

КЛАСТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ВЕТРОУСТОЙЧИВОСТИ ДЕРЕВЬЕВ С УЧЕТОМ БЛИЖАЙШИХ СОСЕДЕЙ

Н.В. Филенкова², В.Г. Суховольский³, Ю.В. Захаров¹, Н.Ф. Овчинникова³

¹Сибирский государственный технологический университет
660049 Красноярск, пр. Мира, 82; e-mail: yuzakharov@mail.ru

²Сибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М.Ф. Решетнева,
660014 Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 31

³Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН,
660036 Красноярск, Академгородок, 50

Работа посвящена теоретическому анализу ветроустойчивости деревьев с учетом их ближайшего окружения. Показано, что ветроустойчивость дерева, произрастающего в древостое, и самого древостоя напрямую зависит от взаимодействий между ближайшим окружением и наличия кооперативных эффектов. Выделены два вида характеристик насаждения: вертикальный параметр, характеризующий проекцию насаждения на вертикальную плоскость, и горизонтальные параметры, характеризующие проекцию на горизонтальную плоскость. Каждая из характеристик включает в себя понятия и параметры, описывающие особенности, влияющие на ветроустойчивость.

Для оценки влияния горизонтальных и вертикальных характеристик взаимодействия дерева с соседними деревьями, учитывающих конкурентные и кооперативные эффекты, использованы функции парциальной экологической полезности. Функция парциальной экологической полезности в данном случае показывает вероятность выживания дерева в насаждении при определенных условиях. Используя натурные исследования двух пробных площадей, получено подтверждение теоретической зависимости для вероятности вывала дерева от числа ближайших соседей и относительной высоты над пологом насаждения. Показана независимость этих кооперативных эффектов от места и условий произрастания дерева.

Ключевые слова: лесные насаждения, ветровал, устойчивость, моделирование

This paper the theoretical analysis of trees wind stability with effect of interactions between neighbours is considered. The wind stability of tree and stand are depended from the interactions between neighbours and the presence of cooperative effects. Besides for description the influence of interaction between trees on the wind stability of stands two types of stand characteristics are considered. The first one is vertical parameter that characterized the projection stand on vertical plane. And the second ones are horizontal parameters that characterized the projection on horizontal plane. The characteristics each have concept and parameters which to described peculiarities of wind stability.

The effect of horizontal and vertical characteristics of tree interaction with neighbouring trees we have considered with taking into account competitive and cooperative effects by using the function of partial ecological utility. The function of partial ecological utility of tree is showing the probability of tree survives. Using the field's data the corroboration of the theoretical dependence for the probability of windthrown tree to the number of neighbouring trees and the relative height of tree over the stand canopy was got. The independence of these cooperative effects from the place and conditions vegetation was shown.

Key words: forest stand, windthrown, stability, modeling

ВВЕДЕНИЕ

Ветер является мощным экологическим фактором, влияющим на состояние лесных насаждений. Резкое усиление ветрового воздействия на деревья ведет к ветровалам, поэтому весьма важно заблаговременно количественно оценить устойчивость деревьев и насаждений к ветровому воздействию и минимизировать ветровое воздействие правильным выбором пород деревьев и их размещения при посадке, проведением своевременных рубок ухода и т.п.

На ветроустойчивость деревьев влияет много различных факторов: крона дерева, порода, корневая система, почва, климатические условия и др. В связи с тем, что использование и учет влияния всех возможных факторов на ветроустойчивость дерева представляет собой очень сложную задачу, для оценки ветроустойчивости выделяется несколько факторов, по мнению исследователей наиболее важных в данных условиях, и рассматривается вет-

ровал деревьев в зависимости от изменений данных факторов.

