
МЕТОДИЧЕСКИЕ
СТАТЬИ

УДК 630*181.9

**МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ЗАПАСОВ ВАЛЕЖА
ПО ДАННЫМ УЧЕТОВ НА ТРАНСЕКТАХ***

© 2012 г. В. И. Грабовский, Д. Г. Замолодчиков

Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН

117810 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

E-mail: dzamolod@cepl.rssi.ru

Поступила в редакцию 29.08.2011 г.

Предложены модели, позволяющие оценивать запасы валежа по результатам учета на линейных трансектах. Исходными данными служат количества и размеры валежных фрагментов, пересеченных линейной трансектой либо линией хода, модельным итогом являются количества и запасы углерода валежа в расчете на единицу площади. Для разработки моделей использованы два метода: аналитический (выведена формула пересчета) и имитационный (создана имитационная модель распределения валежа на площади). Для имитационной модели разработано программное обеспечение, облегчающее ее применение сторонними пользователями. Проведена эмпирическая оценка соответствия оценок, полученных данными методами, с методом сплошного учета на площади. Величина ошибок модельных результатов по сравнению с методом площадного учета не превышает 10%.

Крупные древесные остатки, валеж, линейные трансекты, методы оценки, объем, запас углерода, моделирование, программное обеспечение.

Построение балансов углерода в различных типах лесных экосистем к настоящему времени стало одной из актуальнейших задач лесоведения. Оценка баланса углерода невозможна без адекватных сведений о содержании углерода в каждом из пулов лесной экосистемы. В частности, важную роль в углеродном цикле леса играет валеж: мертвое, в основном надземное, органическое вещество с малой и средней скоростью разложения. Иными словами, это мертвые стволы, их фрагменты и отпавшие, лежащие на земле сухие ветви. Валеж является компонентом дебриса, к которому, помимо валежника, относится сухостой (закрепленные сухие деревья), повисшие сухие фрагменты на кронах, сухие сучья на стволах живых деревьев, погребенные в почве стволы и толстые корни. Согласно современным оценкам, суммарный запас углерода валежа в лесах России составляет около 2.7 Гт С [5].

Учет валежа на пробных площадях является трудоемкой задачей, требующей временных затрат на устройство учетных площадей и заме-

ры всех валежин. По традиционным методикам на пробных площадях учитывают все валежные фрагменты, превышающие выбранные размерные критерии [4, 7, 9, 10]. Пробные площади могут иметь различную форму: это могут быть полосы фиксированной ширины, пересекающие исследуемый биотоп, либо окружности фиксированного диаметра. Трудоемкость площадного учета валежа отражается на числе имеющихся опубликованных данных: из 2219 записей, включенных в специализированную базу данных по запасам дебриса в лесах России [2], лишь 55 (3%) включали информацию по валежу. Вполне очевидно, что при малом числе исходных экспериментально-полевых оценок неопределенность любых региональных обобщений будет весьма высока.

Альтернативой площадному учету является метод линейных трансект [1]. Через выбранный биотоп прокладывается трансекта или несколько трансект в регулярном порядке (параллельные трансекты с определенным расстоянием между ними) либо в случайных направлениях. Далее учитывается диаметр всех валежин в месте их пересечения трансектой. После этого пересчет на

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (11-04-01486а).

площадь производится по формуле, выведенной У. Варреном и П. Олсенем [11]:

$$V = \pi^2 \left(\sum_{i=1}^n D_i^2 / 8 \right) L, \quad (1)$$

где V – объем валежника, m^3 ; D_i – диаметр i -той валежины ($i = 1 \dots n$); n – общее число валежин, пересеченных трансектой; L – длина трансекты, m .

Формула (1) требует допущения, что зависимость объема валежины от ее длины одинакова для всех фрагментов валежа. Данное условие с определенным приближением выполняется в одновидовых насаждениях, где весь валеж представлен одной древесной породой. В многовидовых насаждениях это условие не выполняется. В таких ситуациях можно вести расчет по каждой отдельной породе, однако на поздних стадиях разложения исходную породу определить довольно трудно. Это весьма существенное ограничение применения формулы (1).

