

**ЮРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ КАРПЕЧКО**доктор географических наук, ведущий научный сотрудник Института водных проблем Севера, Карельский научный центр РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*karp@nwpi.krc.karelia.ru***НАДЕЖДА АЛЕКСАНДРОВНА МЯСНИКОВА**аспирант Института водных проблем Севера, Карельский научный центр РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*gold\_dream@mail.ru*

### РАСЧЕТ ФИТОМАССЫ ДРЕВОСТОЯ

Получена количественная оценка влияния продуктивности древостоя на массу листвы и показана взаимосвязь массы листвы и корневой системы древостоя. Выполнен анализ существующих методов расчета количества листвы. Предложены формулы для расчета массы листвы, общей фитомассы и прироста общей фитомассы древостоя для сосняков, ельников и березняков.

Ключевые слова: фитомасса, масса листвы, класс бонитета, прирост фитомассы

При решении задач, связанных с круговоротом вещества и энергии возникает вопрос о количестве различных частей и общей величины фитомассы леса. Зависимости соотношения частей фитомассы древостоя от метеорологических условий вызывают интерес при исследовании механизма транспирации [15]. Масса листового аппарата представляет собой важный при определении этого физиологического процесса показатель, поэтому уточнение методов расчета количества хвои и листьев должно способствовать совершенствованию моделей транспирации древостоя и суммарного испарения с леса.

Кроме того, при отсутствии простых экспериментальных методов определения транспирации древостоя изучение динамики частей его фитомассы и их соотношений формирует некоторое представление об изменениях расхода воды с возрастом леса и в различных условиях его роста. Наличие этих оценок позволяет хотя бы косвенно судить об адекватности используемых методов расчета.

Для определения среднесуточной величины транспирации древостоя с помощью предложенного автором [5] метода могут применяться такие характеристики, как общая величина фитомассы древостоя и ее текущий прирост, что также является одним из побудительных мотивов для уточнения методов расчета этих показателей.

В лесном хозяйстве практический интерес к величине фитомассы древостоя ограничивается информацией о количестве стволовой древесины, выраженном в объемных единицах. Данную характеристику определяют при проведении таксации лесов, она имеется в базах данных о состоянии лесного фонда каждого региона. Сведения о различных частях фитомассы и о ее общей величине получают при проведении исследовательских работ, поэтому они имеются в очень ограниченном количестве.

В последние годы выполнен большой объем работ по сбору и обобщению этой информации, в частности, В. А. Усольцевым [11], [12]. Переход от объема (запаса) стволовой древесины к общей фитомассе древостоя затруднен тем, что соотношение между этими показателями зависит, как это показано в [1], [2], [3], от возраста древостоя и условий произрастания. В данной работе на основании опубликованных данных [1], [2], [3], [11], [12] приведен анализ формирования соотношений некоторых частей фитомассы древостоя, получены и предложены эмпирические зависимости для определения массы листового аппарата, общей фитомассы древостоя и ее текущего прироста.

### СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Запас фитомассы древостоя для каждого конкретного участка леса определяется продолжительностью периода роста (возрастом) растения, его биологическими особенностями и условиями произрастания. Это можно представить в следующем виде:

$$P = f(T, Bel, Bon), \quad (1)$$

где  $P$  – фитомасса на единице площади, т/га;  $T$  – возраст, лет;  $Bel$  – биологические особенности растения;  $Bon$  – класс бонитета.

Для конкретного древостоя, произрастающего в конкретных условиях, фитомасса является функцией его возраста ( $P = f(T)$ ). Также ее можно представить как функцию средней высоты древостоя ( $P = f(h)$ ). Последняя функция в меньшей степени связана с классом бонитета, чем предыдущая, так как высота древостоя конкретного возраста характеризует и условия произрастания (это лежит в основе бонитерочной таблицы). Такие зависимости, полученные по данным наблюдений, могут быть надежными только в том случае, если древостои, где проводились наблюдения, имели одинаковую полноту.

Эмпирические данные, как правило, получены при различной полноте, а переход к какой-либо конкретной полноте, несомненно, будет сопровождаться потерей в точности. Данное обстоятельство создает сложности для использования уравнения вида (1) при анализе эмпирических данных.