Некоторые исследователи показали, что ветровалу больше подвержены более высокие деревья (Veblen, 2001) и деревья большего диаметра (Cannham, 2001; Peterson, 2004). В работе (Everham, 1996) предположили, что имеется взаимосвязь между размером ствола и сопротивлением к сильным ветрам: ветровалу более подвержены деревья промежуточного размера, т.к. небольшие деревья защищены от ветра, а высокие деревья успели приспособиться. Отношение высоты дерева к его диаметру использовалось как индекс восприимчивости к излому и вывалу (Wang, 1998). Деревья с низким индексом вообще менее восприимчивы к ветровалу (Alexander, 1964; Coates, 1997). В некоторых работах (Huggard, 1999) отмечается, что ветровалом были повреждены деревья с более низким индексом. В других исследованиях никаких подобных взаимосвязей не было найдено (Dunham, 2000). Однако, при конкуренции за необходимые для разви-

тия ресурсы в густых насаждениях, рост в высоту преобладает над приростом в диаметре (Waring, 1985).

Исследования зависимости ветровала от густоты насаждения имеют неоднозначные результаты. Ветровал уменьшался при увеличении густоты (Holmes, 1985), но и противоположные результаты также известны (Mitchell, 2001). Это несоответствие, возможно, происходит из-за различий в том, как определяются густота насаждения и серьезность повреждения. В густых насаждениях между деревьями существует взаимодействие, демпфирующее отклонения, вызванные ветром, и соответственно увеличивается ветроустойчивость, пока возрастная структура деревьев остается неизменной (Smith, 1987).

Для оценки ветроустойчивости древостоев используются модели, основанные на рассмотрении «типичных» деревьев под действием ветровой нагрузки (Peltola, 1993; Gardiner, 2000). Однако ветроустойчивость древостоя определяется не только устойчивостью к воздействию ветра каждого отдельного дерева. При оценке устойчивости деревьев необходимо принимать во внимание кооперативные эффекты сопротивления деревьев ветровому воздействию, степень проявления которых зависит от взаимного расположения деревьев, густоты насаждения, пересечения крон деревьев.

Настоящая работа посвящена разработке и анализу теоретической модели, описывающей устойчивость деревьев и древостоев с учетом кооперативных эффектов взаимодействия дерева со своим окружением.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

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. Средний угол наклона склонов составляет примерно 30°. В состав насаждения входили пихта сибирская *Abies sibirica* L. и кедр (сосна кедровая сибирская) *Pinus sibirica* Du Tour, 9П1К, преобладают деревья 2 класса роста. У каждого дерева в июле 2003 г. определялись координаты местоположения на пробной площади, высота и диаметр ствола 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.

При анализе были выделены фрагменты для двух предельных случаев густоты насаждения на пробной площади. Один фрагмент характеризует

более разреженную часть насаждения, второй – более загущенную.