Другой проблемой применения формулы (1) оказывается неслучайная ориентация направления расположения валежин по сторонам света. Например, если в данной местности роза ветров несимметрична (ветры дуют преимущественно с одного направления), то следует ожидать неслучайного направления расположения фрагментов валежа на грунте. Для того чтобы получить адекватные данные с использованием формулы Варрена-Олсена, необходимо закладывать несколько трансект, в случайных направлениях пересекающих тестируемый участок. Это существенно увеличивает временные затраты на измерения.

В некоторых случаях полезно иметь оценку общего числа фрагментов валежника на площади. Формула (1) не позволяет сделать такую оценку. Кроме того, она не применима для расчета площади поверхности валежа, которую полезно знать при исследовании газообмена между валежом и воздушной средой.

В данной статье предлагаются методы расчета объема и других характеристик валежа по данным учета на линейных трансектах, лишённые перечисленных выше недостатков традиционного способа анализа. Задача конверсии линейных учетов в площадные оценки в настоящей работе решена как аналитическим путем, так и с использованием имитационного подхода. Проверка эффективности предложенных моделей осуществлена на данных, собранных в избранных лесных насаждениях Костромской обл.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Модели. Вывод *аналитической модели* начнем со строгой формулировки решаемой математической задачи. Пусть имеется однородный участок

леса квадратной формы со стороной L , который назовем учетной площадью. Проведем через него прямую линию – трансекту и оценим длину (a) и диаметр у основания (b) всех валежин, пересекающих эту линию. Задача состоит в оценке объема валежа на площади по линейным данным. Иными словами, необходимо получить распределение числа и размеров фрагментов на единицу площади по имеющимся данным учета на линейной трансекте.

Оценим вероятность пересечения с трансектой прямолинейного фрагмента валежа длиной a (рис. 1). Здесь и далее под длиной фрагмента будем понимать медиану размерного класса, к которому относится данный фрагмент. Отметим, что трансекта может пересекать несколько фрагментов длиной a . Положение фрагмента задается координатами его левого конца и ориентацией, определяемой углом по отношению к трансекте. Все углы равновероятны в интервале от 0 до π , а координаты валежины случайны. Пусть $G(\varphi)$ – число валежин на учетной площади с углом наклона к оси ординат, лежащим в диапазоне от 0 до φ . Условие равновероятности углов означает, что плотность вероятности распределения фрагментов дебриса, попавших в учетную площадь, по углам φ наклона к оси ординат, равна

$$dG(\varphi)/d\varphi = p = \text{const}, \quad (2)$$

$$0 \leq \varphi \leq 2\pi.$$

Обозначим $n_a = F(\varphi)$ – число валежин длиной a на учетной площади с углом наклона к оси ординат в диапазоне от 0 до φ , которые пересекли трансекту. Пусть

$$\Delta G = G(\varphi + \Delta\varphi) - G(\varphi); \quad (3)$$

$$\Delta F = F(\varphi + \Delta\varphi) - F(\varphi),$$

где ΔG – число всех валежин на учетной площади с углами наклона по отношению к оси в пределах $\Delta\varphi$; ΔF – число валежин, пересекающих трансекту с углами наклона по отношению к оси ординат в пределах $\Delta\varphi$.

Доля валежин с углами наклона φ , пересекающих трансекту, равна:

$$\Delta F / \Delta G \approx a \sin(\varphi) / L \quad (4)$$

В дифференциальной форме это будет равенство:

$$dF/dG = a \sin(\varphi) / L. \quad (5)$$

Умножив и разделив правую часть уравнения (5) на $d\varphi$ и подставив значения из равенства (2), получим:

$$dF = dG a \sin(\varphi) / L = (dG/d\varphi) a \sin(\varphi) d\varphi / L = p a \sin(\varphi) d\varphi / L. \quad (6)$$

