

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИСПАРЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ПО ВОЗРАСТУ, УСЛОВИЯМ ПРОИЗРАСТАНИЯ И ПРОДУКТИВНОСТИ ЛЕСАХ

Ю.В. Карпечко¹, С.А. Кондратьев², В.З. Родионов³, М.В. Шмакова²

¹ Институт леса — обособленное подразделение ФГБУН Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, yuкарпечко@yandex.ru

² ФГБУН Институт озераведения РАН, Санкт-Петербург

³ ФГБУН Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург,

Рассмотрены основные факторы формирования испарения в лесах в различных лесорастительных и климатических условиях. С использованием разработанных ранее методов рассчитана возрастная динамика испарения с различных по условиям произрастания и продуктивности участков леса, расположенных в средне- и южнотаежной подзонах. Получено, что в зависимости от лесорастительных условий возраст, в котором наблюдаются максимальные годовые значения суммарного испарения и транспирации, изменяется от 50 до 100 лет.

Ключевые слова: тип леса, фитомасса, класс бонитета, испарение, транспирация, радиационный баланс.

EVAPORATION PATTERNS IN FORESTS OF DIFFERENT AGES, SITE CONDITIONS, AND PRODUCTIVITY LEVELS

Yu. V. Karpechko¹, S. A. Kondratyev², V. Z. Rodionov³, M. V. Shmakova²

¹ Forest Research Institute of the Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk, Russia

² Institute of Limnology of Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

³ Institution of Russian Academy of Sciences Saint-Petersburg Scientific-Research Centre for Ecological Safety RAS, St. Petersburg, Russia

The paper analyzes the factors behind evaporation from a forest: foliage and solar irradiance. The patterns of foliage formation and its changes with age in forests of varying productivity are demonstrated. The limiting factor for stand growth and development in each type of forest is the energy resources available. The average radiation balance of a region being given, the stand productivity depends on the characteristics of the locality, which influence soil fertility and predetermine the forest type. The southwards enhancement of the quality class of a forest type with a rise in the radiation balance is associated with the growing share of foliage and intensification of biochemical processes. The share of foliage mass in the total biomass of the tree stand depends on the forest site conditions, quality class, and energy supply. Previously designed techniques have been applied to calculate age-related patterns of evaporation from forest sites of varying habitat conditions and productivity in middle and southern taiga. As the radiation balance grows, physical evaporation from forest areas increases, and the growing share of foliage in the tree stand's total biomass enlarges transpiration by the stand in every forest type and quality class. Alteration of site conditions entails a change in the age-related pattern of evaporation and transpiration by the stand. Enhancement of site conditions and quality characteristics leads to an increase in evaporation in young and middle-aged forests, however in mature and over-mature forests this trend may be broken. The greatest evaporation and transpiration by the stand are observed at an age when current biomass increment is the highest and the amount

of foliage is at maximum. According to our calculations, the age of maximum annual total evaporation and transpiration varies from 50 to 100 years depending on the forest site conditions.

Keywords: forest type, plant biomass, stand quality class, evaporation, transpiration, radiation balance.

For citation: *Karpechko Yu.V., Kondratyev S.A., Rodionov V.Z., Shmakova M.V.* Evaporation Patterns in Forests of Different Ages, Site, Conditions, and Productivity Levels. *Gidrometeorologiya i Ekologiya. Hydrometeorology and Ecology* (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020. 58: 49—67. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-58-49-67

Введение

Около 50 % территории Европейского Севера России занято лесами. Леса представляют собой сложные природные объекты, различающиеся по многим характеристикам: породному составу, условиям произрастания древостоя, его продуктивности, возрасту и другим. Роль леса в гидрофизических и гидрологических процессах еще слабо исследована, так как он относится к природным объектам, в которых очень трудно проводить экспериментальные гидрологические исследования. Из-за громоздкости древесных растений непосредственно измерить, в частности, испарение с леса существующими методами натурных исследований практически невозможно.

При отсутствии наблюдений часто приходится прибегать к методам математической оценки испарения. Для оценки адекватности результатов таких определений, кроме непосредственных измерений можно использовать тепло- и воднобалансовые исследования. Однако из-за многообразия характеристик леса невозможно в достаточной степени осветить такими исследованиями даже наиболее распространенные типы леса. Тип леса — это участок, представленный однородными лесорастительными условиями, которые характеризуются схожестью почвенных, гидрологических, гидрогеологических свойств и положением в рельефе местности [1]. В связи с этим поставлена задача подробнее исследовать физическую сущность протекающих в лесу процессов, а также их воздействие на процессы формирования испарения и представить выявленные закономерности в виде расчетных методов (математических моделей). Полученные результаты представлены в настоящей статье.