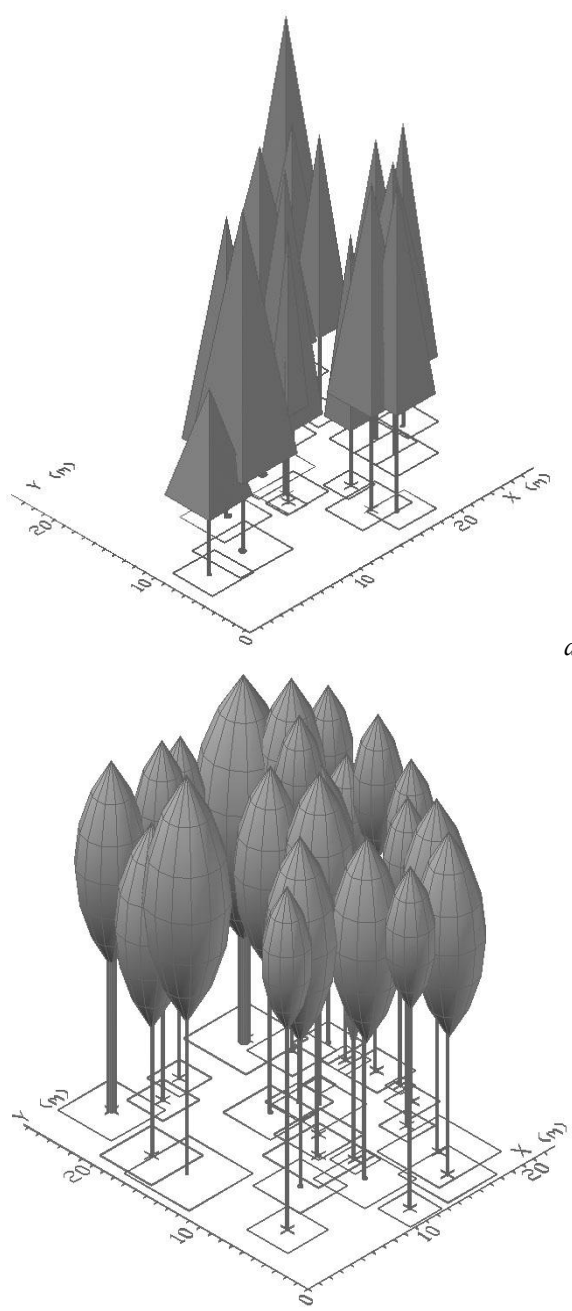


Рисунок 1 - Фрагменты плана насаждений: а - пробная площадь №1, б - пробная площадь №2

На рисунке 1 приведены планы более загущенных фрагментов насаждений. На планах фрагментов площадей №1 и №2 представлены деревья первого яруса (высотой больше 10 м). На рисунке точками обозначены координаты растущих деревьев, крестиками помечены вываленные и изломанные деревья. Кроны деревьев аппроксимированы прямоугольниками. Пересекающиеся прямоугольники описывают перекрытие крон деревьев.

Таблица 1 - Характеристики пространственной структуры насаждений и их фрагментов

Характеристики	Пробная площадь или ее фрагменты					
	1	1/1	1/2	2	2/1	2/2
Размеры пробной площади или ее фрагмента S , м ²	3700	598	621	4107	598	621
Число деревьев первого яруса N , шт.	128	26	16	151	26	20
Густота первого яруса $\rho = N/S$, дер. м ⁻²	0,034	0,043	0,026	0,037	0,043	0,032
Сумма площадей проекций крон деревьев первого яруса S_1 , м ²	1416	270	227	2665	424	309
Суммарная площадь проекции полога S_2 , м ²	1294	238	194	2225	326	242
Средняя высота деревьев первого яруса $H_{ср1}$, м	22,7	23,2	22,9	26,5	26,2	27,3
Число вываленных или сломанных деревьев, шт.	15	1	4	81	18	10
Интенсивность вывала, шт. м ⁻²	0,004	0,002	0,006	0,020	0,030	0,016
Средняя высота вываленных или сломанных деревьев $H_{ср2}$, м	24,2	24,7	23,4	26,5	26,1	27,2
Отношение средней высоты вываленных деревьев к средней высоте деревьев первого яруса	1,07	1,06	1,01	1,00	0,99	0,99

В таблице 1 приведены таксационные характеристики и размеры деревьев на исследуемых пробных площадях. Детально характеристики корневых систем деревьев на пробных площадях не были изучены, однако известно, что для пихты сибирской характерен поверхностный тип корневой системы, а для кедра и сосны обыкновенной – стержневой (Калинин, 1983).

Модель ветроустойчивости дерева с учетом его ближайшего окружения. Для описания влияния взаимодействия между деревьями на ветроустойчивость древостоя будем рассматривать два вида характеристик: вертикальный параметр, характеризующий проекцию насаждения на вертикальную плоскость, и горизонтальные параметры, характеризующие проекцию на горизонтальную плоскость. Каждая из характеристик включает в себя понятия и параметры, описывающие особенности, влияющие на ветроустойчивость.

Для описания вертикальной характеристики насаждения будем использовать параметр H_{rel} – относительная высота дерева, равный отношению высоты дерева к средней высоте насаждения и характеризующий относительное превышение высоты дерева над пологом насаждения.

