

Об экспериментальной оценке адекватности применения имитационного моделирования при исследовании рубок ухода

Ю. Ю. Герасимов¹
С. А. Кильпеляйнен
В. С. Сюнев

Петрозаводский государственный университет

АННОТАЦИЯ

Создана имитационная модель проведения рубок ухода. Заключение о возможности ее применения в инженерной системе принятия решений по обоснованию технологий и машин должно базироваться на эксперименте, подтверждающем ее адекватность. Для этого проведен натурный эксперимент. Сравнение результатов эксперимента и компьютерного моделирования подтвердило возможность использования созданных моделей в проектных процедурах.

Ключевые слова: рубки ухода, экспериментальные исследования, харвестер, форвардер, система машин, повреждаемость, критерии.

SUMMARY

Simulation model of thinning was created. The adequacy of the model needs to be verified by the experiment. A comparison between the results of the performance experiment and computer simulation model testifies the possibility to utilize the created model in designing.

Keywords: thinning, experiments, harvester, forwarder, system of machines, damages, criterions.

Сортиментная технология заготовки леса находит все более широкое распространение. Ее преимущества особенно значительно проявляются при проведении рубок ухода. Полностью механизированные технологии рубок базируются на применении систем машин, состоящих из двух единиц – харвестера (валочно-сучкорезно-раскряжевой машины) и форвардера (трелевочной машины).

Опыт эксплуатации таких систем машин на рубках ухода показывает возможность обеспечить наряду с высокой производительностью достаточно низкую повреждаемость оставляемого на доращивание древостоя [1].

Существующая в настоящее время широкая номенклатура машин (отечественных и импортных) [2,3] дает свободу выбора проектных решений по составляющим

и по системе в целом. Это обстоятельство вызывает необходимость перейти к научно обоснованному выбору машин для тех или иных условий функционирования. Для осуществления такого выбора необходимо наличие некоторой «советующей» системы, основу которой составляют имитационные компьютерные модели. Обоснование выбора с позиций системного подхода и использования современных информационных технологий (ГИС-технологий) обеспечивает высокую эффективность применения машин [4].

На кафедре тяговых машин ПетрГУ созданы подобные имитационные компьютерные модели [5, 6, 7, 8]. Для оценки их адекватности был проведен натурный эксперимент в производственных условиях. Затем соответствующие условиям проведения эксперимента природно-производственные характеристики моделировались на компьютере. После этого проводилось имитационное моделирование работы соответствующей системы машин с расчетом ряда показателей эффективности. Сравнение результатов моделирования и эксперимента позволяет оценить адекватность разработанных моделей.

Натурный эксперимент проводился в еловом лесу (возраст – 60 лет) в семидесяти километрах от города Йозсуу (Финляндия). Данный участок представляет собой ельник-черничник состава 10Е, 3 класса бонитета, расположенный в нижней части северного склона, тип почвы – оподзоленные суглинки с оглеением, площадь – 1.5 гектара. Рубка проводилась системой машин, состоящей из харвестера Timberjack-870 и форвардера Timberjack-810В.

По окончании работ оценивался объем заготовленной и оставленной на доращивание древесины. Объем заготовленной древесины, в том числе отдельно по технологическим коридорам, и производительность работ рассчитывались по данным, получаемым с бортовой компьютерной системы харвестера. Учет производительности работы форвардера осуществлялся оператором машины и нормировщиком на погрузочном пункте.

Для оценки уровня повреждаемости оставляемого древостоя была проведена инвентаризация лесных участков, которая основывается на методе исследования пробных площадей. На исследуемом лесном участке назначаются линии (направления) проведения инвентаризации. Как правило, их сеть планируется на местности таким образом, чтобы линии располагались близко к перпендикулярному направлению по отношению к основной сети технологических коридоров (волоков). Тогда инвентаризационные линии пересекают большинство из них. Если на каких-то участках направление трелевочных волоков отличается от первоначального, то направление инвентаризационных линий корректируется с целью обеспечения их перпендикулярности волокам.

