

УДК 630.114.35-047.43

ОЦЕНКА БИОМАССЫ ДЕТРИТА В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

© 2023 г. С. И. Тарасов*

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Республика Коми, Россия

**e-mail: tarasov@ib.komisc.ru*

Поступила в редакцию 04.04.2023 г.

После доработки 25.04.2023 г.

Принята к публикации 08.05.2023 г.

Проведен анализ существующего в настоящее время метода оценки биомассы мертвого органического вещества в лесных экосистемах. Основное внимание уделяется исследованию адекватности измерительных математических моделей, используемых для оценки плотности разлагающейся древесины. Показана несостоятельность традиционного подхода при оценке показателя плотности как для отдельного разлагающегося мертвого дерева, так и при расчете среднего показателя, характеризующего плотность древесины совокупности мертвых деревьев. Рассматривается возможность применения понятия эффективной плотности для оценки биомассы отмерших древесных остатков, как наиболее соответствующего их гетерогенной структуре. Предлагается метод, основанный на представлениях интервального анализа, позволяющий, используя стандартные значения плотности здоровой древесины, оценить показатель плотности гниющей древесины соответствующего класса разложения системы классификации дебриса.

Ключевые слова: древесный детрит, крупные древесные остатки, плотность, биомасса, гетерогенность, интервальный анализ

DOI: 10.31857/S0042132423050101, **EDN:** RDMYCD

ВВЕДЕНИЕ

В экологических исследованиях одним из важнейших структурных показателей, позволяющим установить соотношение между компонентами экосистемы, является количество живого вещества, входящего в отдельные элементы ее структуры, или биомасса. Признание мертвого органического вещества важным структурным элементом лесных экосистем, играющим существенную роль в глобальном углеродном цикле, стимулировало включение детрита в сферу интересов экологов и лесоводов и сделало определение биомассы мертвой органики объектом многочисленных исследований (Sollins et al., 1987; Harmon, Sexton, 1996; Delaney et al., 1998; Beets et al., 1999; Shorohova, Shorohov, 2001; Newton, 2007; Chao et al., 2008; Merganičová et al., 2012).

Как и для большинства разделов естествознания, связанных с обработкой опытных данных, надежность получаемых оценок параметров в экологии остается предметом особого внимания. Проблема неопределенности оценок биомассы детрита является частью общей проблемы неопределенности оценки глобального углеродного бюджета (Jonas et al., 1999). Одной из причин такой неопределенности результатов является неадекватность методов оценки параметров, входящих в математическую модель физических свойств био-

массы детрита (Moss, Schneider, 2000; Nilsson et al., 2007).

Очевидно, что в силу невозможности учета всех связей и отношений, присущих реальным объектам, любые методы и модели выделяют только те из них, которые значимы в данной, конкретной ситуации, и во всех других случаях не являются важными. Некритическое применение той или иной модели, может привести к неверному результату. Так, в частности, оценка биомассы детрита основана на методе, используемом для оценки массы товарной древесины (Creed et al., 2004; Harmon et al., 2008). Однако, взгляд на отмершие древесные растения только как на материал (или вещество) является неоправданным упрощением. В данном случае, следствием такого формализма является не столько увеличение неопределенности результата, сколько его неадекватность. Поэтому выбор соответствующих методов (или разработка новых), отвечающих особенностям мертвого органического вещества, должен предшествовать любым другим действиям, направленным на уменьшение неопределенности оценок биомассы детрита.

При оценке биомассы детрита плотность разлагающейся древесины является ключевым свойством, характеризующим мертвое органическое вещество. Вследствие этого основным содержанием настоящей работы является анализ методов

определения данного параметра на всех уровнях организации лесной экосистемы. Цель работы – разработка метода оценки плотности разлагающейся древесины.

ТЕОРИЯ (АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ БИОМАССЫ ДЕТРИТА)

Оценка биомассы крупных древесных остатков в лесных экосистемах

В лесных экосистемах наиболее значимым резервуаром мертвого органического вещества являются отмершие древесные остатки, большая часть которых приходится на долю крупных древесных остатков (КДО).

Количественная оценка биомассы древесного детрита основана на классическом подходе, использующем известную связь между плотностью вещества и его объемом (Wood handbook..., 2010; Shmulsky, Jones, 2011), и практически реализуется в виде базовой математической модели оценки биомассы:

$$M_{\Sigma} = \rho V_{\Sigma}, \quad (1)$$

где M_{Σ} – суммарная масса древесных остатков, ρ – плотность вещества древесных остатков, V_{Σ} – суммарный объем древесных остатков. Суммарный объем может быть выражен через объемы отдельных экземпляров КДО, так, если количество экземпляров КДО равно N , то их суммарный объем будет равен $V_{\Sigma} = V_1 + \dots + V_N$. Тогда (1) запишется как:

$$M_{\Sigma} = \rho (V_1 + \dots + V_N). \quad (2)$$

Невозможность приписать каждому экземпляру КДО единого показателя плотности ρ ведет к естественному развитию модели (2), основанному на следующей концепции.

Выпадение деревьев в древостое происходит постоянно и обусловлено, в первую очередь, физиологической продолжительностью жизни дерева данного вида. Естественная смерть дерева является нерегулярным, случайным событием, как во времени, так и в пространстве (Franklin et al., 1987; Swaine et al., 1987; Newton, 2007). В общем случае, естественная смерть отдельного дерева не синхронизирована с гибелью других особей в древостое. Соответственно, момент начала деструкции отдельного мертвого дерева также является случайной величиной и не синхронизирован с процессами разложения других отмерших деревьев.

Количественно ферментативную деструкцию древесины выражают как потерю массы, или учитывая связь массы и плотности, как изменение показателя плотности древесины. Следовательно, в лесной экосистеме КДО могут рассматриваться как остатки мертвых деревьев на различных стадиях разложения или как остатки мертвых

деревьев с различной плотностью древесины (Nils-son, 1973; Hukka, Viitanen, 1999; Shortle, Dudzik, 2012). Ряд значений плотности древесины совокупности из N экземпляров КДО можно представить как множество случайных значений $\rho_1, \dots, \rho_n$ или случайную последовательность $\rho = \{\rho_i; i = 1, \dots, N\}$. Тогда выражение (2) переписывается следующим образом:

$$M_{\Sigma} = (\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 + \dots + \rho_N V_N) = \sum_{i=1}^N \rho_i V_i, \quad (3)$$

где ρ_i – плотность древесины i -го экземпляра КДО, V_i – объем i -го экземпляра КДО.