Кроме того, применение функции  $P = f(h)$  осложняется еще и тем, что в зависимости от лесорастительных условий меняется абсолютная и удельная величина фитомассы. В частности, на рис. 1 показана тенденция роста отношения фитомассы к средней высоте древостоя ( $P/h$ ) с увеличением его продуктивности для сосняков, ельников и березняков (светлые кружочки – ельник, заштрихованные – сосняк, крестики – березняк). Увеличение продуктивности древостоя на один класс бонитета сопровождается возрастанием средней массы каждой единицы высоты древостоя (1 м) на 1,2–0,7 т/га.

При построении представленных на рис. 1 зависимостей и в дальнейшем классы бонитета заменялись на показатели классов бонитета. Последние представлены арабскими цифрами (обозначения Ia, I, ..., V, Va заменены на 7, 6, ..., 2, 1) [6]. Эта замена принятых произведена для удобства анализа и формализации зависимостей.

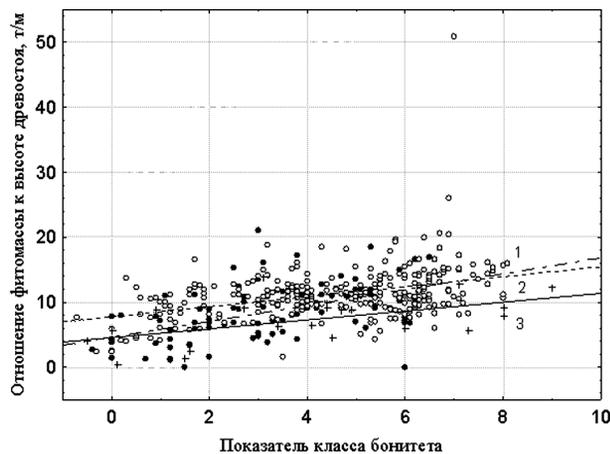


Рис. 1. Зависимость отношения общей фитомассы древостоя к средней высоте древостоя от показателя класса бонитета (1 – сосняк, 2 – ельник, 3 – березняк)

При определении частей деревьев важным обстоятельством является то, что в зависимости от лесорастительных условий могут меняться соотношения между ними. В частности, С. Н. Сеннов указывает на увеличение удельной массы корней при ухудшении почвенных условий [8]. Подобные изменения происходят и с листовым аппаратом. Влияние условий роста на листовую аппарат можно показать следующим образом. Лист является органом, осуществляющим тесное взаимодействие растения с атмосферой. Влияние солнечной энергии на растение осуществляется в большей степени через листовую аппарат. Посредством него происходит ас-

симляция углекислого газа и выделение влаги в атмосферу. Масса листового аппарата связана с объемом необходимых для растения в данное время и в данном месте веществ, в том числе и минеральных, поглощаемых из почвы в виде их водного раствора. Связь удельной транспирации с массой листы можно представить в следующем виде:

$$E_{tr,i} = P_{ii} / C_i = k_{tr} m_1, \quad (2)$$

где  $E_{tr,i}$  – расход воды для осуществления жизнедеятельности и прироста единицы фитомассы;  $P_{ii}$  – количество  $i$ -го минерального вещества, необходимого для жизнедеятельности и построения единицы фитомассы и лимитирующего в данных условиях рост растения;  $C_i$  – концентрация лимитирующего рост растения  $i$ -го минерального вещества в водном растворе, потребляемом растением из почвы;  $k_{tr}$  – коэффициент транспирационной активности;  $m_1$  – количество листы, необходимое для осуществления всех процессов при поддержании жизнедеятельности и построения единицы фитомассы.

Во многих работах ранее было показано, что коэффициент транспирационной активности конкретной породы древостоя, показывающий расход воды единицей массы листового аппарата, не зависит от условий произрастания и является величиной практически постоянной. Можно также предположить, что для построения единицы фитомассы требуется определенное количество минерального вещества, не зависящее от условий произрастания. Конечно, в связи с изменением с возрастом соотношения частей древостоя, в которых для построения используется разное количество тех или иных веществ, меняется и количество минерального вещества, затрачиваемого всем растением на построение единицы фитомассы. Однако для растений, находящихся на одной стадии развития, величину  $P_{ii}$  можно, по-видимому, принимать практически постоянной для различных условий произрастания. В качестве показателя стадии развития может служить возраст, тогда следует считать, что для одновозрастного древостоя конкретной породы величина  $P_{ii}$  остается постоянной независимо от лесорастительных условий. При постоянстве  $P_{ii}$  и  $k_{tr}$  из (2) следует, что уменьшение концентрации лимитирующего рост и развитие растения минерального вещества ( $C_i$ ) должно сопровождаться увеличением удельного расхода растением воды, а следовательно,  $m_1$ . Это подтверждается приведенными на рис. 2 зависимостями, показывающими тенденцию снижения удельной массы хвои практически одновозрастных сосняков (51–66 лет) и ельников (37–40 лет) с улучшением лесорастительных условий.