На линиях проведения инвентаризации через равные расстояния организуются пробные площади. Пробные

¹ Авторы - соответственно профессор, старший преподаватель и профессор кафедры тяговых машин
© Ю. Ю. Герасимов, С. А. Кильпеляйнен, В. С. Сюнев, 2001

площади представляют собой участки леса, ограниченные на местности окружностью радиусом 5,64 метра (рис. 1).

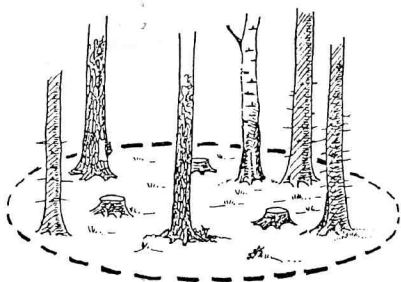


Рис. 1. Пробная площадь

Таким образом, площадь каждой пробной площадки составляет один ар (100 м²). Эти площади охватывают всю территорию, подлежащую инвентаризации. Пример схемы размещения пробных площадей на исследуемом участке показан на рис. 2. Для исследования магистрального волока назначаются дополнительные инвентаризационные линии.

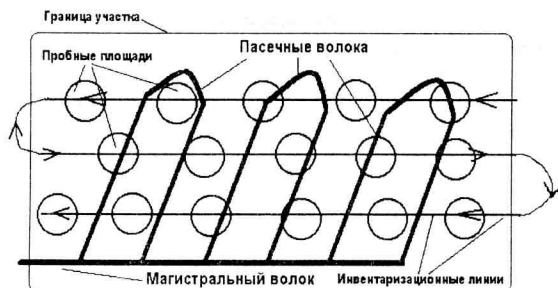


Рис. 2. Примерная схема размещения сети инвентаризационных линий и пробных площадей

Количество пробных площадей и расстояние между ними зависят от размера участка: чем выше требуемая точность, тем большее количество пробных площадей и меньшее расстояние между ними назначаются. В лесах со сложным неоднородным древостоем количество пробных площадей может быть увеличено.

Начальный пункт измерений выбирается на любом углу исследуемого лесного участка. Этот пункт отмечается в лесу хорошо распознаваемой меткой. От начального пункта с помощью буссоли (компас) намечается направление инвентаризационных линий.

Пробные площади базируются на инвентаризационных линиях. Первая пробная площадь располагается на дистанции от начального пункта, равной половине рекомендуемого расстояния между инвентаризационными линиями. Если какая-то часть лесного участка не подвергалась рубке или резко отличается от условий на всем участке, то эта часть исключается из исследования.

Группа исследователей, двигаясь по направлению инвентаризационных линий, организует через соответствующие расстояния пробные площади. На территории каждой пробной площади учитываются и описываются все деревья (порода, размеры, наличие или отсутствие меток о назначении в рубку, имеющиеся повреждения) и все пни с указанием диаметра и двух значений высот (самой нижней и верхней).

После полного описания всех данных группа исследователей движется дальше по намеченному направлению до следующей пробной площади.

Помимо остановок для описания пробных площадей исследователи делают остановки при каждом пересечении технологических коридоров (волоков). Здесь осуществляется учет данных, характеризующих состояние волока: наличие или отсутствие порубочных остатков, состояние колеи, реальная ширина технологического коридора.

Расстояние между волоками измеряется по инвентаризационной линии с помощью мерной нити. Оказавшись на середине каждого волока, исследователь заносит в анкету показания мерной нити. Разница показаний позволяет определить расстояние между волоками.

Если трелевочные волока не перпендикулярны инвентаризационной линии, то расстояние можно вычислить с помощью поправочных коэффициентов. Так, если угол между волоком и нитью 45°, коэффициент равен 0.71, если 60° - 0.87, а при 70° - 0.97. Для расчета расстояния между волоками показания нити нужно умножить на поправочный коэффициент.

Для определения ширины технологического коридора (волока) исследователи откладывают по направлению волока два отрезка длиной по 5 метров в обе стороны от места пересечения инвентаризационной линии с центром волока. Таким образом, на волоке образуется участок длиной 10 метров. На этом участке находятся два самых близких к волоку дерева (одно справа, другое слева от волока). Измеряется расстояние между этими деревьями параллельно направлению инвентаризационной линии. Измеренное расстояние принимается за ширину волока $C+D$ (рис. 3).