Факторы формирования испарения с леса

Особенности формирования листового аппарата и их учет при оценке испарения с леса

Суммарное испарение с леса тесно связано с жизнедеятельностью всего биогеоценоза. Его основной частью в большинстве случаев является транспирация древостоем. Тесная связь между годовой величиной транспирации древостоем и количеством листвы показана во многих отечественных и зарубежных исследованиях, значительная часть которых обобщена О.И. Крестовским [1]. (Термин «листва» в данной работе обозначает ассимилирующие органы лиственных, а также хвойных

пород.) Наличие этой связи дает основание использовать для расчета осредненной за вегетационный период величины транспирации простую формулу [1—3]:

$$E_t = mK_{tr}, \quad (1)$$

где E_t — транспирация (мм); K_{tr} — коэффициент транспирационной активности (мм/т); m — масса листвы (т/га).

Использование этой формулы возможно при наличии коэффициента транспирационной активности или методов его определения. В настоящее время на основании результатов гидрологических исследований и изучения физиологических характеристик дерева считается возможным принимать постоянными коэффициенты транспирационной активности для конкретных пород древостоя, произрастающего в различных условиях [1—3]. При этом нужно иметь в виду, что возможна некоторая зависимость их значений от метеорологических факторов [2] и от возраста. Для наиболее распространенных в таежной зоне европейской части России видов сосны, ели, березы и осины значения коэффициента рекомендуется принимать равными 19; 8,5; 50 и 45 мм/т соответственно [4]. Эти значения соответствуют массе свежей листвы.

При вычислении испарения с леса за короткие интервалы времени в качестве регулятора интенсивности транспирации принимается устьичная проводимость или обратная ей величина — устьичное сопротивление [5]. При их вычислении по формулам, учитывающим влияние метеорологических факторов, используется максимальная проводимость (минимальное сопротивление) [6, 7]. Вместе с тем по результатам некоторых исследований минимальное устьичное сопротивление, являющееся физиологической характеристикой растений и обобщенным показателем их видовых признаков, зависит от условий произрастания и климатических особенностей данной местности [8].

Большое число значений максимальной проводимости, выбранных из измеренных в умеренной климатической зоне, приведено в работе [9]. Нужно отметить, что при существенных колебаниях значений максимальной проводимости (у сосны от 0,6 до 7,4 мм/с и у ели от 0,5 до 6,9 мм/с) зависимости их от видов как сосны, так и ели не прослеживается. Средние значения максимальной проводимости из приведенных для сосны обыкновенной, ели европейской и березы равны 3,16; 1,34 и 4,3 мм/с соответственно. При сравнении значений коэффициента транспирационной активности и значений максимальной проводимости по породам отмечается некоторое соответствие соотношений их значений для рассматриваемых пород древостоя. Это можно принимать как свидетельство схожести их роли в регулировании транспирации. Вместе с тем значительный разброс значений максимальной устьичной проводимости, а также указанное в литературе влияние на нее условий произрастания, видового разнообразия растений и климатических характеристик предполагают возможность наличия, кроме того, некоторой зависимости коэффициентов транспирационной активности от этих факторов. Данное предположение требует дополнительных исследований.

Листва также регулирует поступление солнечной радиации и атмосферных осадков под полог леса, что влияет на величину физического испарения

с напочвенного покрова и осадков с крон древостоя. Поступающие под кроны солнечная радиация и осадки влияют на наличие, проективное покрытие и видовое разнообразие напочвенной растительности, что определяет транспирацию растений под пологом леса.

Снижение массы листвы вместе с уменьшением полноты древостоя способствует некоторому уменьшению альбедо [10] и лучшему проникновению солнечной радиации под полог леса. Это должно приводить, с одной стороны, к уменьшению транспирации древостоем и величины испарения осадков с полога леса, а с другой стороны — к увеличению транспирации и физического испарения с напочвенного покрова. Некоторая доля поступающей под полог леса солнечной радиации затрачивается на теплообмен со скелетной частью древостоя и турбулентный теплообмен, что в итоге способствует уменьшению суммарного испарения с леса.

Нужно отметить, что, учитывая возможные отклонения истинных значений коэффициента транспирационной активности от указанных выше средних, полученных по формуле (1), результаты, характеризующие возрастную динамику транспирации и влияние на нее условий произрастания, необходимо уточнять. Эти уточнения могут основываться на анализе данных о формирующейся в разных условиях листве, влияющей на транспирацию древостоя и на суммарное испарение в целом. Все это предполагает необходимость изучения особенностей формирования листового аппарата древостоя при исследовании гидрологической роли леса.

Масса листвы связана с общей фитомассой и с интенсивностью ее прироста. При анализе общую фитомассу древостоя и ее прирост можно заменить на тесно связанные с ними запас (объем) стволовой древесины и ее текущий прирост [11]. С увеличением этих характеристик масса листвы возрастает, о чем свидетельствует статистический анализ.