Поскольку, в общем случае $N \rightarrow \infty$, то практическое применение модели (3) связано с трудоемкостью получения оценок $\{\rho_i\}$. Нерациональность получения показателя плотности для каждого экземпляра КДО в силу неисчислимости данного свойства, приводит к необходимости создания измерительной модели на основе использования обобщенных характеристик. Практическое воплощение такой измерительной модели – это объединение однотипных экземпляров КДО, степень разложения которых с точки зрения наблюдателя различается незначительно, в группы, и присвоение каждой выделенной группе среднего показателя плотности.

Система классификации детрита

Задача выделения из множества экземпляров КДО однородных подмножеств (групп, классов) решается с использованием классификационных построений. В основе таких построений лежит, во-первых, установление списка признаков (свойств), подлежащих учету на отдельных элементах множества, который позволял бы различать один элемент от другого. Во-вторых, определение для каждого выделенного свойства множества его проявлений, элементы которого находятся в определенных логических соотношениях, и определяют множество возможных состояний каждого элемента (Belton, Stewart, 2002; Doumpos, Zorounidis, 2004; Roy, 2013). Для системы классификации КДО множеством наблюдаемых объектов, очевидно, является множество экземпляров КДО.

Наряду с потерей массы, деструкция древесного растения приводит к изменению его морфологических характеристик, которые также могут использоваться как индикатор степени разложения древесины. В соответствии с этим, в качестве наблюдаемого множества свойств, характеризующего разложение элементов КДО, принимают совокупность морфологических признаков, а именно: наличие или отсутствие листьев, коры, кроны, тонких веток, ветвей, структурная целостность ствола, качество древесной текстуры (Maser et al., 1979).

Иногда, такими признаками выступают биологические индикаторы: степень регистрируемого контакта с почвой, степень захвата корнями, наличие произрастающей растительности на поверхности КДО (Fogel et al., 1973).

Правила упорядочения элементов множества КДО или отношения, позволяющие сравнивать их между собой, устанавливаются с помощью заданных критериев для каждого свойства (признака). Такими критериями для выделенных свойств элементов КДО являются: отношение эквивалентности — наличие или отсутствие некоторого признака (свойства) (например: листья, кора — есть/нет); отношение порядка — качественная оценка (например: степень твердости древесины — твердая, менее твердая, полутвердая, частично мягкая, порошкообразная).

Сопоставление каждому классу (подмножеству множества элементов КДО), выделенному в соответствии с принятыми критериями, положительного действительного числа включает в классификацию числовое множество. Наиболее распространена 5-классная система классификации, которой соответствует числовое множество {1, 2, 3, 4, 5}.

Совокупность числового множества, множества наблюдаемых объектов, их свойств и отношений образуют конечное множество, все элементы которого расположены в установленном с помощью нумерации элементов порядке, или систему классификации КДО по степени разложения.

Введение 5-классной системы классификации позволяет оценивать запас КДО в древостое, используя следующую измерительную модель:

$$M_{\Sigma} = \hat{\rho}_1 \sum_{j=1}^J V_{1j} + \hat{\rho}_2 \sum_{k=1}^K V_{2k} + \dots + \hat{\rho}_5 \sum_{l=1}^L V_{5l}, \quad (4)$$

где $\hat{\rho}_1, \hat{\rho}_2, \dots, \hat{\rho}_5$ — оценка показателя средней плотности мертвой древесины соответствующего класса разложения, $\sum V_{..}$ — суммарный объем мертвой древесины соответствующего класса разложения.

Математическая модель (4) в настоящее время является общепринятой схемой оценки биомассы мертвых древесных остатков.

В свою очередь, данная модель объединяет две подмодели: модель измерения объема КДО и модель измерения средней плотности древесины КДО, соответствующей определенному классу разложения. Для дальнейшего анализа основной интерес представляет именно модель измерения средней плотности древесины КДО.

Стандартная схема измерения средней плотности древесины КДО, характеризующей определенный класс разложения детрита, хорошо известна и подробно описана в литературе (Harmon, Sexton, 1996; Harmon et al., 2008). Можно выделить два ключевых этапа измерения средней плотности КДО определенного класса разложения: оценка

плотности единичного экземпляра КДО и оценка средней плотности совокупности экземпляров КДО, относящихся к одному классу разложения.

Анализ оценки плотности вещества единичного экземпляра КДО

Измерительной процедуре оценки плотности экземпляра КДО соответствует следующая последовательность операций: выбор экземпляра КДО, идентификация его принадлежности определенному классу разложения на основе системы классификации; отбор от экземпляра КДО одного или нескольких фрагментов; определение массы фрагмента; определение геометрических характеристик (объема) фрагмента; вычисление плотности фрагмента с использованием данных значений объема и массы. Полученное в результате значение интерпретируется как плотность экземпляра КДО. В случае отбора нескольких фрагментов от экземпляра КДО определяется средняя арифметическая плотность всех фрагментов, которая принимается за оценку плотности экземпляра КДО.

Приведенная измерительная схема полностью соответствует стандартной методике определения плотности товарной древесины, в основе которой лежит классическое определение плотности, согласно которому плотность однородного вещества определяется как масса данного вещества в единице объема. Если M — масса и V — объем образца вещества, то математической моделью, описывающей такое свойство вещества как плотность ρ , является выражение:

$$\rho = \frac{M}{V}. \quad (5)$$

В соответствии данному определению, плотность здоровой (товарной) древесины (в том числе в древостое) вводится как физическая величина, определяемая массой натуральной древесины в единице объема (Wood handbook ..., 2010; Shmulsky, Jones, 2011). (Здесь и далее рассматривается плотность абсолютно сухого вещества древесины. Плотность древесины, содержащей влагу, требует специального рассмотрения; тем не менее, степень влажности древесины не меняет содержания дальнейших выводов).

В экологической и лесоводческой практике данное определение плотности переносится на плотность разлагающейся древесины. Обоснование такого переноса не задекларировано. Однако в мертвом растении, в отличие от живого, здорового дерева, процессы деструкции оказывают непосредственное влияние на такое свойство древесины, как плотность. В свою очередь, трансформация любого свойства изучаемого объекта предполагает обязательную модернизацию существующих подходов его количественной оценки. Осмыслить необходимость и степень модернизации методов

оценки плотности КДО позволяет взгляд на детрит как на один из иерархических уровней лесной экосистемы.