Для оценки состояния колеи от точки пересечения инвентаризационной линии с центром волока в обе стороны по направлению волока откладывается по 15 метров. На данном 30-метровом участке исследуется поверхность технологического коридора. В ведомость заносятся значения глубины колеи, отмечаются повреждения корневых систем, данные о наличии отбойных (поврежденных) стволов, сведения о наличии порубочных остатков на волоке. При колееобразовании только под одним колесом (правым или левым) оно также учитывается.

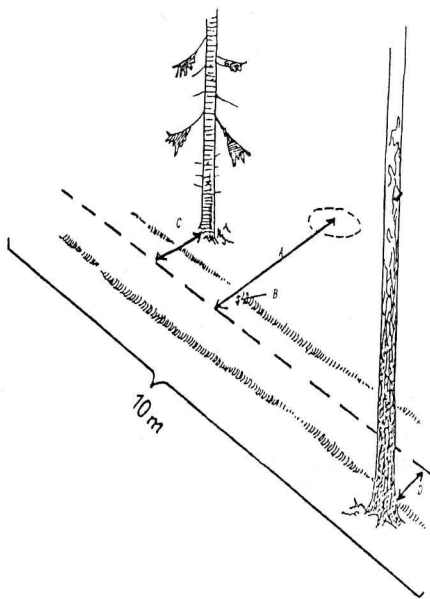


Рис. 3. Схема исследования состояния волока

С использованием полученных экспериментальных данных проводится расчет критериев качества выполнения программы рубок, доступности намеченных в рубку деревьев и повреждаемости оставленного на доращивание древостоя и почвы.

Расчет критерия качества рубки проводится по формуле:

$$Crit_{qual} = 1 - (V_{cut} - V_{str}) / V_{mustcut},$$

где V_{cut} – объем деревьев, заготовленных при проведении рубки;

V_{str} – объем деревьев, заготовленных при прорубке технологических коридоров (волоков), которые по своим таксационным данным не планировались в рубку (учитывается в компьютерной системе харвестера при его работе);

$V_{mustcut}$ – объем деревьев, запланированных в рубку (принимается согласно лесохозяйственному плану).

Определение критерия доступности по пространственной структуре и рельефу местности проводится по следующей зависимости:

$$Crit_{acc} = (N_{unacc} - N_{unaccg} - N_{unaccm}) / N_{mustcut},$$

где N_{unacc} – число деревьев, оказавшихся необработанными в ходе рубки;

N_{unaccg} – число деревьев, оказавшихся необработанными из-за недостаточности грузового момента манипулятора;

N_{unaccm} – число деревьев, не доступных в рубку из-за недостаточности вылета манипулятора;

$N_{mustcut}$ – число деревьев, запланированных в рубку.

Критерий повреждаемости определяем по формулам:

для корневых систем

$$Crit_{damroot} = N_{damroot} / N_{remain},$$

где $N_{damroot}$ – число деревьев с поврежденными корнями;

N_{remain} – число оставшихся после рубки деревьев,

для стволовой части

$$Crit_{dam} = N_{dam} / N_{remain},$$

где N_{dam} – общее количество поврежденных деревьев.

Критерий соответствия машин друг другу в системе вычисляется по формуле:

$$Crit_{out} = Abs(Output_h - Output_f) / Maxout,$$

где $Abs(...)$ – операция принятия абсолютной величины выражения;

$Output_h$ – производительность харвестера;

$Output_f$ – производительность форвардера;

$Maxout$ – максимальное из значений $Output_h$ и $Output_f$.

