.$$

Общую функцию экологической полезности  $R(h, n)$  можно записать как произведение функций парциальной полезности:  $R(H_{rel}, n) = r_1 \cdot r_2 \cdot r_3 \cdot r_4$ .

Согласно принципу максимальной экологической полезности общая полезность должна быть максимальной [3]. Оптимальные значения для числа связей с соседними деревьями и относительной высоты дерева были найдены численно, используя натурные данные.

Константы для пробной площади № 1:  $t_1 = 2,01$ ,  $t_2 = 9,25$ ,  $A = 6,3$ ,  $D = 600$ ,  $B = 2$ .

Оптимальные значения:  $n = 4$ ,  $H_{rel} = 0,96$ .

Константы для пробной площади № 2:  $t_1 = 33,33$ ,  $t_2 = 49,32$ ,  $A = 1,22$ ,  $D = 30$ ,  $B = 1,5$ .

Оптимальные значения:  $n = 4$ ,  $H_{rel} = 0,73$ .

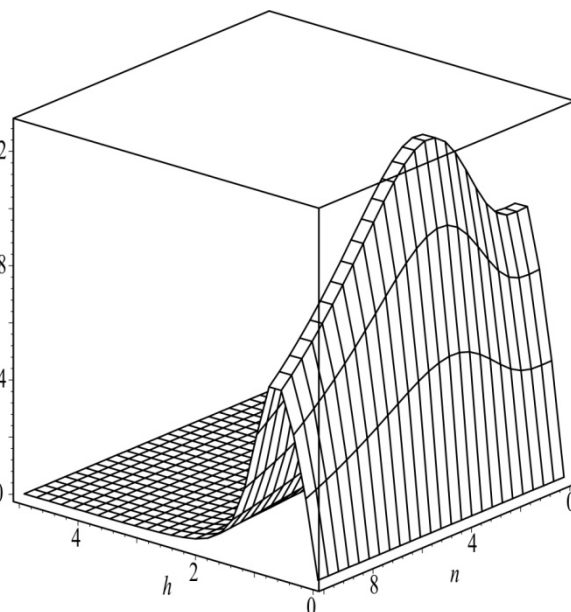


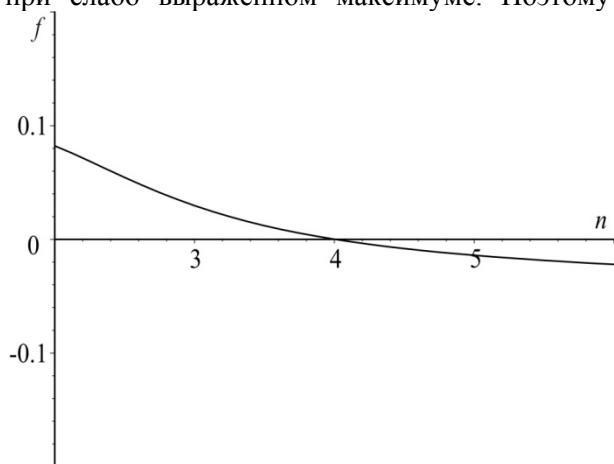
Рисунок 4 - Общая функция экологической полезности: *a* - пробная площадь №1; *b* - пробная площадь №2

Сравнивая полученные оптимальные решения устойчивости дерева к ветровому воздействию для двух пробных площадей и натурные данные, введем понятие субоптимальных значений параметров влияния взаимного расположения деревьев,

характеризующих устойчивость дерева к вывалу, которые лежат в окрестности оптимальных значений и заметно не влияют на вероятность вывала дерева. Для разных насаждений интервал субоптимальных значений параметров будет отличаться. Таким

образом, чем больше интервал возможных субоптимальных параметров, тем большее число деревьев устойчиво к ветровому воздействию.

Для функции полезности в зависимости от параметра  $n$  при ярко выраженном максимуме и, тем самым, малом интервале возможных субоптимальных параметров относительные изменения функции полезности будут существенно больше, чем такая же величина при слабо выраженном максимуме. Поэтому



можно ввести представление об интервалах таких относительных изменений, характеризующих число связей с соседними деревьями, определяющих устойчивость дерева. Относительное изменение пропорционально логарифмической производной функции полезности по параметру

$$n: f'(n) = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial n}.$$

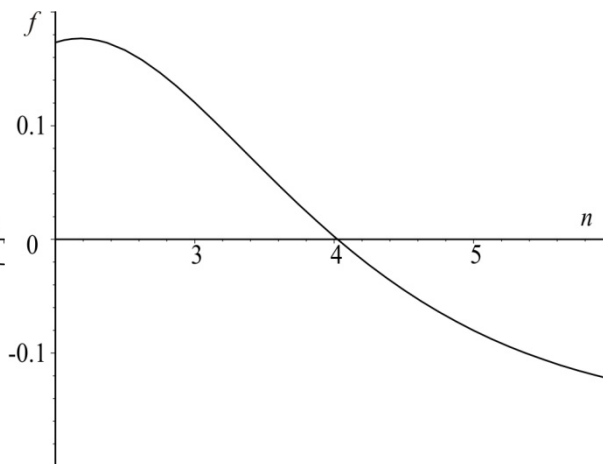


Рисунок 5 - Зависимость  $f(n)$  от числа связей с соседними деревьями  $n$ :  
 $a$  - пробная площадь №1 ( $f' = -0.019$ );  $b$  - пробная площадь №2 ( $f' = -0.104$ )

На рисунке 5 видно, что устойчивая конфигурация с числом связей с соседними деревьями, лежащим в интервале  $3 \leq n \leq 5$ , для пробной площади №1 имеет относительные изменения величины функции полезности в 5 раз меньше, чем для пробной площади №2. Чем меньше тангенс угла наклона кривых на рисунке 5, тем больше интервал возможных субоптимальных решений. Если тангенс угла наклона большой, то интервал возможных субоптимальных решений с погрешностью не большей, чем в предыдущем случае, сужается до одного оптимального значения числа связей с соседними деревьями.

#### Выводы:

1. Проведен анализ устойчивости насаждений к ветровому воздействию на основе полученных натуральных данных по двум пробным площадям отличающихся составом насаждения и находящихся в различных географических и климатических условиях после ветровалов.

2. Введены парциальные функции экологической полезности для оценки ветроустойчивости одноярусных насаждений в зависимости от взаимного расположения деревьев.

3. Вычислены оптимальные значения числа связей с соседними деревьями и относительной высоты над пологом леса, характеризующие

максимальную устойчивость дерева к ветровому воздействию.

#### Библиографический список

1. Захаров, Ю.В., Суховольский, В.Г. Модели устойчивости деревьев и насаждений к воздействию ветра // Лесоведение.- 2004. - № 2. – С. 61-67.
2. Калинин, М.И. Формирование корневой системы деревьев. М.: Лесная пром-сть, 1983. 152 с.
3. Суховольский, В.Г. Экономика живого: Оптимизационный подход к описанию процессов в экологических сообществах и системах. – Новосибирск: Наука, 2004. – 140 с.