Остатки древесных растений являются частью структуры лесной экосистемы и могут быть выделены как иерархический уровень этой системы или подсистема (Jørgensen, 2006; Ecosystem ecology, 2009). В свою очередь, подсистема также является системой, структура которой может быть детализирована. Единичный экземпляр КДО при такой детализации будет соответствовать нижнему иерархическому уровню системы, совокупность экземпляров КДО — верхнему уровню. Нижний уровень системы — экземпляр КДО — образован, по крайней мере, двумя элементами: собственно экземпляром КДО (или веществом древесины) и деструктором.

Изменение плотности экземпляра КДО (наблюдаемого свойства нижнего уровня выделенной системы) происходит только в объеме занятом деструктором. Скорость распространения деструктора конечна, следовательно, изменение свойства (плотность) не происходит одновременно во всем объеме экземпляра КДО, что, в свою очередь, определяет пространственную неоднородность его структуры, выражающуюся в наличии, по крайней мере, двух состояний (или, используя терминологию теории гетерогенных сред, фаз) вещества древесины в составе экземпляра КДО. Таким образом, структура вещества мертвого древесного растения существенно неоднородна и обладает всеми признаками гетерогенной среды (Creed et al., 2004; Milton, 2004). В то же время, как следует из определения плотности, однородность вещества является необходимым условием адекватности модели (5).

Кроме гетерогенности структуры мертвой древесины, важным следствием иерархической организации детрита является его подчиненность принципу эмерджентности: а именно, несводимости свойств системы к сумме свойств составляющих ее подсистем.

Таким образом, взгляд на детрит как на экосистему естественным образом приводит к ряду вопросов.

Каким образом неоднородность структуры детрита влияет на его плотность? Как определить плотность неоднородного экземпляра КДО? Может ли сумма плотностей фаз экземпляра КДО (или их среднее арифметическое) рассматриваться как его характеристика? Какой физический смысл имеет понятие средняя плотность нескольких тел, например, экземпляров КДО? Ответы на эти вопросы неоднозначны.

Как известно, плотность вещества является интенсивной величиной (Яворский, Детлаф, 1979; Scott, Suppes, 1958; Bunge, 2012). Если однородное физическое тело разделить, например, на две ча-

сти, то плотность каждого из полученных в результате тел не изменится, и будет равна плотности исходного тела. Наоборот, объединяя (любым способом) два тела с различающейся плотностью, невозможно получить тело, плотность которого равнялась бы арифметической сумме плотностей тел его образующих. Другими словами, такое свойство физического тела как плотность не является аддитивным свойством, несмотря на то, что численное, выраженное математическим языком, отображение данного свойства может суммироваться.

С этой точки зрения, суммирование показателей плотности фаз вещества экземпляра КДО (как и нахождение их среднего арифметического, в том числе и для совокупности экземпляров КДО) является чисто умозрительной операцией, не имеющей содержательного, физического смысла. Однако в теории измерений не существует единого мнения — наследуют числовые выражения атрибутов эмпирических объектов свойства этих атрибутов или являются реальными числами, обладающими всеми свойствами, необходимыми для арифметических манипуляций (Hand, 1996). Поэтому рассмотрим данную проблему с практической точки зрения. Поскольку целевой величиной при изучении детрита является биомасса мертвого органического вещества, логично рассмотреть вопрос о том, насколько близка оценка массы тела, имеющего гетерогенную структуру (или оценка биомассы КДО), к истинному значению, если используется показатель плотности, полученный по стандартной методике.

Для простоты будем рассматривать абстрактное физическое тело. Очевидно, что для физического тела, имеющего гомогенную структуру, математическая модель плотности не меняется при изменении объема этого тела: если имеются два тела одного и того же вещества с объемами v и V , и, соответственно с массами m и M , то плотности в обоих случаях будут равны:

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{M}{V}. \quad (6)$$

Это позволяет, зная плотность данного вещества, определить массу любого объема данного вещества. Справедливо ли это для физического тела с гетерогенной структурой?

Пусть тело, имеющее гетерогенную структуру, объемом V и массой M состоит из двух веществ, при этом масса и объем одной фазы вещества равны M_1 и V_1 , второй — M_2 и V_2 , $V = V_1 + V_2$ и $M = M_1 + M_2$. Соответственно плотности веществ, образующих тело, равны $\rho_1 = \frac{M_1}{V_1}$ и $\rho_2 = \frac{M_2}{V_2}$. Плотность вещества такого тела согласно определению (5) будет равна:

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M_1}{V} + \frac{M_2}{V} = \frac{M_1 V_1}{V_1 V} + \frac{M_2 V_2}{V_2 V} = \frac{\rho_1 V_1}{V} + \frac{\rho_2 V_2}{V}. \quad (7)$$

Как видим, плотность тела, имеющего гетерогенную структуру, не является простой арифметической суммой плотностей фаз и зависит от структуры вещества: чем больше объемная доля одной фазы, тем ближе значение общей (суммарной) плотности к плотности вещества этой фазы. (Отметим: при $V_1 = V_2$ имеем тривиальный случай $\rho_1 = \rho_2$). Величину, определяемую выражением (7), часто называют средней плотностью, однако, на самом деле, это — взвешенная средняя (Hardy et al., 1952; Design and ..., 2001) или эффективная (Torquato, 2000; Design and ..., 2001; Milton, 2004) плотность. Фактически, полученная характеристика является уникальной характеристикой конкретного физического тела, имеющего гетерогенную структуру. Массу физического тела с другим соотношением фаз вещества, используя данное значение плотности, определить невозможно.

Отделим от рассматриваемого тела образец объемом v и массой m , включающий обе фазы вещества так, что масса, объем и плотность первой фазы равны m_1 , v_1 , ρ_1 , второй — m_2 , v_2 , ρ_2 , $v = v_1 + v_2$ и $m = m_1 + m_2$. Взвешенная средняя (эффективная) плотность вещества данного образца равна:

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{m_1}{v} + \frac{m_2}{v} = \frac{m_1 v_1}{v_1 v} + \frac{m_2 v_2}{v_2 v} = \frac{\rho_1 v_1}{v} + \frac{\rho_2 v_2}{v}. \quad (8)$$

Тогда массу тела, от которого взят образец, объемом V можно определить двумя способами:

$$1) M = M_1 + M_2 = \rho_1 V_1 + \rho_2 V_2, \quad (9)$$

и

$$2) M = \rho V = \frac{m_1 + m_2}{v} V = \left(\frac{\rho_1 v_1}{v} + \frac{\rho_2 v_2}{v} \right) V = \frac{\rho_1 v_1}{v} V + \frac{\rho_2 v_2}{v} V. \quad (10)$$

Очевидно, что масса тела, рассчитанная с помощью эффективной плотности (уравнение (8)), будет принимать различные значения в зависимости от соотношения v_1 и v_2 в образце. Следовательно, тождественность результатов, полученных с помощью (9) и (10), обеспечивается, только, если $\frac{v_1}{v} = \frac{V_1}{V}$ и $\frac{v_2}{v} = \frac{V_2}{V}$, то есть, если соотношение объемов фаз веществ и в образце, и в теле, от которого взят образец, одинаково.