В данном случае использовались опубликованные данные [1], [2], а полученные зависимости можно представить в следующем виде:

для сосняков  $m/P = 105,3 \exp(-0,26 Kl)$ , (3)

для ельников  $m/P = 170,2 \exp(-0,112 Kl)$ , (4)

где  $m$  – масса хвои в абсолютно сухом виде, кг;  
 $P$  – фитомасса в абсолютно сухом виде, т;  
 $Kl$  – показатель класса бонитета.

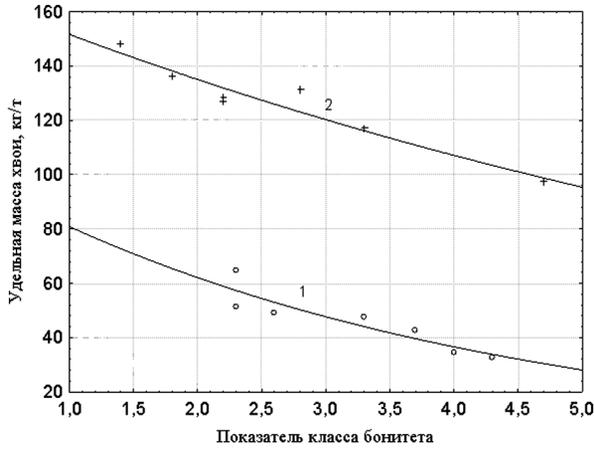


Рис. 2. Зависимость удельной массы хвои сосны (1) и ели (2) от показателя бонитета

На основании приведенных зависимостей можно установить, что в среднем при улучшении условий роста древостоя на один класс бонитета удельная масса хвои уменьшается на 10–15 кг/т. Анализ показывает, что эта величина мало меняется с изменением возраста. Соответствующая полученной абсолютной оценке относительная величина изменения массы хвои с изменением продуктивности древостоя на один класс бонитета составляет 10–30 %.

Тесную связь с окружающей средой растение осуществляет как с помощью листового аппарата, так и через корневую систему. Поскольку водный раствор поглощается из почвы корневой системой, увеличение массы листьев с ухудшением лесорастительных условий предполагает увеличение массы корней. Основываясь на водном балансе растения, можно написать равенство, устанавливающее соотношение между массой корневой системы и массой листьев:

$$E_{irr} = k_{ir} m_1 + R(P) = k_p p_1, \quad (5)$$

где  $k_p$  – коэффициент, характеризующий поглощение единицей массы корневой системы водного раствора из почвы;  $p_1$  – масса корней, необходимых для поглощения водного раствора из почвы при поддержании жизнедеятельности и построении единицы фитомассы;  $R(P)$  – количество влаги, задерживаемой непосредственно в тканях растения.

Нужно отметить, что в тканях растения остается небольшая доля расходуемой растением воды из почвы, поэтому слагаемое  $R(P)$  в правой части (5) можно приравнять к нулю. С учетом этого равенство приобретает следующий вид:

$$k_{ir} / k_p = p_1 / m_1. \quad (6)$$

Среднее за сезон значение коэффициента  $k_p$ , по-видимому, также, как и  $k_{ir}$ , можно принять постоянным. Следовательно, при увеличении массы хвои с ухудшением лесорастительных условий должна синхронно увеличиваться масса корней, как это вытекает из уравнения (6). Данный вывод относится, конечно, к той корневой массе, которая участвует в поглощении почвенного раствора.

На основании равенства (6) можно, по-видимому, сделать вывод о том, что соотношение массы поглощающих водный раствор корней и массы листьев не зависит от плодородия почв и для всех бонитетов должно оставаться практически постоянной величиной.

Учитывая, что сумма масс листьев и корней, в частности, по данным, приведенным в [1], колеблется в пределах 15–30 % от общей фитомассы, можно предполагать, что пренебрежение в расчетных схемах влиянием условий роста не приведет к большим ошибкам при определении всей фитомассы.

#### МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЛИСТЫ И ОБЩЕЙ ФИТОМАССЫ ДРЕВОСТОЯ

К настоящему времени созданы региональные методы расчета массы древесной зелени (листья и недревесневшие веточки), в том числе листья. Один из методов был разработан в Ленинградской лесотехнической академии [14] на основании анализа данных, собранных в Ленинградской области. В [9] приведены формулы для расчета массы хвои, полученные для древостоя, произрастающего в Нижегородской и Костромской областях.

Достаточно удобный для практического использования метод определения количества древесной зелени и листьев (хвои) был разработан в Институте леса КарНЦ под руководством Н. И. Казиминова [7], [10]. Его параметры получены для древостоя, произрастающего в Карелии. По оценкам авторов метода, ошибка определения массы древесной зелени составляет 3–6 %. Выраженная авторами в табличном виде зависимость между удельной массой листьев конкретной породы (масса листьев по отношению к запасу стволовой древесины) и средней высотой древостоя была нами формализована и представлена следующей удобной для практического использования формулой [6]:

$$m = M K c \exp(-d h), \quad (7)$$

где  $m$  – масса листового аппарата в свежем виде, т/га;  $M$  – запас стволовой древесины, м<sup>3</sup>/га;  $h$  – средняя высота древостоя, м;  $K$  – коэффициент, показывающий долю листового аппарата в общем запасе древесной зелени и равный для сосны 0,78, для ели – 0,60, для березы – 0,56;  $c$ ,  $d$  – коэффициенты регрессии, равные соответственно для сосны 0,29, 0,10, для ели – 0,81, 0,099, для березы – 0,30, 0,083.

Была выполнена проверка данного метода с применением биометрических характеристик древостоя, собранных в различных природных зонах [11], [12]. Всего использовались 152 значения для сосняков и 318 для ельников. Относительная ошибка расчета определялась по формуле:

$$\Delta m_{\%} = 100(m_o - m_c) / m_o \quad (8)$$

где  $m_o$  – экспериментальные величины массы хвои, т/га;  $m_c$  – рассчитанные по (7) величины массы листвы, т/га.

Приведенные в таблице результаты оценки свидетельствуют о значительном завышении расчетных значений массы хвои в низкопродуктивных древостоях и занижении – в высокопродуктивных. Полученные результаты можно объяснить увеличением удельной величины общей фитомассы, а следовательно, и удельного запаса стволовой древесины с улучшением лесорастительных условий (рис. 1).

Относительные ошибки расчета массы хвои ( $\Delta m_{\%}$ ) для древостоев различной продуктивности по методу Института леса КарНЦ РАН (1) и по методу авторов (2)

Класс бонитета	Показатель класса бонитета	Относительная ошибка, %			
		Сосна		Ель	
		1	2	1	2
Vб	0	-43	7	-95	-30
Va	1	-41	-24	-47	-6
V	2	-22	-18	-13	8
IV	3	2	-4	9	7
III	4	12	-1	14	2
II	5	17	-11	25	-2
I	6	27	10	35	-6
Ia	7			40	-9

Поскольку величина ошибки связана с продуктивностью древостоя, ее снижения можно добиться введением в расчетную формулу показателя класса бонитета. С учетом этого вывода по опубликованным в [11], [12] данным были получены эмпирические уравнения. Общий вид этих уравнений следующий:

$$m = aM \exp(-(b - c \ln(Kl + 1)) h), \quad (9)$$

где  $m$  – масса листвы (хвои) в абсолютно сухом виде, т/га;  $a$ ,  $b$  и  $c$  – коэффициенты регрессии, равные соответственно для сосняков 0,15, 0,213, 0,063, для ельников 0,165, 0,128, 0,033, для березняков 0,067, 0,14, 0,026.

Результаты проверки уравнений для хвойных пород приведены в таблице. Ошибки расчета вычислялись по формуле (8). Расхождения между рассчитанными по (9) и измеренными данными, приведенными в [11], [12], существенно снизились. Наиболее заметно уточнение расчетов массы листового аппарата для низкопродуктивного древостоя. Все это позволяет рекомендовать уравнение (9) для определения массы листвы (хвои) сосняков, ельников и березняков, произрастающих в различных лесорастительных условиях.