Деревья по относительной высоте можно разделить на три типа: первый тип – это деревья, высота которых выше высоты полога; второй тип – это деревья с высотой, близкой к высоте полога насаждения, и третий тип – деревья, высота которых меньше высоты полога насаждения. Основную ветровую нагрузку принимают деревья, возвышающиеся над пологом насаждения – деревья первого типа. Механическая модель ветроустойчивости одиночного дерева показывает, что чем выше дерево, тем меньше критическая сила вывала или излома дерева (Zakharov, 2000; Захаров, 2004; Захаров, 2006;). В связи с этим при действии сильного ветра деревья первого типа наиболее подвержены вывалу или излому, а деревья третьего типа – самые защищенные. Учитывая конкуренцию между деревьями за свет, в таких условиях наиболее оптимальной может являться высота дерева немного ниже высоты полога насаждения.

Аналогично для описания горизонтальных характеристик ветроустойчивости будем использовать понятие кластера. Кластером будем называть группу деревьев, состоящую из определяющего дерева и его ближайших соседей, кроны которых

касаются или пересекаются с определяющим деревом. Каждое дерево на пробной площади, если оно не одиночное, является определяющим для одного кластера. Также каждое дерево, являющееся ближайшим соседом в определенном кластере, может быть ближайшим соседом и для другого дерева в другом кластере. Для описания кластера будем использовать следующие параметры:

- число деревьев G , из которых состоит кластер;
- число n соседних деревьев, т.е. число деревьев, пересекающихся кроной с данным деревом;
- число v вываленных или обломанных деревьев-соседей.

Ранее для оценки влияния горизонтальных и вертикальных характеристик взаимодействия дерева с соседними деревьями, учитывающих конкурентные и кооперативные эффекты, были использованы функции парциальной экологической полезности (Суховольский, 2004; Захаров, 2006). Функция парциальной экологической полезности характеризует вероятность выживания дерева в насаждении при определенных условиях.

Парциальная функция экологической полезности кооперативного эффекта устойчивости дерева к ветру в зависимости от его относительной высоты H_{rel} имеет следующий вид:

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

где A и m – константы, определяемые из натуральных данных из условия минимума квадратов невязки.

Функция парциальной экологической полезности конкуренции деревьев за свет, в зависимости от относительной высоты дерева над пологом леса H_{rel}

$$r_2(H_{rel}) = 1 - \frac{B}{B + H_{rel}^q}, \quad (2)$$

где B и q – константы, определяемые из натуральных данных.

Парциальная функция экологической полезности кооперативного эффекта устойчивости дерева к ветру в зависимости от числа ближайших n соседей имеет следующий вид

$$r_3(n) = 1 - \frac{t_1}{t_2 + n^k}, \quad (3)$$

где t_1 и t_2 – константы, определяемые из натуральных данных методом нелинейной регрессии с учетом требования, что в предельном случае бесконечного числа соседей (при $n \rightarrow \infty$) вероятность вывала должна стремиться к нулю. Константа k определяется из натуральных данных из условия минимума квадратов невязки.

В качестве парциальной функции экологической полезности конкуренции деревьев за питание в зависимости от числа ближайших соседей n , можно использовать функцию

$$r_4(n) = 1 - \frac{n^l}{D + n^l}, \quad (4)$$

где D и l – константы, определяемые из натуральных данных.

Согласно принципу максимальной экологической полезности общая полезность должна быть максимальной (Суховольский, 2004). Для нахождения максимума первые производные приравниваются к нулю. Решения полученных уравнений будут являться оптимальными значениями произрастания дерева в насаждении.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе натуральных данных, полученных для двух пробных площадей, вычислим и проанализируем параметры данной модели.

Относительная высота дерева над пологом насаждения.

Для каждой пробной площади на основе натуральных данных определены константы A и m методом нелинейной регрессии. Для пробной площади № 1 - $A = 6,30$, а для пробной площади № 2 - $A = 1,22$; для обеих пробных площадей $m = 6$.

Число соседних деревьев.