Перейдем в полученном равенстве к другим обозначениям углов (u) и проинтегрируем от 0 до φ :

$$\int_0^{\varphi} dF(u) = \frac{pa}{L} \int_0^{\varphi} \sin(u) du, \quad (7)$$

что дает:

$$F(\varphi) = p a (1 - \cos(\varphi))/L, \quad (8)$$

$$F(0) = 0.$$

Поскольку плотность распределения валежин по углам наклона к оси ординат постоянная (уравнение (1)), то $p \varphi = G(\varphi)$. Отсюда

$$F(\varphi)G(\varphi) a (1 - \cos(\varphi)) / (L \varphi) \rightarrow G(\varphi) =$$

$$= F(\varphi) L \varphi / (a (1 - \cos(\varphi))). \quad (9)$$

Следовательно,

$$G(\pi) = F(\pi) a \pi / (L(1 - \cos(\pi))) = F(\pi) L \pi / 2a, \quad (10)$$

поскольку

$$G(\pi) = N_a \text{ и } F(\pi) = n_a, \quad (11)$$

где N_a – общее число фрагментов дебриса размерного класса a на площади $L \times L$, n_a – число валежин размерного класса a , пересекающих трансекту, окончательно получим

$$N_a = n_a L \pi / 2a \approx 1.57 n_a L / a \quad (12)$$

Иными словами, получена простая формула пересчета числа фрагментов валежа размерного класса a на площадь при известном числе пересечений валежин с трансектой. Размерные классы фрагментов дебриса можно оценить из выборки, полученной по данным учета на трансекте. Просуммировав число валежин на площади по всем размерным классам $k = 1, 2, 3 \dots m$, получим общее число фрагментов валежника на площади:

$$N = \pi L / 2 \sum_{k=1}^m n_k / a_k, \quad (13)$$

где N – общее число валежин на площади $L \times L$, $k = 1, 2, 3, \dots, m$ – размерные классы валежин, n_k – число валежин размерного класса k , пересеченных трансектой, a_k – длина валежин размерного класса k .

Формально, каждый фрагмент валежа, пересеченный трансектой, можно отнести к отдельному размерному классу. Тогда к характеристике размерного класса можно отнести не только длину фрагмента, но и другие параметры, важные для решения поставленной задачи. Например, для оценки объемного запаса валежа полезно знать диаметр фрагментов у основания и вершины, ха-

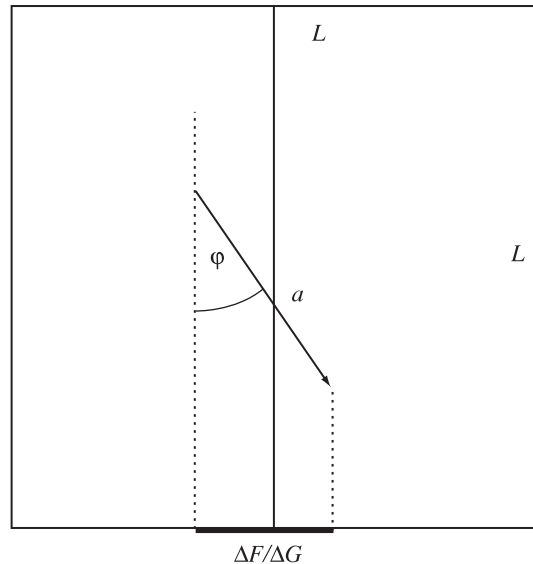


Рис. 1. Расчет вероятности пересечения отдельного фрагмента валежника учетной трансектой: φ – угол наклона валежины по отношению к оси ординат; a – длина валежины; L – длина стороны квадрата учетной площади; ΔG – число всех валежин на учетной площади с углами наклона по отношению к оси ординат в пределах $\Delta\varphi$; ΔF – число валежин, пересекающих трансекту с углами наклона по отношению к оси ординат в пределах $\Delta\varphi$.

рактеристики сбежистости, площадь поверхности фрагмента и т.д.