В результате обработки результатов натурального эксперимента получены следующие данные:

Число стволов после рубки, шт.	872
Число пней, шт.	295
В том числе на волоке	144
Число оставшихся стволов, намеченных в рубку, шт.	97
В том числе:	
из-за недостатка грузоподъемности манипулятора харвестера, шт.	0
находящихся вне пределов вылета манипулятора, шт.	15
Количество повреждений стволов, шт.	39
Количество повреждений корневых систем, шт.	43
Расстояние между волоками, м	21,5
Ширина технологического коридора, м	3,7
Объем древесины, запланированный в рубку (20% от запаса), м ³	31,2
Объем заготовленной древесины, м ³	26,6
В том числе:	
с волока, м ³	15,9

Объем древесины, оставленной на дорашивание, м³ 128
 Производительность харвестера, м³/ч 5,7
 Производительность форвардера, м³/ч 9,9

Расчетные значения результатов натурального эксперимента:

Оставшихся деревьев на участке 74,7 %
 Назначенные в рубку деревья на участке 33,5 %
 Вырубленные деревья 25,3 %
 Из них с волока 48,8 %
 Деревья, имеющие повреждения 9,4 %
 В том числе:
 стволовой части 4,47 %
 корневой системы 4,93 %
 Недоступно для рубки деревьев в пределах вылета манипулятора 24,7 %
 Из них из-за пространственной недоступности 100 %
 Вырублено древесины от объема на участке 17,1 %
 В том числе с волока 59,8 %
 Критерий качества проведения рубок 0,4583
 Критерий повреждаемости корневых систем 0,0493
 Критерий повреждаемости стволовой древесины 0,0447
 Критерий доступности 0,2092
 Критерий соответствия системы машин 0,4242

Соответствующее условиям, принятым в натурном эксперименте, компьютерное моделирование проводилось с использованием оригинальных программных средств, реализованных на языке MapBasic 5.0.

Для получения статистически адекватных результатов рассматриваемая лесосека смоделирована 8 различными реализациями.

Таксационные данные, данные о почвенно-грунтовых условиях, рельеф местности моделировались на основе ГИС-карт соответствующего лесного участка.

При прокладке волоков для проведения компьютерного эксперимента учтены рельеф местности и существующая дорожная сеть. Волока проложены вдоль склона, а места складирования сортиментов расположены у существующих дорог.

Ширина пасаки – 20 метров, ширина волока – 4 метра. Процент изреживания – 20.

Результаты натурального эксперимента и соответствующего ему компьютерного сведены в таблицу. Сопоставление данных позволяет сделать заключение об адекватности разработанных математических имитационных моделей и возможности их использования в компьютерных системах принятия решений.

Таблица
 Результаты натурального и компьютерного экспериментов

Показатель	Натурный эксперимент	Компьютерный эксперимент	Отклонение, %
Число стволов на гектаре, шт.	750	742	-1,1
Запас на участке (пасеке), м ³	156	143*	-8,3
Средний диаметр деревьев, см	16	15,6*	-2,5
Оставшихся деревьев на участке (пасеке), %	74,7	81,3	+6,6
Назначенные в рубку деревья на участке (пасеке), %	33,5	27,8	-5,7
Вырубленные деревья, %	25,3	18,7	-6,6
Из них с волока	48,8	54,4	+5,6
Деревья, имеющие повреждения стволовой части, %	4,47	4,7	+0,23
Деревья, имеющие повреждения корневой системы, %	4,93	3,07	-1,86
Недоступно для рубки, %	24,7	19,7	-5
Вырублено древесины от объема на участке (пасеке), %	17,1	15,6	-1,5
Из них с волока	59,8	64,2	+4,4
Производительность: харвестера, м ³ /ч	5,7	6,2	+8,8
форвардера, м ³ /ч	9,9	10,2	+3
Критерий повреждаемости корневых систем	0,0493	0,0547	+10,9
Критерий повреждаемости стволовой древесины	0,0447	0,0472	+5,5
Критерий доступности	0,2092	0,1968	-5,9
Критерий качества проведения рубок	0,4583	0,42837	-6,5
Критерий производительности машин в системе	0,4242	0,3922	-7,5

* Среднее значение по восьми реализациям модельной лесосеки

По результатам сопоставления данных натуральных экспериментальных исследований и соответствующего компьютерного моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Программа моделирования природной среды (лесосеки) позволяет создавать ГИС-модель древостоя, адекватную реальному участку. При моделировании

наибольшие отклонения от реальных значений отмечены в общем запасе древесины (8,3%) и средней высоте древостоя (5,3%).