Анализ с использованием множественной линейной регрессии для разновозрастного древостоя, произрастающего в южной Карелии, показывает, что изменение массы листвы средневозрастного елового древостоя с изменением продуктивности определяется на 80 %, а соснового — на 94 % влиянием запаса древесины и его прироста. Данные для анализа взяты из монографий [12, 13].

Связь между листвой и характеристиками древостоя (запасом и его приростом) нарушается при анализе изменчивости листвы с возрастом. Это обусловлено тем, что для древостоя, произрастающего в одинаковых лесорастительных условиях, масса листвы возрастает до определенного возраста и в дальнейшем начинает снижаться. Поскольку до стадии спелости запас древостоя увеличивается, то его роль в изменении массы листвы остается положительной. Следовательно, возрастные изменения количества листвы связаны с динамикой прироста древостоя, который увеличивается до конкретного возраста. Этот возраст зависит от продуктивности лесного участка.

Высокопродуктивные леса характеризуются, как это следует из таблиц хода роста [14], более интенсивным текущим приростом фитомассы в молодом и среднем возрасте, и его наибольшее значение достигается в 50—70 лет. С ухудшением

лесорастительных условий интенсивность прироста древостоя снижается, и его максимум наступает позже. Эта зависимость роста и развития древостоя от условий произрастания отмечается Э.П. Галенко [15], по мнению которой интенсивный прирост древесины в суровых северных условиях наблюдается до 80—120 лет.

В работе [13], где представлены особенности развития карельских сосняков в различных условиях их роста, показано, что в наиболее продуктивном сосняке черничном (II—III классы бонитета) увеличение массы хвои происходит до 50 лет, а в сосняке брусничном (III—IV классы бонитета) такая тенденция отмечается до 80—90 лет. Под бонитетом леса понимается показатель добротности и производительности лесного участка. Класс бонитета является количественной характеристикой продуктивности и скорости роста деревьев и определяется в зависимости от среднего возраста и средней высоты древостоя. Обозначается римскими цифрами. Чаще всего для характеристики древостоя достаточным является интервал от Ia, I до V, Va. Древостой Ia, I, II класса бонитета называют высокобонитетным, III—IV — среднебонитетным, V — низкобонитетным, а меньшие классы относятся к непродуктивным [1].

Снижение прироста в спелых и перестойных древостоях связано с уменьшением листового аппарата. Поскольку этот процесс в высокопродуктивных лесах начинается раньше, то в спелом и перестойном возрасте в этих лесах масса листовой может быть ниже, чем в менее продуктивных. Эти рассуждения подтверждаются исследованиями, результаты которых приведены в работе [13], где отмечено, что абсолютная масса хвои до 100 лет больше в наиболее продуктивном сосняке черничном, а после 100 лет — в сосняке брусничном.

Основываясь на описанной выше возрастной динамике листовой, следует заключить, что в молодом и среднем возрасте транспирация древостоем должна возрастать, а в спелых и перестойных лесах возможно ее снижение при улучшении бонитета.

Роль энергетического фактора в формировании листового аппарата, продуктивности фитомассы и транспирации

Рост и развитие древостоя, а следовательно, транспирация и испарение обуславливаются энергетическими ресурсами, наличием влаги, а также факторами, определяющими тип леса: геологическим строением местности, рельефом, гидрогеологическими характеристиками и почвенным плодородием. Зависимость продуктивности древостоя от типа леса и энергетического фактора (радиационного баланса) представлена на рис. 1.

Этот рисунок был построен с использованием информации о продуктивности ельников в пределах лесной зоны европейской части России, приведенной в работе [16]. Значения радиационного баланса для конкретного региона за год взяты из работы [17]. Кривые на рисунке проведены с учетом точек, соответствующих осредненному показателю класса бонитета конкретного типа леса конкретной территории, характеризующейся определяющим функционирование ландшафтов радиационным балансом. В работе для удобства выполнения анализов вместо

традиционного класса бонитета применяется показатель класса бонитета. Принятые обозначения Ia, I, ... V, Va заменены арабскими цифрами 7, 6, ..., 2, 1 [18]. Нужно иметь в виду, что значения радиационного баланса, полученные для метеостанций, используются в данном случае для характеристики энергетических ресурсов территории, и они могут отличаться от значений для конкретных лесных участков [10].

Тесные связи между радиационным балансом и показателем класса бонитета свидетельствуют о том, что продуктивность древостоя каждого типа леса в лесной зоне лимитируется энергетическим фактором (см. рис. 1). Это подтверждается и другими исследователями, использующими в качестве характеристики энергетического фактора температуру воздуха [19, 20].