Масса стволовой древесины составляет в большинстве случаев наибольшую часть общей фитомассы (60–70 %), и только в возрасте менее 20 лет ее доля в сосновом и еловом древостое опускается ниже 40 %. При таких условиях общую фитомассу древостоя можно рассматривать как функцию запаса стволовой древесины ( $P = f(M)$ ). Некоторые изменения соотношений частей древостоя из-за смены условий произрастания не могут оказывать заметного влияния на надежность данной функции, как это указано выше и показано на рис. 3 (кружочками обозначен ельник, заштрихованными кружочками – сосняк, крестиками – березняк). Аналитическое выражение представленных на рис. 3 связей для соснового, елового и березового древостоя приведено ниже:

$$P = a + bM, \quad (10)$$

где  $P$  – общая фитомасса древостоя в сухом виде, т/га;  $a$  и  $b$  – коэффициенты регрессии, равные соответственно для сосняков 13,0 и 0,58, для ельников – 30,4 и 0,55, для березняков – 11,2 и 0,68.

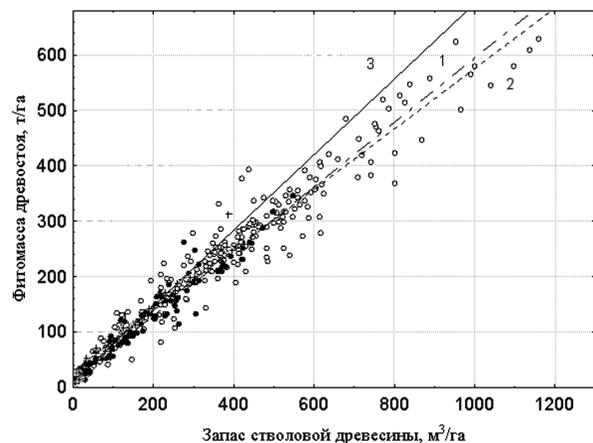


Рис. 3. Зависимость общей фитомассы древостоя от запаса стволовой древесины (1 – сосняк, 2 – ельник, 3 – березняк)

Среднеквадратичное отклонение между рассчитанными по (10) и измеренными в [11], [12] значениями фитомассы для сосняков составляет 18 т/га, для ельников – 32 т/га, для березняков – 14 т/га. По отношению к средним значениям фитомассы каждого ряда конкретной породы эти величины составляют 16, 14 и 14 %.

Для расчета очень важной характеристики биогеоценоза – прироста фитомассы – можно воспользоваться идеями Г. Ф. Хильми об энергетическом обмене между внешней средой и лесом [13]. Основываясь на его представлении об энергопотреблении растительным покровом, можно сделать вывод о том, что отношение прироста фитомассы к ее объему для каждой породы одновозрастного древостоя во всех классах бонитета остается постоянным. Эти отношения зависят только от возраста. Справедливость данного вывода в отношении запаса стволовой древесины и ее прироста показана нами в [4], [5]. Применительно для решения приведенных в данных

работах задач рассматриваемая зависимость хорошо описывалась экспоненциальной функцией. В отношении общей фитомассы справедливостью такой зависимости на примере ельника показана на рис. 4. Достаточно высокий разброс точек на рис. 4 объясняется, по-видимому, в большей степени не столь высокой точностью полевых определений общей фитомассы и ее прироста. Как показывает анализ, продуктивность древостоя не влияет на точность связей. В принятых в статье обозначениях зависимость для общей фитомассы будет выглядеть следующим образом:

$$dP/P = c \exp(-d \tau), \quad (11)$$

где  $dP$  – прирост общей фитомассы в сухом виде, т/(год · га);  $\tau$  – возраст древостоя, лет;  $c$  и  $d$  – коэффициенты, зависящие от породы.