С практической точки зрения это означает, что невозможно определить массу тела, имеющего гетерогенную структуру, используя эффективную плотность, рассчитанную для части этого тела (не

говоря уже об определении массы других тел сходной структуры), если соотношения фаз веществ в исходном теле и во взятой от него части различаются. Отметим, что, в силу трудоемкости, определение соотношения здоровой и разлагающейся древесины в экземпляре КДО нецелесообразно с практической точки зрения.

Вопрос о применимости средней арифметической плотности рассмотрим на следующем примере. Пусть имеется N физических тел с объемами $V_1, V_2, \dots, V_n$ и соответственно с массами $M_1, M_2, \dots, M_n$ и плотностями $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$.

Суммарная масса всех n тел по определению равна:

$$M_\Sigma = M_1 + M_2 + \dots + M_n = \rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 + \dots + \rho_n V_n. \quad (11)$$

Суммарная масса, вычисленная с использованием средней плотности, равна:

$$M_\Sigma = \bar{\rho} (V_1 + V_2 + \dots + V_n) = \frac{(\rho_1 + \rho_2 + \dots + \rho_n)(V_1 + V_2 + \dots + V_n)}{n}, \quad (12)$$

где средняя плотность есть

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \dots + \rho_n}{n}. \quad (13)$$

Истинность выражения (11) может быть верифицирована элементарным взвешиванием. В то же время, выражение (12) тождественно выражению (11) только если $V_1 = V_2 = \dots = V_n$, или $\rho_1 = \rho_2 = \dots = \rho_n = \bar{\rho}$.

Точно так же, как

$$M_i = \rho_i V_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

тождественно

$$M_i = \bar{\rho} V_i = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \dots + \rho_n}{n} V_i, \quad (15)$$

если выполняется $\rho_1 = \rho_2 = \dots = \rho_n = \bar{\rho}$.

Это означает, что, хотя определение средней плотности в виде (13) возможно, практического значения эта величина не имеет. Для однородных по структуре и составу физических тел определение средней плотности лишено практического смысла. Для тел с различной плотностью величина, рассчитанная как средняя арифметическая плотность этих тел, не является плотностью (в смысле классического определения) и не может использоваться для определения массы этих тел, то есть не имеет физического смысла.

Переходя от абстрактных физических тел к крупным древесным остаткам, можно резюмировать следующее.

Гетерогенной структуре вещества КДО соответствует методика определения плотности с уче-

том объемной доли веществ, входящих в состав древесины КДО (Milton, 2004), однако практическое ее внедрение связано со значительными затратами и, поэтому, нецелесообразно. С другой стороны, в силу гетерогенности структуры мертвой разлагающейся древесины эффективная плотность вещества части экземпляра КДО не является характеристикой всего экземпляра КДО. Эффективная плотность вещества единичного экземпляра КДО является уникальной характеристикой только данного экземпляра КДО.

Нахождение средней арифметической плотности совокупности экземпляров КДО, хотя и является формально допустимой операцией, не имеет практического смысла, т.к. получающаяся в результате усреднения величина не может быть использована для определения массы любого экземпляра КДО из совокупности. Таким образом, стандартная методика определения плотности однородного вещества не является адекватной по отношению к мертвому органическому веществу.

Формальный перенос математической модели плотности однородного вещества (5) на свойство гетерогенной среды не единственная проблема существующей методики оценки биомассы детрита. Еще одна проблема возникает на следующем иерархическом уровне системы КДО — это необоснованность применяемой статистической модели, не учитывающей структурные особенности пула КДО, обусловленные спецификой его формирования.

Оценка плотности вещества совокупности экземпляров КДО

Как показывает практика, задача сопоставления каждому классу разложения КДО показателя плотности решается на основе статистико-вероятностной модели: каждому классу присваивается выборочная оценка показателя плотности. Однако даже если в качестве показателя плотности использовать эффективную плотность экземпляра КДО и усреднение проводить с учетом весов (долей) фаз вещества каждого выборочного экземпляра КДО, тем не менее, такая модель будет противоречить особенностям формирования структуры резервуара КДО в лесной экосистеме.

Если принять концепцию о несинхронности начала деструкции отмерших деревьев, то в лесной экосистеме в любой момент времени значения плотностей экземпляров КДО могут принимать любые значения. За время, начиная с момента смерти дерева до момента его полного разложения, значения плотности разлагающейся древесины мертвого дерева принимает все мыслимые значения в диапазоне, ограниченном с одной стороны значением плотности здоровой (ядровой) древесины, с другой — нулевым значением (нулевая

плотность в данном контексте обозначает отсутствие плотности или полное разложение дерева). Все значения плотности внутри этого диапазона являются равновероятными.

Проиллюстрируем это простейшей моделью, описывающей смерть деревьев и динамику разложения КДО в древостое.

Обозначим плотность экземпляра КДО в произвольный момент времени t_i как $\rho(t_i)$ (здесь и далее под плотностью экземпляра КДО понимается эффективная плотность). Соответственно, если t_0 — время наступления смерти дерева, то логично считать, что $\rho(t_0) = \rho_0$ — плотность древесины здорового дерева; если t_N — время полного разложения мертвого дерева, то $\rho(t_N) = 0$ — нулевая плотность. Измеряя (гипотетически) плотность мертвого дерева через заданный интервал времени, множество значений плотности единичного экземпляра мертвого дерева, полученных за весь период разложения, можно представить в виде последовательности $\rho = \{\rho(t_i); i = 0, \dots, N\}$, где $t_0 < \dots < t_N, t_i \in T, T \subseteq R$. Пусть интервал времени между соседними измерениями равен h , тогда множество возможных значений плотности отдельного дерева за весь период разложения можно представить в виде следующего временного ряда $\rho = \{\rho_i; i = 0, \dots, N\}$, где $i = t_i/h$ и $\rho_N = 0$.