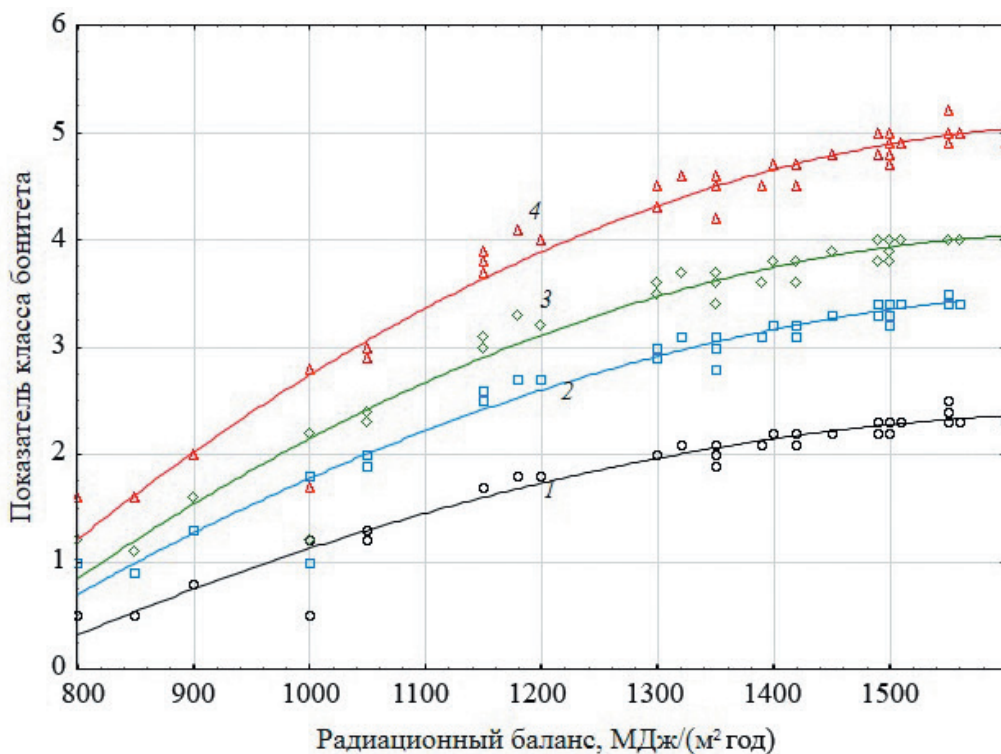


Рис. 1. Связь между продуктивностью елового древостоя, типом леса и энергетическими ресурсами территории.

1 — ельник сфагновый, 2 — ельник долгомошный, 3 — ельник брусничный, 4 — ельник черничный.

Fig. 1. The relationship between the productivity of spruce stands, forest type and energy resources of the territory.

1 — sphagnum spruce forest, 2 — polytrichum spruce forest, 3 — lingonberry spruce forest, 4 — bilberry spruce forest.

Лимитирующая роль энергетического фактора в процессах, определяющих рост и развитие древостоя в лесной зоне, обусловлена особенностями ее климатических условий, одним из показателей которых является радиационный индекс сухости (отношение радиационного баланса к затратам энергии, необходимой для испарения осадков) [21]. В настоящей работе показано, что для регионов, занятых преимущественно лесами, радиационный индекс сухости изменяется от 0,3 до 1,0, что свидетельствует о достаточном увлажнении территории.

Влияние энергетического фактора и лесорастительных условий на массу листвы и транспирацию можно выяснить из следующих рассуждений. Одной из основных физиологических функций транспирации является перемещение по растению потребляемого из почвы водного раствора минеральных веществ. При этом количество влаги, необходимой для прироста единицы фитомассы, оценивается по очевидному равенству [11]

$$E_{i1} = P_{i1} / C_i, \quad (2)$$

где P_{i1} — количество i -го минерального элемента, необходимого для построения единицы фитомассы и лимитирующего в данных условиях ее рост; C_i — концентрация i -го минерального элемента в водном растворе, потребляемом растением из почвы.

С некоторым допущением можно принять, что количество элемента, необходимого для построения единицы фитомассы конкретной породы и лимитирующего ее рост и развитие, остается постоянным для любых условий. В этом случае из уравнения (2) следует, что с уменьшением концентрации питательных веществ в потребляемом растениями почвенном растворе, что соответствует ухудшению бонитета [11], должны возрастать затраты воды на прирост единицы фитомассы, и, соответственно, затраты энергии на удельную транспирацию.

Формулу (1) также можно использовать для оценки количества воды, необходимого для прироста единицы фитомассы. При этом удельная транспирация определяется как произведение удельной массы листвы на коэффициент транспирационной активности.