Применение найденной формулы пересчета может привести к систематическим ошибкам, связанным с отсутствием учета краевого эффекта. Части валежин могут выходить за границы учетной площади. Такие случаи приводят к двум важным следствиям. Во-первых, завышается оценка массы на единицу площади, поскольку учитываются и те фрагменты валежника, части которых находятся вне оцениваемой площадки. Во-вторых, существует вероятность того, что фрагмент, находящийся комлем внутри площади, пересекает трансекту уже вне ее. В этих случаях занижается оценка количества фрагментов на площади. Учесть эти обстоятельства в аналитической модели не просто [6]. Тем не менее, как мы покажем ниже, систематические ошибки при использовании аналитических коэффициентов невелики. В силу своей простоты полученная формула может успешно применяться даже в полевых условиях для предварительной оценки запасов валежа.

Имитационная модель оценки запасов валежа позволяет преодолеть ограничения аналитической модели. Как и в предыдущем случае, предположим, что данные о размерах древесных фрагментов, полученные из учета на трансекте

Таблица 1. Основные таксационные характеристики лесных насаждений Костромской обл., в которых проводились учеты валежа

Насаждение	Формула древостоя	Средний возраст, лет	Средняя высота, м	Средний диаметр на уровне груди, см	Запас древесины, м ³ га ⁻¹
1	7СЗБ	34	19	22	160
2	8Б2Е	35	18	15	150
3	10Е	87	22	24	250
4	5Б4Е1С	56	27	43	180

(выборка), адекватно отражают размеры фрагментов в генеральной совокупности (всего выбранного участка леса). Для простоты будем учитывать лишь диаметр и длину фрагментов. Будем считать диаметр и длину фрагмента независимыми величинами. По эмпирическим данным построим матрицу $n \times n$ сочетаний диаметра и длины, взвесив их по отношению длины трансекты к длине фрагмента (n – число валежин, пересеченных трансектой). Последнее необходимо, поскольку вероятность пересечения валежины с линией трансекты линейно зависит от длины валежины. Произведя нормировку данных по единице, получим матрицу вероятности встреч сочетаний диаметра и длины. Далее создадим игровое поле размером $L \times L$ и проведем виртуальную трансекту через середину поля. В соответствии с матрицей вероятности встреч сочетаний диаметра и длины будем выбирать фрагменты и “бросать” их на игровое поле в случайных местах и со случайной ориентацией (такой подход часто называют “методом Монте-Карло”). Эту процедуру будем продолжать до тех пор, пока количество пересечений фрагментов с виртуальной трансектой не достигнет эмпирического значения, т.е. величины n . В рамках отмеченных выше допущений можно полагать, что число и распределение фрагментов валежника на виртуальной площади (игровом поле) соответствует искомому реальному значению.

Полевые работы. Для тестирования рассмотренных моделей в июне 2006 г. и в июне–июле 2007 г. в лесах Мантуровского р-на Костромской обл. (58°10.132' с.ш., 044°24.132' в.д.) были проведены полевые работы по учету валежа на трансектах и методом сплошного учета на площади. Полевые исследования 2006 г. проводились в трех обычных для этого района типах лесных насаждений естественного происхождения: сосняк-черничник (30–40 лет, насаждение 1), березняк с примесью сосны и ели в подлеске (40–50 лет, на-

саждение 2) и ельник-черничник (80–90 лет, насаждение 3). В 2007 г. был обследован смешанный елово-березовый лес 60 лет (насаждение 4). В каждом насаждении были измерены диаметры и высоты у 10–20 случайно выбранных деревьев преобладающей породы первого яруса, у трех деревьев из каждой выборки взяты керны для определения возраста. Средние таксационные показатели учетных площадей приведены в табл. 1.