Чтобы различать отдельные экземпляры КДО в древостое введем индекс $k = 1, \dots, M$, где M — количество экземпляров КДО в древостое. Тогда последовательность значений плотности k -го дерева запишется как $\rho_k = \{\rho_{ki}; i = 0, \dots, N\}$ или, в матричном обозначении, как вектор-строка

$$\rho_{k0}, \rho_{k1}, \rho_{k2}, \dots, \rho_{kN}. \quad (16)$$

Пусть в течение периода h в древостое умирает одно дерево и одно дерево рождается и время полного разложения одинаково для всех деревьев. Тогда множество значений плотности для двух деревьев в матричном обозначении запишется как:

$$\begin{pmatrix} \rho_{0,0} & \rho_{0,1} & \rho_{0,2} & \dots & \rho_{0,N} & 0 \\ \rho_0 & \rho_{1,0} & \rho_{1,1} & \rho_{1,2} & \dots & \rho_{1,N} \end{pmatrix}, \quad (17)$$

для трех деревьев:

$$\begin{pmatrix} \rho_{0,0} & \rho_{0,1} & \rho_{0,2} & \dots & \rho_{0,N} & 0 & 0 \\ \rho_0 & \rho_{1,0} & \rho_{1,1} & \rho_{1,2} & \dots & \rho_{1,N} & 0 \\ \rho_0 & \rho_0 & \rho_{2,0} & \rho_{2,1} & \rho_{2,2} & \dots & \rho_{2,N} \end{pmatrix}, \quad (18)$$

где ρ_0 — плотность древесины здорового дерева.

Вся совокупность значений плотностей КДО для древостоя в процессе жизнедеятельности, начиная с момента времени t_0 , может быть представлена бесконечной матрицей следующего вида:

$$\left(\begin{array}{cccccccccccccccc}
 \rho_{0,0} & \rho_{0,1} & \rho_{0,2} & \dots & \dots & \dots & \rho_{0,N} & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \rho_0 & \rho_{1,0} & \rho_{1,1} & \dots & \dots & \dots & \rho_{1,N-1} & \rho_{1,N} & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \rho_0 & \rho_{2,0} & \dots & \dots & \dots & \rho_{2,N-2} & \rho_{2,N-1} & \rho_{2,N} & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \rho_0 & \rho_{k,0} & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \rho_{k,i} & \rho_{k,i+1} & \rho_{k,i+2} & \dots & \rho_{k,N} & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \rho_0 & \rho_{M,0} & \rho_{M,1} & \rho_{M,2} & \dots & \dots & \dots & \rho_{M,N} & 0 & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \rho_0 & \rho_{M+1,0} & \rho_{M+1,1} & \dots & \dots & \dots & \rho_{M+1,N-1} & \rho_{M+1,N} & 0 & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \rho_0 & \rho_{M+2,0} & \dots & \dots & \dots & \rho_{M+2,N-2} & \rho_{M+2,N-1} & \rho_{M+2,N} & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \rho_0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots
 \end{array} \right), \quad (19)$$

здесь $k = 0, \dots, M, \dots, \infty; i = 0, \dots, N$.

Следовательно, множество значений плотности КДО в древостое в любой момент времени начиная с t_N можно рассматривать как столбец данной матрицы вида:

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \rho_{k,N} \\ \rho_{k+1,N-1} \\ \vdots \\ \rho_{M+k-2,2} \\ \rho_{M+k-1,1} \\ \rho_{M+k,0} \\ \rho_0 \\ \vdots \end{pmatrix}. \quad (20)$$

Транспонирование и переиндексация, посредством вычитания из индекса номера дерева k , приводит вектор-столбец (20) к более удобному для восприятия виду:

$$\rho_0, \rho_{0,N}, \rho_{1,N-1}, \dots, \rho_{M-1,1}, \rho_{M,0}, 0. \quad (21)$$

Таким образом, множество значений плотности всех экземпляров КДО в древостое в любой момент времени может быть представлено упорядоченным рядом, число членов которого определяется количеством мертвых деревьев в древостое на момент наблюдения. Для того, чтобы данный ряд мог рассматриваться как статистическая совокупность, необходимо выполнение определенных требований.

Единицами совокупности (21) являются экземпляры КДО, которые характеризуются таким общим свойством (признаком), как плотность древесины. Если данный признак является случайной величиной, то вариация признака у отдельных экземпляров КДО, входящих в рассматриваемую

совокупность, обусловлена совместным влиянием разнообразных факторов (или определенного комплекса условий), которые по-разному сочетаются в каждом отдельном случае. Данная совокупность образована как одновременное испытание многих сходных объектов. Требование неизменности комплекса условий для такой совокупности означает не только одинаковость условий для каждого объекта, но и равную продолжительность воздействия этих условий на объект. Поскольку факторы окружающей среды непрерывно изменяются, то условия разложения для каждого экземпляра КДО различны так же, как и время нахождения в этих условиях. Это не позволяет рассматривать множество экземпляров КДО как однородную статистическую совокупность так же, как и выделить из данного множества несколько статистически однородных подмножеств. В то же время, понятие однородность является одним из принципиальных требований статистической теории (Walter, Pronzato, 1997).

Таким образом, использование статистико-вероятностной модели для оценки плотности разлагающейся древесины не имеет оснований. К тому же, применение такой модели, фактически, означает синхронность разложения экземпляров КДО, то есть независимо от размеров и времени разложения значение плотности КДО определенного класса разложения закономерно остается постоянным в пределах случайной погрешности. Несостоятельность этого утверждения очевидна. Отметим, что неаддитивность плотности также можно рассматривать как несоблюдение условий однородности.

Катастрофы могут привести к образованию статистически упорядоченных выборок в структуре КДО, однако такие образования не будут устойчивыми, что обусловлено зависимостью плотности вещества разлагающейся древесины от времени. Для наблюдателя оценка средней плотности класса КДО, полученная по такой выборке в различные моменты времени, будет иметь разную величину. Использовать такой показатель в качестве признака класса нецелесообразно.

Подводя итог, можно констатировать, что существующая практика оценки плотности разлагающейся древесины не является адекватной как на уровне единичного экземпляра КДО, так и на уровне совокупности экземпляров. В свою очередь, обоснованность исходных положений не только противоречит научному подходу, но, к тому же, приводит к значимому отклонению прогнозируемых результатов от фактических.