Основываясь на измененном равенстве (1) и равенстве (2), можно сделать вывод о том, что удельная масса листвы увеличивается со снижением концентрации питательных веществ в потребляемой растением из почвы воде. Этот вывод подтверждается зависимостями между удельной массой листвы (отношением массы листвы к приросту фитомассы) средневозрастного древостоя и показателем класса бонитета (рис. 2). Зависимости построены по данным, приведенным в работах [12, 13, 22]. Вместе с тем из этих же работ следует, что в зависимости от породы масса листвы в сухом виде возрастает на 0,3 — 1,0 т/га, а прирост на 1,2 — 1,8 т/га соответствует повышению продуктивности древостоя на один класс бонитета.

Нужно отметить, что в конкретном регионе при определенных энергетических ресурсах класс бонитета характеризует также и тип леса. Следовательно, для конкретной территории с ухудшением бонитета и лесорастительных условий возрастают энерго- и водопотребление при приросте единицы фитомассы.

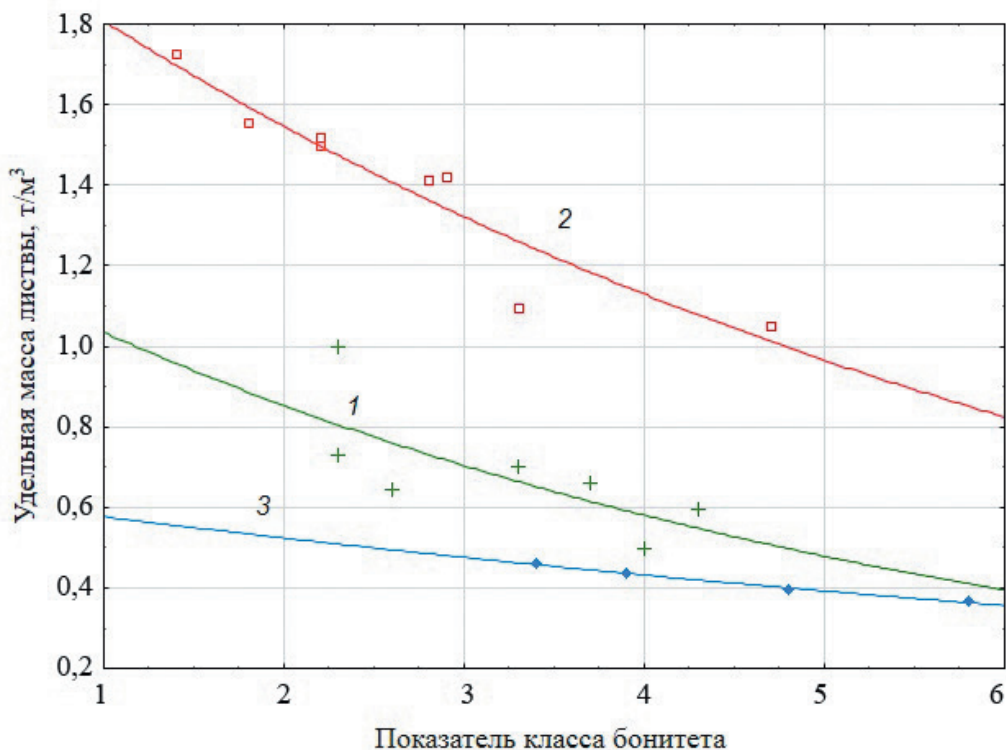


Рис. 2. Зависимость удельной массы листвы от продуктивности древостоя.

1 — сосняк, 2 — ельник, 3 — березняк.

Fig. 2. The dependence of the specific mass of foliage on the productivity of the stand.

1 — pine forest, 2 — spruce forest, 3 — birch forest.

Дополнительное потребление энергии и воды при ограниченных их ресурсах приводит к снижению общей фитомассы древостоя. При этом соответственно должна уменьшаться суммарная транспирация древостоем лесного участка.

С увеличением поступающей энергии при перемещении с севера на юг возрастают возможности увеличения водопотребления и поглощения питательных веществ из почвы, что способствует росту продуктивности древостоя.

Средний класс бонитета ельника черничного на территории, где радиационный баланс составляет $900 \text{ Мдж}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ (северная подзона тайги, Мурманская область) равен V.0 (показатель класса бонитета 2,0). Ельник сфагновый достигает такого класса бонитета в южной подзоне тайги при радиационном балансе $1300 \text{ Мдж}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ (Ленинградская область), где средний класс бонитета ельника черничного составляет II.7 (показатель класса бонитета 4,3) (см. рис. 1).

Возрастание водопотребления и поступления в связи с этим минеральных веществ при продвижении с севера на юг возможно, согласно формуле (1), только

при увеличении коэффициента транспирационной активности или при его постоянстве с увеличением массы листвы.