Во всех насаждениях проведены учеты валежа на линейных трансектах, которые были обозначены нитями, натянутыми на высоте 1 м над уровнем почвы. В насаждениях 2 и 3 трансекты представляли собой прямую линию длиной 100 м. В насаждении 1 трансекта складывалась из двух линий 70 и 30 м, соединенных под прямым углом. В насаждении 4 было заложено 6 трансект, 4 из которых образовывали квадрат со стороной 100 м, а две являлись секущими линиями, проходящими через центр квадрата. Все мертвые фрагменты деревьев (упавшие стволы и ветви), пересекаемые нитью, подлежали учету. В насаждениях 1 и 2 линейному учету подлежали фрагменты валежа с диаметром более 0.5 см, в насаждениях 3 и 4 – более 5 см. У каждого фрагмента регистрировали больший диаметр (с точностью 0.5 см) и длину (с точностью 0.5 м).

Площадные учеты фрагментов валежа были проведены: в насаждении 1 – на одной пробной площади размером 20 × 20 м, в насаждении 3 – на двух пробных площадях аналогичного размера, в насаждении 4 – на одной пробной площади размером 100 × 100 м. Учету подлежали все фрагменты с диаметром, превышающим 5 см. Пробные площади в насаждениях 1 и 3 примыкали к учетным трансектам. В насаждении 4 трансекты располагались по периметру и в пределах пробной площади. В насаждении 2 площадной учет валежа не проводился.

Программное обеспечение. В среде программирования Visual Basic 6.0. было разработано программное обеспечение, позволяющее осуществлять расчеты как по аналитической, так и имитационной модели на основе экспериментально-полевых данных учета валежа на линейных трансектах в лесных насаждениях. Помимо оценки числа валежин на единицу площади, программное обеспечение включает процедуру расчета запаса углерода валежа. Составными частями этой процедуры являются нахождение объемов фрагментов валежа, пересчет объема в сухую массу и далее в углерод. Расчет объема каждого фрагмента валежа проводится по формуле объема конуса. Такой метод расчета объема может давать

несколько заниженные оценки, поскольку в реальности фрагменты валежа часто бывают ближе по форме к усеченному конусу или более сложным фигурам. Коэффициенты пересчета объема валежа в сухую массу взяты из работы [3] и составляют для хвойных пород 0.492, твердолиственных – 0.361. Для пересчета сухой массы в углерод принят коэффициент 0.5. Приводимые ниже оценки числа фрагментов и запасов углерода валежа в избранных лесных насаждениях Костромской обл. получены с использованием указанного программного обеспечения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим последовательные итерации имитационной модели (рис. 2), в конечном итоге обеспечивающие число пересечений фрагментов валежа с трансектой, аналогичное полученному при полевых работах в насаждении 2. Видно, как игровое поле постепенно заполняется виртуальными валежинами, дающим сначала 1 пересечение с трансектой (рис. 2а), затем 2 пересечения (рис. 2б) и, наконец, искомое число пересечений, равное 123 (рис. 2в).

Возникает вопрос, с какой точностью модельный результат, пример которого представлен на рис. 2в, соответствует реальному распределению фрагментов валежа в лесном насаждении? Попробуем ответить на этот вопрос с помощью статистического анализа итогов ряда симуляций имитационной модели. Сначала на площади 1 га будем случайным образом “разбрасывать” фрагменты стволов 10 см диаметром и длиной 1 м до тех пор, пока количество пересечений лежащих стволов и виртуальной трансекты (линии, пересекающей участок) не достигнет 5. Запомним общее количество “разбросанных” стволов на площади и повторим операцию 100 раз. Затем сделаем такие же действия для 10, 20, 40, 80

и 160 пересечений. Затем осуществим аналогичные процедуры для фрагментов валежа с диаметром 10 см и длиной 10 м.

Относительные ошибки средних значений числа фрагментов, полученные в этих модельных экспериментах, приведены на рис. 3. Для обеих размерных групп величина ошибки резко сокращается на интервале 5–20 пересечений, затем линия ошибок на интервале 40–80 пересечений меняет наклон. Из рис. 3 следует, что оптимальной, с точки зрения баланса затраты-точность, является трансекта, пересекающая 80–160 фрагментов. Такое количество фрагментов на трансекте дает возможность получения оценки числа валежин на площади с ошибкой, не превышающей 10%. Дальнейшее увеличение длины трансекты не приводит к существенному увеличению точности оценки.