В ситуациях, которые характеризуются принципиальным несоблюдением условий статистического ансамбля при сборе информации о моделируемом явлении, одним из наиболее естественных способов описания таких явлений является интервальное представление.

Метод оценки средней плотности вещества КДО на основе интервального анализа

Существует большое количество прикладных задач, решение которых не может быть найдено в рамках статистико-вероятностного подхода. Общим для таких задач является то, что вариабельность наблюдаемой переменной обусловлена не случайностью, а является проявлением неединственности возможных исходов. Это, в свою очередь, ведет к принципиальному несоблюдению условий статистической совокупности при формировании модельной выборки (Walter, Pronzato, 1997). Переменная, в частности, может, представлять значения, принимаемые интересующей наблюдателя величиной в заданные моменты времени (Jaulin et al., 2001). Неединственность значений наблюдаемой переменной в данном контексте означает, что переменная может принимать любые значения из некоторого интервала, границы которого известны или могут быть установлены. При этом переменной не сопоставляется никакой вероятностной меры. Одним из наиболее естественных способов описания таких явлений является интервальное представление (Neumaier, 2001; Jaulin et al., 2001).

Приложение интервального представления к оценке средней плотности КДО соответствующего класса разложения сводится к последовательному решению двух задач: 1) выделение из множества значений плотности КДО подмножеств, характеризующих определенный класс разложения; 2) оценка средней плотности КДО соответствующего класса разложения.

Пусть P — упорядоченное множество возможных значений плотности КДО. Если k — число классов системы классификации, то, для того, чтобы сопоставить каждому классу подмножество значений плотности КДО, необходимо разбить множество P на k равных частей.

Выделение из множества значений плотности КДО подмножеств, характеризующих определенный класс разложения

Рассмотрим множество P действительных чисел $p_1, \dots, p_n$, являющихся значениями плотности КДО и составляющих вектор ρ . Минимальное значение плотности равно нулю и соответствует полному разложению экземпляра КДО. Максимальное значение естественно оценить как плотность ядровой древесины здорового дерева ρ_0 .

В контексте интервальных представлений (Neumaier, 2001) можно записать:

$$\rho = [\underline{\rho}, \bar{\rho}], \quad (22)$$

где $\underline{\rho} = \rho_0$ и $\bar{\rho} = 0$ соответственно нижняя и верхняя границы интервала $[\underline{\rho}, \bar{\rho}]$.

Для определенности, пусть $k = 5$. Тогда задача сводится к разбиению интервала ρ на пять равных интервалов $\rho_1 = [\underline{\rho}_1, \bar{\rho}_1], \dots, \rho_5 = [\underline{\rho}_5, \bar{\rho}_5]$, соответствующих классам разложения системы классификации КДО, так, чтобы границы соседних интервалов совпадали.

По определению (Neumaier, 2001) ширина интервала $\rho = [\underline{\rho}, \bar{\rho}]$ есть

$$w(\rho) = \bar{\rho} - \underline{\rho}. \quad (23)$$

Тогда, с учетом постановки задачи, справедливы очевидные утверждения:

$$w(\rho_1) = \dots = w(\rho_5); \quad (24)$$

$$w(\rho) = w(\rho_1) + \dots + w(\rho_5) = w(5\rho_1) = \dots = w(5\rho_5); \quad (25)$$

$$w(\rho) = 5w(\rho_1) = \dots = 5w(\rho_5). \quad (26)$$

Следовательно, ширина любого из рассматриваемых интервалов равна:

$$w(\rho_1) = \dots = w(\rho_5) = \frac{1}{5}w(\rho) = \frac{\bar{\rho}}{5} - \frac{\underline{\rho}}{5}. \quad (27)$$

Из заданного способа разбиения интервала ρ следует ряд равенств: $\underline{\rho} = \underline{\rho}_1$, $\bar{\rho}_1 = \underline{\rho}_2$, $\bar{\rho}_2 = \underline{\rho}_3$, $\bar{\rho}_3 = \underline{\rho}_4$, $\bar{\rho}_4 = \underline{\rho}_5$, $\bar{\rho}_5 = \bar{\rho}$.

Тогда для интервала ρ_5 справедливо $w(\rho_5) = \frac{\bar{\rho}}{5} - \frac{\underline{\rho}}{5} = 0 - \frac{\rho_0}{5}$, и, следовательно, $\rho_5 = \left[\frac{\rho_0}{5}, 0\right]$.

Соответственно, для интервала ρ_4 справедливо $w(\rho_4) = \frac{\rho_0}{5} - \underline{\rho}_5 = \frac{\bar{\rho}}{5} - \frac{\underline{\rho}}{5} = 0 - \frac{\rho_0}{5}$, и, следовательно, $\underline{\rho}_5 = \frac{2\rho_0}{5}$ и $\rho_4 = \left[\frac{2\rho_0}{5}, \frac{\rho_0}{5}\right]$. Действуя аналогично, можно получить границы всех интервалов:

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \left[\rho_0, \frac{4\rho_0}{5} \right], \quad \rho_2 = \left[\frac{4\rho_0}{5}, \frac{3\rho_0}{5} \right], \quad \rho_3 = \left[\frac{3\rho_0}{5}, \frac{2\rho_0}{5} \right], \\ \rho_4 &= \left[\frac{2\rho_0}{5}, \frac{\rho_0}{5} \right], \quad \rho_5 = \left[\frac{\rho_0}{5}, 0 \right]. \end{aligned} \quad (28)$$

Оценка средней плотности КДО соответствующего класса разложения

Оценку средней плотности КДО соответствующего класса разложения будем искать в общем виде. Также рассмотрим множество P_k действительных чисел $\rho_{k1}, \dots, \rho_{kn}$, являющихся значениями плотности разлагающейся древесины КДО k -го класса и составляющих вектор ρ_k . Компоненты вектора ρ_k неизвестны кроме границ его возможных значений. Целью является использование всех доступных сведений для получения оптимальной оценки, наилучшим образом характеризующей плотность k -го класса разложения или множество P_k . Интервальная форма описания множества значений вектора ρ_k состоит в задании нижней и верхней границ для ρ_k :

$$\rho_k := [\underline{\rho}_k, \overline{\rho}_k] := \{ \tilde{\rho} \in M \mid \underline{\rho}_k \leq \tilde{\rho} \leq \overline{\rho}_k \}, \quad (29)$$

где $\tilde{\rho}_k$ — истинное значение плотности разлагающейся древесины КДО k -го класса.