На основании результатов работы [23], свидетельствующих об увеличении индекса листовой поверхности (массы листвы) при продвижении с севера на юг примерно до южной границы таежной зоны (54—58° с.ш.), можно с некоторой вероятностью сделать вывод о доминирующем влиянии листового аппарата на продуктивность древостоя с увеличением радиационного баланса. Это дает основание принимать для конкретной породы постоянное значение коэффициента транспирационной активности, что соответствует результатам ряда исследований [1—3].

Все вышеизложенное показывает, что к факторам, определяющим массу листвы, относятся запас древесины, его прирост, а также класс бонитета, тип леса и радиационный баланс.

Расчеты испарения с лесных участков Северо-Запада России

Влияние типа леса и класса бонитета на испарение исследовалось по данным, характеризующим леса средней (южная Карелия) и южной (Ленинградская область) подзон тайги. Эти данные приведены в работах [4, 14]. При этом необходимо отметить, что использованная в настоящей работе некоторая дополнительная информация о таксационных характеристиках лесов Ленинградской области ранее была любезно предоставлена авторам А.А. Книзе и О.И. Крестовским. Все эти данные использовались при расчетах годовых значений испарения с лесных участков.

При расчетах принимались осредненные для рассматриваемых регионов метеорологические характеристики [24]. Для южно- и среднетаежной подзон годовая испаряемость принималась равной 500 и 450 мм соответственно, а годовые осадки с учетом всех поправок — 724 и 657 мм.

Суммарное испарение с леса за год определялось как сумма транспирации древостоем (E_t), испарения задержанных пологом леса осадков (E_i) и испарения с напочвенного покрова (E_s), включающего транспирацию растительности и физическое испарение [1]:

$$E = E_t + E_i + E_s. \quad (3)$$

Транспирация за год определялась по приведенной выше формуле (1), а годовое значение испарения осадков с полога леса рассчитывалась по уравнению [18]

$$E_i = E_{il} + E_{iws} + E_{ia}, \quad (4)$$

где E_{il} — испарение осадков с крон древостоя в теплый период (мм); E_{iws} — испарение снега с полога леса (мм); E_{ia} — испарение осадков (мм) с полога леса в переходный период, когда равновероятно выпадение жидких и твердых осадков.

Для расчета испарения осадков с крон за теплый период применялась формула [18]

$$E_{il} = k_{Ei} P_{il} \ln(m + 1), \quad (5)$$

где P_{il} — количество жидких осадков за расчетный период (мм); k_{Ei} — коэффициент, равный для сосняка, ельника и березняка 0,105; 0,100 и 0,108 соответственно.

Для зимнего периода, когда снег лежит на кронах, испарение с полога хвойного древостоя вычислялось по формуле [18]

$$E_{iws} = 0,065dLAI n, \quad (6)$$

где d — дефицит влажности воздуха (гПа/сут); LAI — индекс листовой поверхности, представляющий собой отношение площади листовой поверхности к площади проекций крон древостоя и изменяющийся для различных лесных участков в среднем от 2 до 6 га/га; n — продолжительность расчетного периода (число суток).

Испарение с полога лиственного древостоя в период с отрицательной температурой, а также в переходный период при отсутствии листвы принималось равным 1 % количества осадков [1]:

$$E_{iws} + E_{ia} = 0,01C_M (P_{iws} + P_{ia}), \quad (7)$$

где P_{iws} и P_{ia} — количество осадков (мм) за период с отрицательной температурой и за переходный период соответственно; C_M — доля лиственных пород от общего запаса древостоя, указанная в таксационных описаниях.

Для переходных периодов испарение с хвойного леса рассчитывалось по формуле, предложенной О.И. Крестовским [1]:

$$E_{ia} = amP_{ia}, \quad (8)$$

где a — коэффициент, равный 0,01.

Испарение с напочвенного покрова вычислялось по формуле [18]

$$E_s = 0,8E_0 \exp(-0,3LAI), \quad (9)$$

где E_0 — испаряемость (мм), рассчитанная по методу Будыко — Зубенок [25].

Масса листвы рассчитывалась по предложенной в работе [26] эмпирической формуле, в которой учитывается продуктивность древостоя и косвенно тип леса, необходимость чего отмечается выше:

$$m = \frac{aM}{k_d} \exp[-h(b - c \ln(Kl + 1))], \quad (10)$$

где m — масса листвы в свежем виде (т/га); Kl — показатель класса бонитета; h — средняя высота древостоя (м); k_d — коэффициент, показывающий долю сухого вещества в листве свежесрубленного дерева; 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.

Значение коэффициента k_d для листвы рекомендуется принимать равным 0,48 для сосны, 0,46 для ели, 0,43 для березы [27].

Листовой индекс определялся по соотношению [18]

$$LAI = k_l m, \quad (11)$$

где k_l — переходный коэффициент, равный для сосны — 0,35; для ели — 0,28 и для березы — 0,62.