2. Количество назначенных в рубку деревьев в результате имитационного моделирования и натурального эксперимента различается на 5,7%.

3. Разница между экспериментальными и расчетными данными по повреждаемости стволов деревьев составляет 0,23%, корневой системы – 1,86%.

4. Разница в данных по производительности для харвестера составила 8,8%, для форвардера – 3%.

5. Рассчитанные по данным натурального и компьютерного экспериментов показатели эффективности функционирования системы машин, позволяющие делать вывод об оптимальности выбора машин для конкретных условий эксплуатации, дают удовлетворительную сходимость. Максимальные отклонения экспериментальных величин от расчетных данных соответствуют критерию повреждаемости корневых систем (10,9 %).

6. В целом имитационная модель адекватно описывает процесс проведения рубок ухода и может быть использована для выбора оптимальных систем машин (харвестер + форвардер) на лесосырьевых участках с различным строением древостоев, рельефом местности и почвенно-грунтовыми условиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сюнев В. С. Технологии и машины для сортиментных лесозаготовок в северных лесах / Петрозаводский гос. ун-т. Петрозаводск, 1998. 53 с. Деп. в ВИНТИ 04.08.98. № 2508-В98.
2. Сюнев В. С., Герасимов Ю. Ю., Костюкевич В. М. Компьютерная информационная система «ХАРВЕСТЕРЫ» // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. Вып. 1. Петрозаводск, 1996. С. 90-96.
3. Сюнев В. С., Герасимов Ю. Ю., Костюкевич В. М. Компьютерная информационная система «ФОРВАРДЕРЫ» // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. Вып. 2. Петрозаводск, 1999. С. 161-168.
4. Герасимов Ю. Ю., Кильпеляйнен С. А., Сюнев В. С. Имитационное моделирование и экологическая оптимизация техпроцесса и машин для рубок ухода за лесом на основе ГИС-технологий // Биологические основы изучения, освоения и охраны животного и растительного мира, почвенного покрова Восточной Финляндии: Тезисы докладов / Институт биологии Карельского научного центра РАН. Петрозаводск, 1999. С. 183-184.
5. Сюнев В. С., Герасимов Ю. Ю. Моделирование и оптимизация функционирования лесных машин при рубках ухода // Обоснование параметров и технических решений лесозаготовительных и лесохозяйственных машин и оборудования: Межвузовский сборник научных трудов / ЛТА. Санкт-Петербург, 1998. С. 71-77.
6. Герасимов Ю. Ю., Сюнев В. С. Лесосечные машины для рубок ухода: Компьютерная система принятия решений. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1998. 236 с.
7. Герасимов Ю. Ю., Сюнев В. С. Создание компьютерной системы принятия решений в области лесных технологий и машин // Актуальные проблемы лесного комплекса Республики Карелия: Научные труды № 1 / Карельская инж. академия. Петрозаводск, 1998. 64 с.
8. Gerasimov Yu. Yu., Siounev V. S. Harvester crane key parameters optimization in European Russian Pines // Journal of Forest Engineering. 1997. 8(1). P. 63-74.
9. Кильпеляйнен С. А. Повреждаемость древостоев манипуляторным технологическим оборудованием // Научно-методическое обеспечение лесного комплекса Карелии: Тезисы докладов научно-практической конференции докторантов и аспирантов лесоинженерного факультета ПетрГУ. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1999. 30 с.
10. Кильпеляйнен С. А., Сюнев В. С. Обоснование выбора систем машин для рубок ухода на основе имитационного моделирования / Петрозаводский гос. ун-т. Петрозаводск, 1999. 21 с. Деп. в ВИНТИ 24.11.99. № 3480-В99.
11. Кильпеляйнен С. А., Сюнев В. С. Экспериментальная оценка адекватности имитационных моделей рубок ухода / Петрозаводский гос. ун-т. Петрозаводск, 1999. 22 с. Деп. в ВИНТИ 24.11.99. № 3481-В99.