Еще одним параметром, определяющим влияние взаимодействия деревьев в насаждении на ветроустойчивость, является число n соседних деревьев. Для каждого дерева на пробных площадях было определено число n соседних деревьев. Деревья с одинаковым числом соседей были объединены в группы, в каждой группе вычислялась доля вывалившихся деревьев и тем самым определялась вероятность вывала.

Для каждой пробной площади определены константы t_1 , t_2 и k методом нелинейной регрессии. Для пробной площади № 1 - $t_1 = 2,01$; $t_2 = 9,25$; для пробной площади № 2 - $t_1 = 33,33$; $t_2 = 49,32$; для обеих пробных площадей $k = 3$.

Количественно порядки вероятностей вывала для двух пробных площадей различны. Это связано с тем, что среди ближайшего окружения могут быть деревья, которые по разным причинам оказываются неустойчивы к действующим ветровым нагрузкам, и вывал этих деревьев может повлечь за собой вывал более развитого и устойчивого со-

седнего дерева.

Общая функция экологической полезности для исследуемых пробных площадей.

Для введенных функций парциальной экологической полезности (2) - конкуренции деревьев за свет в зависимости от относительной высоты дерева над пологом леса H_{rel} , и (4) - конкуренции деревьев за питание в зависимости от числа ближайших соседей n , на основе натуральных данных определены константы, входящие в эти выражения: для площади № 1 - $D = 600$, $B = 2$; для площади № 2 - $D = 30$, $B = 1,5$; для обеих пробных площадей $q = 1$ и $l = 2$.

После вычисления констант запишем общую функцию экологической полезности

$$R(H_{rel}, n) = \left(1 - \frac{H_{rel}^6}{A + H_{rel}^6}\right) \cdot \left(1 - \frac{B}{B + H_{rel}}\right) \cdot \left(1 - \frac{t_1}{t_2 + n^3}\right) \cdot \left(1 - \frac{n^2}{D + n^2}\right)$$

Переходя к логарифмической функции полезности $W(H_{rel}, n)$, получаем зависимость $W(H_{rel}, n) = \ln(R(H_{rel}, n))$ и находим абсолютный максимум этой функции для каждой пробной площади, дифференцируя функцию по параметрам H_{rel} и n и численно решая систему полученных двух уравнений. Таким образом, определяем оптимальные значения для числа соседних деревьев и относительной высоты дерева, используя натурные данные, т.е. вычисленные по ним значения констант A , B , t_1 и t_2 .

Оптимальные значения параметров для пробных площадей:

площадь № 1 - $n = 4$, $H_{rel} = 0,96$;

площадь № 2 - $n = 4$, $H_{rel} = 0,73$.

Число вывалившихся или обломанных ближайших соседей.

Оценим вероятность вывала каждого дерева на пробных площадях в зависимости от числа вывалившихся или обломанных его ближайших соседей (рис.2).

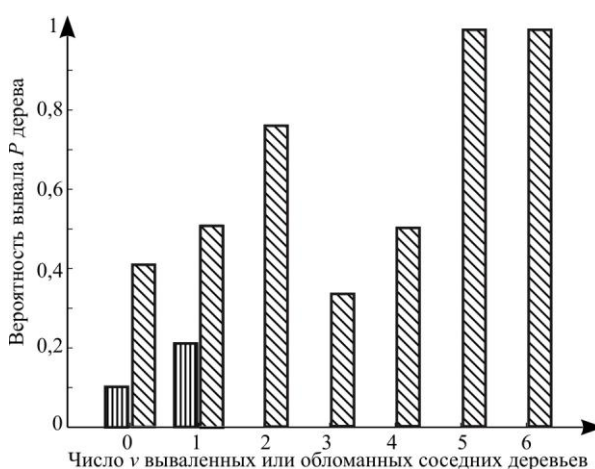


Рисунок 2 - Зависимость вероятности вывала P дерева от числа V вываленных или обломанных деревьев-соседей: прямая штриховка – пробная площадь №1, наклонная – пробная площадь №2