Из-за отсутствия значений коэффициентов для осины при расчетах по формулам (5), (10) и (11) они принимались равными их значениям для березы. При небольшой доле осины в лесах возможные неравенства соответствующих коэффициентов не приводят к большим погрешностям конечных результатов.

Следует отметить, что приведенные эмпирические формулы для определения составных частей суммарного испарения с леса разработаны с использованием опубликованных данных, полученных разными исследователями и различными методами. В работе [18] приведена оценка рассмотренного здесь метода расчета испарения (3), выполненная для 30 лесных водосборов Карелии. При сравнении осредненных значений годового испарения, вычисленных по формуле (3) и по уравнению водного баланса, получено, что отклонение составляет 1 %. В то же время расхождение максимальных из полученных этими методами значений составляет 26 %, а минимальных — 36 %. Такие расхождения могут быть объяснены точностью расчета по уравнению водного баланса и влиянием лесорастительных условий на точность расчета по методу (3).

Достаточно приемлемая точность осредненных для разных условий значений транспирации подтверждается сравнением результатов расчета по формуле (1) и полученных суммированием суточных значений по методу Пенмана — Монтейса, широко применяемому во многих странах мира. Выполненный для пяти лет анализ по трем карельским речным водосборам свидетельствует о том, что расхождение результатов расчета по двум методам не превышает 10 % [18].

Подтверждением точности расчетов испарения может служить выполненный выше анализ изменчивости листового аппарата, во многом определяющего величину испарения.

В табл. 1 представлены результаты расчетов суммарного испарения и транспирации, осредненные за 140-летний период роста сосняков и ельников и за 100-летний период роста березняков. Расчеты выполнялись по приведенным выше формулам для возраста, кратного 10, для всех типов леса.

Представленные в табл. 1 для каждого типа леса класс бонитета и полнота древостоя являются осредненными для всего возрастного ряда. Отмечается некоторое снижение полноты древостоя с ухудшением бонитета и лесорастительных условий, что сопровождается снижением транспирации древесной растительностью.

Участки леса, для которых выполнялись расчеты испарения, представлены смешанным по породному составу древостоем, и, следовательно, влагооборот исследуемых участков определяется влиянием на этот процесс всех произрастающих там пород. Практически на каждом лесном участке произрастают сосна, ель, береза и осина при преобладании породы, обозначающей тип леса.

Для оценки по изложенным выше методам испарения с разных типов чистых по составу карельских лесов среднетаежной подзоны использовались таблицы хода роста древостоя [14]. Модельные ряды возрастной динамики роста древостоя имеют полноту, равную единице, что исключает влияние этой характеристики на испарение с лесных участков.

Таблица 1

Осредненные за период роста древостоя значения испарения различных типов леса и транспирации древесной растительностью (Ленинградская область, южная подзона тайги)

Averaged values of evaporation of various forest types and transpiration by woody vegetation over the period of growth of the forest stand (Leningrad region, southern taiga subzone)

Характеристика	Типы сосновых лесов						
	скис	счер	сдчер	ссфч	слиш	сбаг	ссф
Бонитет	I	II	III	IV	IV	V	Va
Полнота	0,72	0,7	0,66	0,64	0,57	0,56	0,52
Испарение, мм	555	541	506	477	434	436	418
Транспирация, мм	229	213	178	146	122	115	83
Транспирация, %	41	39	35	31	28	26	20
Характеристика	Типы еловых лесов						
	екис	ечер	ечер	ечер	ечер	есфч.	етсбт
Бонитет	I	II	II	III	III	IV	V
Полнота	0,70	0,70	0,72	0,69	0,71	0,68	0,61
Испарение, мм	516	498	509	484	495	465	448
Транспирация, мм	220	194	205	175	189	155	134
Транспирация, %	43	39	40	36	38	33	30
Характеристика	Типы березовых лесов						
	бкис	бчер	бтк	бчер	бдч	бтбт	бтсф
Бонитет	I	II	II	III	III	III	IV
Полнота	0,74	0,74	0,70	0,72	0,72	0,69	0,63
Испарение, мм	516	518	505	494	494	488	470
Транспирация, мм	208	205	198	174	176	177	153
Транспирация, %	40	40	39	35	36	36	33

Примечание. скис — сосняк кисличный, счер — сосняк черничный, сдчер — сосняк долгомошно-черничный, ссфч — сосняк сфагново-черничный, слиш — сосняк лишайниковый, сбаг — сосняк багульниковый, ссф — сосняк сфагновый; екис — ельник кисличный, ечер — ельник черничный, есфч — ельник сфагново-черничный, етсбт — травяно-сфагновый и болотно-травяной; бкис — березняк кисличный, бчер — березняк черничный, бтк — березняк таволго-кисличный, бдч — березняк долгомошно-черничный, бтбт — березняк таволговый и болотно-травяной, бтсф — березняк травяно-сфагновый.