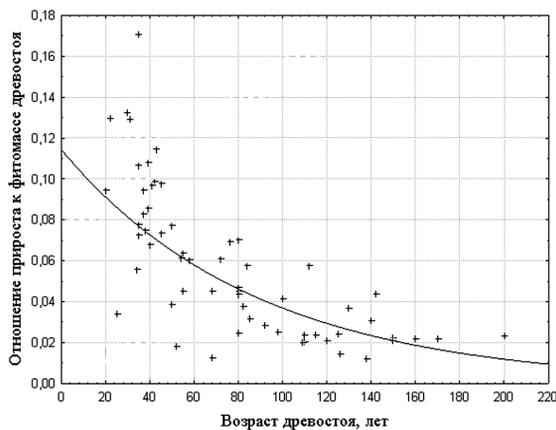


Рис. 4. Зависимость отношения прироста фитомассы древостоя ельника к его общей фитомассе от возраста древостоя

По опубликованным данным были получены значения коэффициентов  $c$  и  $d$ , которые для сосняков, ельников и березняков соответственно составили: 0,096, 0,011; 0,114, 0,011; 0,264, 0,021.

Среднеквадратичное отклонение между рассчитанными по (11) и измеренными значениями

прироста фитомассы для сосняков составляет 2,5 т/(га · год), для ельников – 5,2 т/(га · год), для березняков – 3,0 т/(га · год). При этом измеренные величины прироста фитомассы сосняков изменялись от 1 до 15 т/(га · год), ельников – от 1 до 35 т/(га · год), березняков – от 1 до 15 т/(га · год). Из-за достаточно высоких отклонений полученные с использованием данных параметров результаты расчетов следует принимать в качестве ориентировочных. Наименее обоснованы измеренными данными параметры формулы (11) для березняков.

## ВЫВОДЫ

Изменение продуктивности древостоя сопровождается преобразованием соотношений частей его фитомассы. Удельная масса листового аппарата хвойных пород возрастает на 10–15 кг на каждую тонну общей фитомассы древостоя при ухудшении бонитета на один класс. Синхронно этим преобразованиям изменяется масса корневой системы. При увеличении продуктивности древостоя соответственно возрастает его общая фитомасса. В среднем ее относительная величина (по отношению к средней высоте древостоя) увеличивается на 1,2–0,7 т/га. Учет влияния продуктивности древостоя в методах расчета массы листового аппарата способствует повышению их точности при использовании в различных лесорастительных условиях. Использование простых линейных связей между запасом стволовой древесины и общей фитомассой древостоя дает возможность определять последнюю с точностью, приемлемой для практического применения. Для определения прироста фитомассы древостоя можно использовать экспоненциальные зависимости между отношением прироста фитомассы к ее общей величине от возраста древостоя.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казимиров Н. И., Волков А. Д., Зябченко С. С., Иванчиков А. А., Морозова Р. М. Обмен веществ и энергии в сосновых лесах Европейского Севера. Л.: Наука, 1977. 304 с.
2. Казимиров Н. И., Морозова Р. М. Биологический круговорот веществ в ельниках Карелии. Л.: Наука, 1973. 176 с.
3. Казимиров Н. И., Морозова Р. М., Куликова В. К. Органическая масса и потоки веществ в березняках средней тайги. Л.: Наука, 1978. 216 с.
4. Карпечко Ю. В. Влияние характеристик леса на водность рек Карелии // Вопросы экологии и гидрологические расчеты: Сб. науч. тр. (межведомственный). Вып. 116. СПб.: РГГМИ, 1994. С. 38–42.
5. Карпечко Ю. В. Расчетный метод определения транспирации древостоев // Лесоведение. 2010. № 5. С. 65–71.
6. Карпечко Ю. В., Бондарик Н. Л. Гидрологическая роль лесохозяйственных и лесопромышленных работ в таежной зоне Европейского Севера России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 225 с.
7. Лесотаксационный справочник. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 288 с.
8. Сеннов С. Н. Уход за лесом. Экологические основы. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 128 с.
9. Старцев А. И. Фитомасса чистых и смешанных древостоев сосны обыкновенной в Нижегородской и Костромской областях // Лесоведение. 2007. № 2. С. 51–56.
10. Таблицы для оценки древесного сырья в лесах Карелии. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1978. 26 с.
11. Усольцев В. А. Формирование банков данных о фитомассе лесов. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. 541 с.
12. Усольцев В. А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложение. Екатеринбург, 2007. 637 с.
13. Хильми Г. Ф. Основы физики биосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 299 с.
14. Яновский Л. Н., Моисеев В. С., Ларионова Г. Г. Лесная таксация. Методические указания по учету древесной зелени для студентов специальности 1512. Л.: ЛТА, 1985. 38 с.
15. Monteith J. L. Accommodation between transpiring vegetation and the convective boundary layer // Journal of Hydrology. 1995. № 166. P. 251–263.