На рисунке 2 видно, что для пробной площади №1 произошел вывал деревьев, у которых максимум одно ближайшее дерево было повреждено. Для пробной площади №2, как показано на рисунке 2, характерна большая вероятность вывала у деревьев с двумя поврежденными деревьями-соседями, а при пяти и более вываленных или обломанных ближайших соседей вероятность того, что дерево выживет, равна нулю. Такое становится возможным при массовом вывале и в результате эффекта «домино», когда происходит вывал или излом дерева не в результате определенного ветрового воздействия, а в результате «плохого влияния», т.е. навала со стороны соседнего, рядом стоящего дерева, которое было вывалено или сломлено в результате ветрового воздействия или снова эффекта «домино». Рассмотрим влияние числа v вываленных или обломанных деревьев-соседей на ветроустойчивость дерева с определенным числом ближайших

соседей. На пробной площади №1 произошел вывал в основном одиночных деревьев и деревьев с одним ближайшим соседом ($n = 1$), что не раскрывает влияние окружения на вероятность вывала при ветровале.

Деревья на пробной площади №2 были разделены на группы, состоящие из деревьев с одинаковым числом выпавших или обломанных ближайших v деревьев, затем каждая группа разбита на подгруппы по общему количеству ближайших соседей n . Для каждой подгруппы была вычислена условная вероятность вывала P дерева в зависимости от числа соседних деревьев при условии вывала или излома определенного числа деревьев-соседей. Полученные данные сведены в табл. 2, где представлены значения условной вероятности вывала P дерева в зависимости от числа n соседних деревьев при условии вывала или излома определенного числа v вывалившихся или изломанных деревьев.

Таблица 2 - Условная вероятность вывала P дерева в зависимости от числа n деревьев-соседей и при условии вывала определенного числа v этих деревьев для пробной площади № 2

n	Условная вероятность P вывала или излома дерева*					
	$v = 1$	$v = 2$	$v = 3$	$v = 4$	$v = 5$	$v = 6$
1	0,7	-	-	-	-	-
2	0,5	0,87	-	-	-	-
3	0,27	0,67	0,33	-	-	-
4	0,2	0,67	0,2	1	-	-
5	-	0,5	1	0	1	-
6	-	-	-	-	-	1

Примечание: *прочерк означает, что деревьев с таким набором параметров на пробной площади №2 не наблюдалось.

Из таблицы 2 видно, что для деревьев с числом ближайших соседей $n = 4, 5, 6$ при вывале или изломе всех этих соседей вероятность вывала рассматриваемого основного дерева $P = 1$. Так же велика вероятность вывала трех деревьев из пяти ближайших соседей. Для деревьев с одним и двумя деревьями-соседями вероятность вывала дерева при вывале или изломе этих соседей тоже достаточно высокая. Таким образом, если дерево имеет n ближайших соседей, и все они были вывалены или обломаны, то вероятность вывала P близка к единице.

Влияние размера кластера на ветроустойчивость дерева. На обеих пробных площадях были выделены кластеры деревьев и определены вероятности вывала любой комбинации деревьев, входящих в кластер, вплоть до вывала всего кластера. Для пробной площади № 1 в связи с тем, что произошел вывал в основном одиночных деревьев,

влияние размера кластера на устойчивость не рассматривается. Для пробной площади №2 все выделенные кластеры были разделены на группы по числу G входящих в них деревьев.

Для каждой группы кластеров рассмотрена вероятность вывала определенного числа деревьев из кластера. Из таблицы 3 видно, что для кластеров, состоящих из двух и трех деревьев, вероятность вывала увеличивается с увеличением числа деревьев, достигая величины 0,5. Вероятность вывала любого числа деревьев из кластеров, состоящих из четырех и пяти деревьев, мала и не превосходит 0,2. Для кластеров, состоящих из шести и семи деревьев, если и произойдет вывал или излом, то вывалятся все деревья в кластере. На пробной площади №2 было выявлено четыре кластера, состоящие из семи деревьев, и все они обладали таким свойством.