Оценки числа валежин, найденные применением аналитической и имитационной модели к данным учета на трансектах в лесных насаждениях Костромской обл., а также результаты площадных учетов валежа приведены в табл. 2. Здесь и далее аналитическую модель, основанную на формуле (13), будем называть “Модель 1”, а имитационную – “Модель 2”. Следует констатировать хорошее совпадение оценок, полученных по обеим моделям. Для фрагментов валежа с диаметром более 0.5 см среднее расхождение между моделями составляет 0.8%, для фрагментов с диаметром более 5 см – 1.8%. По результатам площадного учета, на 1 га исследованных лесов находится в среднем 491 фрагмент валежа с диаметром более 5 см, аналогичная оценка по Модели 1 равна 499 (завышение 1.5%), по Модели 2 – 508 (завышение 3.4%).

Модели 1 и 2 дают близкие результаты и для запасов углерода валежа (табл. 3): среднее расхождение для фрагментов с диаметром более 0.5 см равно 1.8%, для фрагментов более 5 см – 3.6%.

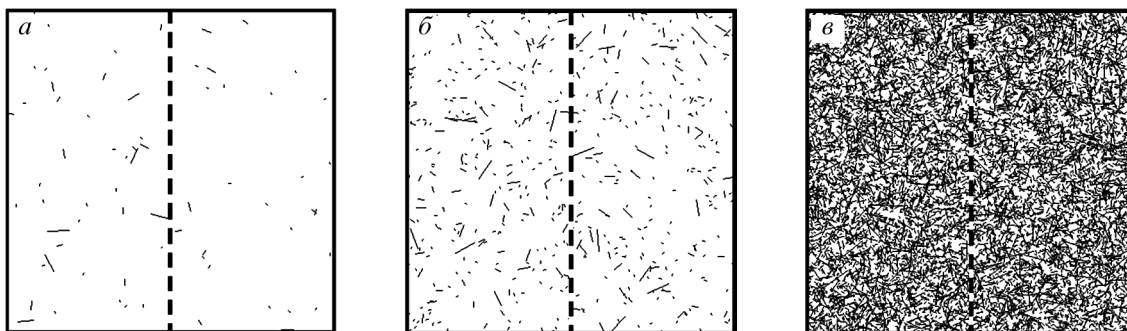


Рис. 2. Распределение фрагментов валежа на площади размером 100 × 100 м при последовательных итерациях имитационной модели, обеспечивающих 1 (а), 2 (б) и 123 (в) пересечений с линейной трансектой (пунктирная линия).

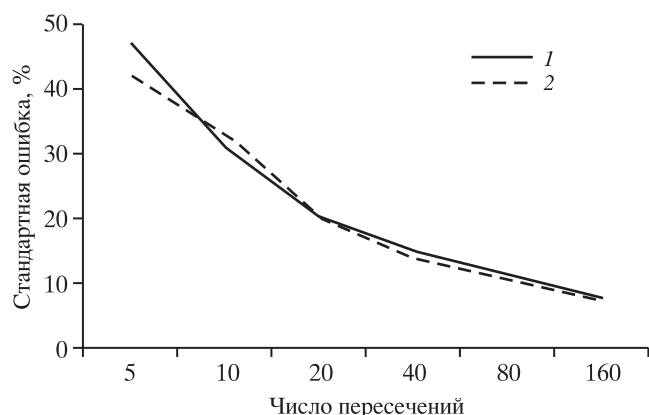


Рис. 3. Стандартная ошибка измерения количества фрагментов валежа на площади в зависимости от числа пересечений с трансектой для валежин длиной более 1 м (1) и более 10 м (2).