Интервал $[\underline{\rho}_k, \overline{\rho}_k]$ содержит в себе все возможные точечные оценки величины ρ_k , соответственно, оценкой может служить любой элемент множества P_k .

Если в качестве оптимальной оценки $\hat{\rho}$ принять наиболее широко используемую оценку, минимизирующую сумму квадратов разностей (Walter, Pronzato, 1997), то нахождение такой оценки сводится к минимизации выражения:

$$\sum_{i=1}^n (\hat{\rho} - \rho_{ki})^2 = \min. \quad (30)$$

Дифференцирование (29) по $\hat{\rho}$ и приравнивание полученного выражения к нулю, дает:

$$\sum_{i=1}^n (\hat{\rho} - \rho_{ki}) = 0. \quad (31)$$

Так как известны (заданы) только верхняя и нижняя границы интервала, то $n = 2$, $\rho_{k1} = \underline{\rho}_k$, $\rho_{k2} = \overline{\rho}_k$, и, следовательно:

$$\hat{\rho} = \frac{1}{2} (\underline{\rho}_k + \overline{\rho}_k). \quad (32)$$

Выражение (32) совпадает с определением срединной точки интервала (Jaulin et al., 2001).

Введение, следуя (Neumaier, 2001), радиуса ρ_k

$$\text{rad } \rho_k := \frac{1}{2} (\underline{\rho}_k - \overline{\rho}_k) \geq 0 \quad (33)$$

позволяет преобразовать интервальное представление числа в абсолютную ошибку представления:

$$\tilde{\rho} \in \rho_k \Leftrightarrow |\tilde{\rho} - \hat{\rho}| \leq \text{rad } \rho_k = \Delta, \quad (34)$$

и записать неопределенность переменной $\tilde{\rho}$ в форме доверительного интервала:

$$\hat{\rho} - \Delta \leq \tilde{\rho} \leq \hat{\rho} + \Delta. \quad (35)$$

Использование описанной методики дает возможность получить следующие оценки средней плотности КДО каждого класса разложения пятиклассной системы классификации:

$$0.9\rho_0 - 0.1\rho_0 \leq \tilde{\rho}_1 \leq 0.9\rho_0 + 0.1\rho_0; \quad (36)$$

$$0.7\rho_0 - 0.1\rho_0 \leq \tilde{\rho}_2 \leq 0.7\rho_0 + 0.1\rho_0; \quad (37)$$

$$0.5\rho_0 - 0.1\rho_0 \leq \tilde{\rho}_3 \leq 0.5\rho_0 + 0.1\rho_0; \quad (38)$$

$$0.3\rho_0 - 0.1\rho_0 \leq \tilde{\rho}_4 \leq 0.3\rho_0 + 0.1\rho_0; \quad (39)$$

$$0.1\rho_0 - 0.1\rho_0 \leq \tilde{\rho}_5 \leq 0.1\rho_0 + 0.1\rho_0. \quad (40)$$

Практический выбор значения ρ_0 определяется видовой принадлежностью древесных остатков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одним из параметров, используемых при расчете биомассы мертвого органического вещества, является плотность разлагающейся древесины. Сложившаяся к настоящему времени практика оценки плотности опирается на базовые модели, которые не являются адекватным отражением реальности.

Во-первых, в рамках существующего подхода древесина разлагающихся древесных растений рассматривается как однородное вещество, что приводит к неверной оценке плотности древесины как на уровне отдельного экземпляра КДО, так и на уровне совокупности экземпляров. Гетерогенность структуры вещества КДО и неаддитивность плотности как физической величины препятствуют использованию апробированных методов оценки плотности здоровой древесины.

Во-вторых, согласно действующей методике, пул КДО моделируется как выборка, удовлетворяющая условиям применения статистико-вероятностного подхода, в то время как формирование структуры КДО в лесных экосистемах носит скорее стационарный характер, чем иррегулярный. Иррегулярность, вносимая в динамику формирования совокупности КДО катастрофами, может изменить параметры процесса только на коротком временном отрезке. Стационарность формирования структуры наряду с асинхронностью смерти отдельного древесного растения является причиной того, что совокупности КДО не обладают свойствами статистически однородного ансамбля.

Использование показателя эффективной плотности древесины КДО, методически верное и позволяющее исключить проблемы, связанные с гетерогенностью древесины КДО, усложняет сбор и обработку информации и, однако, не решает проблему сопоставления показателя плотности КДО классу разложения.