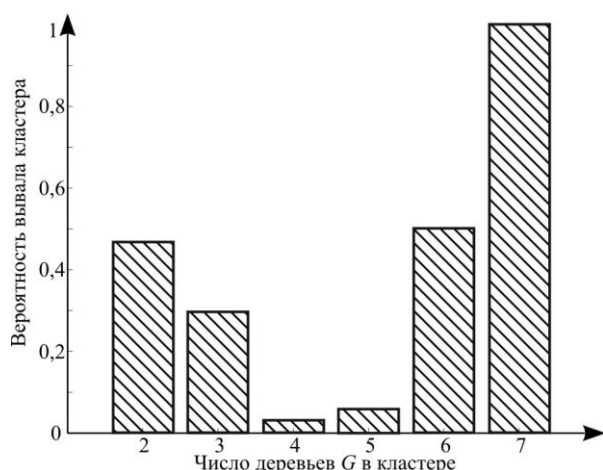
Таблица 3 - Условная вероятность P вывала или излома определенного числа деревьев в кластере в зависимости от размера кластера для пробной площади №2

G	Условная вероятность P вывала или излома определенного числа деревьев						
	1 дерево	2 деревья	3 деревья	4 деревья	5 деревьев	6 деревьев	7 деревьев
2	0,13	0,47	-	-	-	-	-
3	0,09	0,18	0,29	-	-	-	-
4	0,12	0,12	0,18	0,03	-	-	-
5	0,06	0,06	0,12	0,06	0,06	-	-
6	-	-	0,13	0,13	0	0,5	-
7	-	-	-	-	-	-	1

На рисунке 3 показана вероятность вывала всего кластера в зависимости от числа входящих

в него деревьев. Из рисунка видно, что вероятность вывала кластеров, состоящих из четырех и

пяти деревьев, минимальна. Вероятность вывала небольших кластеров не превосходит 0,5.



Рисунке 3 - Вероятность вывала всего кластера

Вероятность вывала увеличивается с увеличением числа деревьев в кластере. Оказалось, что для пробной площади №2 произошел вывал или излом всех кластеров, состоящих из 7 деревьев.

Таким образом, результаты анализа устойчивости групп в зависимости от числа ближайших соседей и в зависимости от размера кластера в целом показывают, что наиболее устойчивыми являются группы из четырех-пяти деревьев.

ВЫВОДЫ

1. Предложена кластерная модель для описания ветроустойчивости деревьев с учетом ближайшего окружения. Введены основные переменные и параметры и предложены методы, которые позволяют оценить ветроустойчивость.

2. Используя натурные исследования двух пробных площадей, получено подтверждение теоретической зависимости вероятности вывала дерева от числа ближайших соседей и относительной высоты над пологом насаждения.

3. При анализе зависимости устойчивости группы деревьев от числа ближайших соседей и от размера кластера показано, что наиболее устойчивыми являются группы из четырех-пяти деревьев.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Захаров, Ю.В. Модели устойчивости деревьев и насаждений к воздействию ветра / Ю.В. Захаров, В.Г. Суховольский // Лесоведение. - 2004. - №2. - С. 61-67.

Захаров, Ю.В. Упруго закрепленный стержень и колонна на упругом основании под действием поперечной нагрузки: модели двух предельных случаев ветроустойчивости дерева / Ю.В. Захаров, Н.В. Филенкова, В.Г. Суховольский // Вестник КрасГУ. «Физико-математические науки». - 2006. - № 1. - С. 16-20.

Захаров, Ю.В. Влияние взаимного расположения деревьев на ветроустойчивость одноярусных древесных насаждений / Ю.В. Захаров, Н.В. Филенкова,

В.Г. Суховольский А// Хвойные бореальной зоны. - 2006. - №3. - С 119-125.

Калинин, М.И. Формирование корневой системы деревьев / М.И. Калинин - М.: Лесная пром-сть, 1983. - 152 с.