Отметим, что, в отличие от ситуации с числом фрагментов, Модель 2 дает более низкую оценку запаса углерода, чем Модель 1. Это результат того обстоятельства, что Модель 1 не учитывает краевой эффект. Иначе говоря, части валежа, выступающие за края учетной площади, входят в расчет по Модели 1 и отбрасываются в Модели 2. В отношении углерода валежа обе модели дали слегка заниженные результаты: Модель 1 на 1.3%, Модель 2 на 4.8%.

Полученные оценки аналитической и имитационной моделей (Модели 1 и 2) хорошо согласуются друг с другом. Некоторые отличия в оценках связаны с отсутствием учета краевого эффекта в аналитической модели. Это обстоятельство создает предпосылки к недоучету числа фрагментов

валежа и переоценке его массы. Впрочем, эти рассуждения не вполне подтверждаются сравнением результатов оценки с данными площадного учета: именно аналитическая модель дала меньшие расхождения со средними оценками. Потому следует признать, что оба рассмотренных способа могут полноправно применяться при интерпретации полевых учетов валежа на линейных трансектах. Метод может быть особенно эффективным (в плане экономии затрат на получение данных) в молодых и средневозрастных лесах, где значительная масса валежника сосредоточена в мелких фрагментах и непосредственный учет их на пробных площадях требует огромных затрат. Как было показано выше, для получения результатов с ошибкой не более 10% необходимо на трансекте учесть не менее 80 фрагментов валежника.

Практическая применимость любой научной методики в значительной степени связана с доступностью средств ее осуществления. Ранее авторы настоящей работы создали систему региональной оценки бюджета углерода лесов (РОБУЛ) по информации лесного реестра и обеспечили свободный доступ к программному обеспечению РОБУЛ через сеть Интернет [1]. Аналогичный подход распространен и на программное обеспечение моделей интерпретации данных линейного учета валежа, которое представлено на веб-сайте ЦЭПЛ РАН [8]. При желании любой исследователь может использовать охарактеризованные в статье модели для своей работы.

Важное допущение обеих моделей связано с ориентацией фрагментов валежа в пространстве. Предполагается, что валежины ориентированы

Таблица 2. Модельные и площадные оценки числа фрагментов валежа в лесных насаждениях Костромской обл.

Насаждение	Длина трансекты, м	Число фрагментов на трансекте, шт.	Число фрагментов, шт. га ⁻¹				учет на площади
			Модель 1	Модель 2			
				среднее	диапазон	стандартная ошибка	
Фрагменты с диаметром больше 0.5 см							
1	180	187	13364	13510	11193–16047	99.6	не проводился то же
2	100	123	12008	12076	9353–14342	92.8	
Среднее			12686	12793			
Фрагменты с диаметром больше 5 см							
1	180	32	830	845	483–1352	17.0	775
3	100	15	386	393	186–813	10.1	438
4	600	50	280	285	185–349	3.7	261
Среднее			499	508			491

Таблица 3. Модельные и площадные оценки запаса углерода валежа в лесных насаждениях Костромской обл.

Насаждение	Запас углерода валежа, т С га ⁻¹				учет на площади
	Модель 1	Модель 2			
		среднее	диапазон	стандартная ошибка	
Фрагменты с диаметром больше 0.5 см					
1	1.48	1.47	1.17–1.77	0.012	не проводился то же
2	2.49	2.44	1.93–2.98	0.020	
Среднее	1.99	1.95			
Фрагменты с диаметром больше 5 см					
1	1.29	1.28	0.66–2.05	0.262	1.65
3	1.32	1.24	0.59–2.34	0.033	1.32
4	1.15	1.10	0.73–1.37	0.014	0.84
Среднее	1.25	1.21			1.27

случайным образом, то есть предполагается равная вероятность всех направлений. Это допущение не всегда соответствует реальности: преимущественное направление ветра, рельеф местности и т. д. могут приводить к тому, что фрагменты валежа, особенно крупные стволы, с большей частотой лежат в одном из направлений. В дальнейшей работе над имитационной моделью авторы планируют учесть данное обстоятельство введением функции распределения вероятностей для различных направлений. Эта функция может быть идентифицирована, например, по розе ветров для данной местности.