Интервальный анализ позволяет получить искомое решение. Применение интервального представления, кроме устранения методического несоответствия, порождает ряд преимуществ. Во-первых, это возможность отказаться от непосредственного экспериментального измерения плотности и определять плотность КДО на основе стандартных значений плотности здоровой древесины. Во-вторых, предлагаемый подход способствует стандартизации методики определения биомассы мертвого органического вещества.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках темы НИР “Зональные закономерности динамики структуры и продуктивности первичных и антропогенно-измененных фитоценозов лесных и болотных экосистем европейского Северо-Востока России” (122040100031-8).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей и животных в качестве объектов изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: ГРФМЛ “Наука”, 1979. 942 с.
- Beets P.N., Robertson K.A., Ford-Robertson J.B. et al. Description and validation of C change: a model for simulating carbon content in managed *Pinus radiata* stands // New Zealand J. Forest. Sci. 1999. V. 29 (3). P. 409–427.
- Belton V., Stewart T.J. Multiple criteria decision analysis: an integrated approach. N.Y.: Kluwer Acad. Publishers, 2002. 372 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1495-4>
- Bunge M. Scientific research II. The search for truth. Studies in the foundations methodology and philosophy of science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. V. 3/11. 374 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48138-3>
- Chao K.-J., Phillips O.L., Baker T.R. Wood density and stocks of coarse woody debris in a northwestern Amazonian landscape // Can. J. Forest Res. 2008. V. 38 (4). P. 795–805.
- Creed I.F., Webster K.L., Morrison D.L. A comparison of techniques for measuring density and concentrations of carbon and nitrogen in coarse woody debris at different stages of decay // Can. J. Forest Res. 2004. V. 34 (3). P. 744–753.
- Delaney M., Brown S., Lug A.E. et al. The quantity and turnover of dead wood in permanent forest plots in six life zones of Venezuela // Biotropica. 1998. V. 30 (1). P. 2–11.
- Design and analysis of ecological experiments / Eds S.M. Scheiner, J. Gurevitch. N.Y.: Oxford Univ. Press, Inc. 2001. 432 p.
- Doumpos M., Zopounidis C. Multicriteria decision aid classification methods. N.Y., Boston, Dordrecht, L., M.: Kluwer Acad. Publishers, 2004. 256 p.
- Ecosystem ecology / Ed. S.E. Jørgensen. Amsterdam: Elsevier B.V., 2009. 521 p.
- Fogel R., Ogawa M., Trappe J.M. Terrestrial decomposition: a synopsis. Internal report 135. Oregon State University; Government Forest Experiment Station, Tokyo; U.S.D.A. Forest Service, Pacific Northwest Forest & Range Experiment Station. 1973. 16 p.
- Franklin J.F., Shugart H.H., Harmon M.E. Tree death as an ecological process. tree death: cause and consequence // BioScience. 1987. V. 37 (8). P. 550–556.
- Hand D.J. Statistics and the theory of measurement // J. R. Statist. Soc. A. 1996. V. 15 (3). P. 445–492.
- Hardy G.H., Littlewood J.E., Pólya G. Inequalities. 2nd ed. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 1952. 336 p.
- Harmon M.E., Sexton J. Guidelines for measurements of woody detritus in forest ecosystems. Publication № 20. U.S. LTER Network Office: University of Washington, Seattle, WA, USA. 1996. 73 p.
- Harmon M.E., Woodall C.W., Fasth B., Sexton J. Woody detritus density and density reduction factors for tree species in the United States: a synthesis. United States Department of Agriculture Forest Service. Northern Research Station. General Technical Report NRS-29. 2008. 86 p.
- Hukka A., Viitanen H.A. A mathematical model of mould growth on wooden material // Wood Sci. Technol. 1999. V. 33. P. 475–465.
- Jaulin L., Kieffer M., Didrit O., Walter E. Applied interval analysis. L.: Springer-Verlag Limited, 2001. 379 p.
- Jonas M., Nilsson S., Shvidenko A. et al. Full carbon accounting and the Kyoto protocol: a systems-analytical view. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Interim Report. 1999. 50 p.
- Jørgensen S.E. An integrated ecosystem theory, EAS Publishing House // Science and Education. 2006. P. 19–33.
- Maser C., Anderson R.G., Cromack K Jr. et al. Dead and down woody material // Wildlife habitats in managed forests: the blue mountains of Oregon and Washington. USDA Forest Service Agriculture handbook / Ed. J.W. Thomas. Washington, DC: Wildlife Management Institute: U.S. Dept. of Interior, Bureau of Land Management, 1979. 512 p.
- Merganičová K., Merganič J., Svoboda M. et al. Deadwood in forest ecosystems // Forest ecosystems – more than just trees / Eds J. Blanco, Y.-H. Lo. 2012. 482 p. <https://doi.org/10.5772/1127>
- Milton G.W. The theory of composites. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press. 2004. P. 719.
- Moss R.H., Schneider S.H. Uncertainties in the IPCC TAR: recommendations to lead authors for more consistent assessment and reporting // Guidance papers on the

- cross cutting issues of the third assessment report of the IPCC / Eds R. Pachauri, T. Taniguchi, K. Tanaka. Intergovernmental panel on climate change, Geneva, Switzerland. 2000. P. 33–51.
- Neumaier A.* Introduction to numerical analysis. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2001. 356 p.
- Newton A.* Forest ecology and conservation: a handbook of techniques. Oxford, U.K.: Oxford Univ. Press, 2007. 454 p.
- Nilsson S., Shvidenko A., Jonas M. et al.* Uncertainties of the regional terrestrial biota full carbon account: a systems analysis // *Water Air Soil Poll. Focus.* 2007. V. 7. P. 425–441.
- Nilsson T.* Studies on wood degradation and cellulolytic activity of microfungi. Department of Forest Products, Royal College of Forestry. Stockholm, Sweden: Studia Forestalia Suecica, 1973. 40 p.
- Roy B.* Multicriteria methodology for decision aiding. N.Y.: Springer, 2013. 293 p.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2500-1>
- Scott D., Suppes P.K.* Foundational aspects of theories of measurement // *J. Symbol. Log.* 1958. V. 23 (2). P. 113–128.
- Shmulsky R., Jones P.D.* Forest products and wood science: an introduction. 6th ed. West Sussex: Wiley-Blackwell, 2011. 496 p.
- Shorohova E.V., Shorohov A.A.* Coarse woody debris dynamics and stores in a boreal virgin spruce forest // *Ecol. Bull.* 2001. V. 49 (49). P. 129–135.
<https://doi.org/10.2307/20113270>
- Shortle W.C., Dudzik K.R.* Wood decay in living and dead trees: a pictorial overview. U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. General technical report NRS, 2012. 97 p.
- Sollins P., Cline S.P., Verhoeven T. et al.* Patterns of log decay in old-growth Douglas-fir forests // *Can. J. For. Res.* 1987. V. 17 (12). P. 1585–1595.
- Swaine M.D., Lieberman D., Putz F.E.* The dynamics of tree populations in tropical forest: a review // *J. Trop. Ecol.* 1987. V. 3. P. 359–366.
- Torquato S.* Modeling of physical properties of composite materials // *Int. J. Struct.* 2000. V. 37. P. 411–422.
- Walter E., Pronzato L.* Identification of parametric models from experimental data. L.: Springer, 1997. 413 p.
- Wood handbook – wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. 508 p.

Assessment of Detritus Biomass in Forest Ecosystems

S. I. Tarasov*

*e-mail: tarasov@ib.komisc.ru

Institute of Biology, Komi Science Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, Russia

The current method for estimating the biomass of dead organic matter in forest ecosystems is analyzed. The main attention is paid to the study of the adequacy of mathematical models used to estimate the density of decomposing wood. The failure of the traditional approach to estimating the density index, both for an individual decomposing dead tree, and in calculating the average index characterizing the density of the wood of the totality of dead trees is shown. We consider the possibility of applying the concept of effective density to estimate the biomass of dead wood remains as the most corresponding to their heterogeneous structure. We propose a method based on representations of interval analysis, which allows, using standard values of the density of healthy wood, to estimate the density index of rotting wood of the corresponding decomposition class of the debris classification system.

Keywords: wood detritus, large wood remains, density, biomass, heterogeneity, interval analysis