Суховольский, В.Г. Экономика живого: Оптимизационный подход к описанию процессов в экологических сообществах и системах / В.Г. Суховольский - Новосибирск: Наука, 2004. - 140 с.

Alexander, R.A. Minimizing windfall around clearcuttings in spruce-fir forests / R.A. Alexander // Forest Science. - 1964. - № 10. - P. 130-142.

Canham, C.D. Interspecific variation in susceptibility to windthrow as a function of tree size and storm severity for northern temperate tree species / C.D. Canham, M.J. Papaik, E.F. Latty // Canadian Journal of Forest Research. -2001. - № 31. - P. 1-10.

Coates, K.D. Windthrow damage 2 years after partial-cutting at the Date Creek silvicultural systems study in the Interior Cedar-Hemlock forests of northwestern British Columbia / K.D. Coates // Canadian Journal of Forest Research. - 1997. - № 27. - P.1695-1701.

Dunham, R.A. Crown, stem and wood properties of wind-damaged and undamaged Sitka spruce / R.A. Dunham, A.D. Cameron // Forest Ecology and Management. - 2000. - № 135. - P. 73-81.

Everham, E.M. Forest damage and recovery from catastrophic wind / E.M. Everham, N.V.L. Brokaw // Botanical Review. - 1996. - № 62. - P. 113-185.

Gardiner, B.A. Management of forests to reduce the risk of abiotic damage - a review with particular reference to the effects of strong winds / B.A. Gardiner, C.P. Quine // Forest Ecology and Management. - 2000. - № 135. - P. 261-277.

Holmes, S.R. An analysis of windthrow along clearcut boundaries in the Tsitika watershed / S.R. Holmes // B. A. Thesis. University of British Columbia, 1985. - 104 p.

Huggard, D.J. Windthrow following four harvest treatments in an Engelmann spruce - subalpine fir forest in southern interior British Columbia, Canada / D.J. Huggard, W. Klennar, A. Vyse // Canadian Journal of Forest Research. - 1999. - № 29. - P. 1547-1556.

Mitchell, S.J. Empirical modelling of cutblock edge windthrow on Vancouver Island, Canada, using stand level information / S.J. Mitchell, T. Hailemariam, Y. Kulis // Forest Ecology and Management. - 2001. - №154. - P.117-130.

Peltola, H. A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage of Scots pines at stand edges/ H. Peltola, S. Kellomäki // Silva Fennica. -1993. - № 27. - P. 99-111.

Peterson, C.J. Within-stand variation in windthrow in southern boreal forests of Minnesota: Is it predictable? / C.J. Peterson // Canadian Journal of Forest Research. - 2004. - № 34. - P. 365-375.

Smith, V.G. Mechanical stability of black spruce in the clay belt region of northern Ontario / V.G. Smith, M. Watts, D.F. James // Canadian Journal of Forest Research. - 1987. - № 17. - P. 1080-1091.

Veblen, T.T. Subalpine forest damage from a severe windstorm in northern Colorado / T.T. Veblen, D. Kulakowski, K.S. Elsenhart, W.L. Baker // Canadian Journal of Forest Research. - 2001. - № 31. - P. 2089-2097.

Wang, Y. Relationships between tree slenderness coefficients and tree or stand characteristics for major species in boreal mixed wood forests / Y. Wang, S.J. Titus, V.M. LeMay // Canadian Journal of Forest Research. - 1998. - № 28. - P. 1171-1183.

Waring, R.H. Forest ecosystems: concepts and management / R.H. Waring, W.H. Schlesinger // Academic Press, New York, 1985.

Zakharov, Yu.V. A mathematical model of tree root forms and estimation of effects on decreasing windfall risk /

Yu.V. Zakharov, V.G. Soukhovolsky // "Disturbance in boreal forest ecosystem: human impacts and natural processes". Proc. Intern. Boreal Forest Research Association 1997 annual meeting. St. Paul, MN: U.S. Dept. of Agriculture, 2000. - P. 211-218.

Поступила в редакцию 17 марта 2010 г.
Принята к печати 27 апреля 2011 г.