Заключение. Предложена модификация аналитической модели и развита имитационная модель, позволяющие получать оценки числа фрагментов, объема и запаса углерода в валеже на основе учетов, проводимых по линейным трансектам. Оценки обеих моделей демонстрируют хорошее согласие с результатами сплошного учета валежа на пробных площадях, при этом линейные учеты требуют намного меньше затрат, чем площадные. Для обеих моделей разработано программное обеспечение, доступное через сеть Интернет.

* * *

У истоков данной работы стоял проф. А.И. Уткин, давший ценные советы по организации и методам сбора полевых данных. Авторы благодарны А.И. Грабовскому (ПО “Электроприбор”, г. Каменец-Подольский) за конструктивное обсуждение и оказание помощи в математическом анализе модели, П.П. Шуляку (ЦЭПЛ РАН) за участие в обсуждении формулировки проблемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Замолотчиков Д.Г., Грабовский В.И., Краев Г.Н.* Динамика бюджета углерода лесов России за два последних десятилетия // *Лесоведение*. 2011. № 6. С. 16–28.
2. *Замолотчиков Д.Г., Зукерт Н.В., Честных О.В.* Подходы к оценке углерода сухостоя в лесах России // *Лесоведение*. 2011. № 5. С. 61–71.
3. *Кудеяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А., Борисов А.В., Воронин П.Ю., Демкин В.А., Демкина Т.С., Евдокимов И.В., Замолотчиков Д.Г., Карелин Д.В., Комаров А.С., Курганова И.Н., Ларионова А.А., Лопес де Гереню В.О., Уткин А.И., Чертов О.Г.* Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. 315 с.
4. *Трейфельд Р.Ф., Кранкина О.Н., Поваров Е.Д.* Методика определения запасов и массы древесного детрита на основе данных лесоустройства. Пушкино: ВНИИЛМ, 2002. 44 с.
5. *Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Нильссон С.* Оценка запасов древесного детрита в лесах России // *Лесная таксация и лесоустройство*. 2009. №1(41). С. 133–147.
6. *Gregoire T.G., Monkevich N.* The reflection method of line intercept sampling to eliminate boundary bias // *Environ. Ecol. Stat.* 1994. V. 1. P. 219–226.
7. *Harmon M.E., Sexton J.* Guidelines for Measurements of Woody Detritus in Forest Ecosystems. U.S. LTER Network Office, Publication No 20. Seattle: University of Washington, 1996. 73 p.
8. <http://www.cepl.rssi.ru/programms.htm> (дата обращения: 17.10.2011).
9. *Karjalainen L., Kuuluvainen T.* Amount and diversity of coarse woody debris within a boreal forest landscape dominated by *Pinus sylvestris* in Vienansalo wilderness, eastern Fennoscandia // *Silva Fennica*. 2002. V. 36. № 1. P. 147–167.

10. *Ståhl G., Ringvall A., Fridman J.* Assessment of coarse woody debris – a methodological overview // *Ecological Bulletins*. 2001. № 49. P. 57–71.
11. *Warren W.G., Olsen P.E.* A line transect technique for assessing logging waste // *Forest Science*. 1964. V. 10. P. 267–276.

Models of Estimating Slash Reserves According to Data Obtained on Transects

V. I. Grabovsky, D. G. Zamolodchikov

Models that allow assessing slash reserves based on the results of their counting on linear transects are proposed. The initial data are the amount and dimensions of slash fragments that are crossed by the linear transect or travel line. The model result is the slash reserves and the carbon content in the slash calculated per unit area. Two methods were used for the development of the models: analytical (the formula for calculation was derived) and simulation (the simulation model of slash distribution over an area was developed). A program support was elaborated for both models to facilitate their application by users. The method of continuous accounting over the area studied was used to reveal the conformity of the empirical data to the estimates obtained by the models. The error value as compared to that of the method of continuous accounting does not exceed 10%.