В табл. 2 приведены осредненные за 160-летние периоды роста хвойного древостоя и 100-летние периоды роста березняка значения суммарного испарения и транспирации древесной растительностью для восьми типов соснового леса, семи типов елового и шести типов березового. Расчеты выполнялись через 10-летние интервалы роста. Классы бонитетов каждого из типов леса являются осредненными по всему возрастному ряду.

Суммарное испарение с карельских лесов несколько меньше, чем с лесных участков южнотаежной подзоны, при близких классах бонитетов (см. табл. 1 и 2). Это объясняется в первую очередь различиями климатических условий.

Таблица 2

Осредненные за период роста древостоя значения испарения различных типов леса и транспирации древесной растительностью (Карелия, средняя подзона тайги)

Averaged values of evaporation of various forest types and transpiration by woody vegetation over the period of growth of the forest stand (Karelia, the average taiga subzone)

Характеристика	Типы сосновых лесов							
	счк	счсв	сбр	сдол	свер	сбаг	соссф	ссф
Бонитет	II.5	III.1	III.7	IV.3	IV.4	IV.8	V.3	V.7
Испарение, мм	452	445	434	420	421	409	403	395
Транспирация, мм	224	213	196	175	175	155	142	124
Транспирация (0,7), мм	157	149	137	122	122	108	99	87
Транспирация, %	50	48	45	42	42	38	35	31
Характеристика	Типы еловых лесов							
	екис	ечерсв	ебр	ечервл	ебтр	едол	ехвсф	
Бонитет	II.8	III.6	IV.1	IV.3	IV.5	V.0	V.7	
Испарение, мм	429	408	395	390	384	376	361	
Транспирация, мм	202	178	163	156	147	141	114	
Транспирация (0,7), мм	141	125	114	109	103	99	80	
Транспирация, %	47	44	41	40	38	38	32	
Характеристика	Типы березовых лесов							
	бзлр	брч	бзлбр	ббтр	босдол	боссф		
Бонитет	I.8	II.7	III.4	III.8	IV.2	V.0		
Испарение, мм	477	468	458	458	446	433		
Транспирация, мм	274	259	241	240	219	193		
Транспирация (0,7), мм	192	181	169	168	153	135		
Транспирация, %	57	55	53	52	49	45		

Примечания: 1. Курсивом выделены значения транспирации, рассчитанные для полноты древостоя, равной 0,7. 2. счк — сосняк чернично-кисличный, счсв — сосняк черничный свежий, сбр — сосняк брусничный, сдол — сосняк долгомошный, свер — сосняк вересковый, сбаг — сосняк багульниковый, соссф — сосняк осоково-сфагновый, ссф — сосняк сфагновый; екис — ельник кисличный, ечерсв — ельник черничный свежий, ебр — ельник брусничный, ечервл — ельник черничный влажный, ебтр — ельник болотно-травяной, едол — ельник долгомошный, ехвсф — ельник хвощево-сфагновый; бзлр — березняк злаково-разнотравный, брч — березняк разнотравно-черничный, бзлбр — березняк злаково-брусничный, ббтр — березняк болотно-травяной, босдол — березняк осоково-долгомошный, боссф — березняк осоково-сфагновый.

Полученные результаты расчетов (см. табл. 1 и 2) свидетельствуют об увеличении суммарного испарения и транспирации древесных растений с улучшением условий роста леса и повышением продуктивности древостоя. Это соответствует сделанным выше выводам о влиянии этих факторов на массу листвы. Данный вывод подтверждает аналогичную тенденцию, отмеченную в выполненных ранее исследованиях [1, 18].

По результатам расчетов получено, что для лесных участков равной продуктивности, расположенных в южнотаежной подзоне, влияние породного состава на испарение и долю транспирации в испарении практически не прослеживается.

Такие результаты можно объяснить присутствием на участке разных пород, нивелирующих роль каждой из них в водопотреблении леса, а также точностью расчетов. Кроме того, можно предположить, что такое явление закономерно, так как каждый биогеоценоз стремится более эффективно использовать пространство и энергетические ресурсы. Это достигается, в частности, и за счет того, что при наличии пространственной неоднородности [28] размещение различных пород древостоя соответствует их требованиям к плодородию почв и к энергопотреблению, связанному с транспирацией.

Для модельных лесных участков средней подзоны тайги результаты расчетов свидетельствуют о том, что наибольшим испарением характеризуются березовые леса, а наименьшим — еловые. При этом различия в испарении уменьшаются с улучшением бонитета. В среднем расхождение в испарении между ельниками и березняками составляет около 11 %.

Выполненный ранее анализ исследований влияния пород древостоя на испарение [18] показывает, что многие авторы не обнаруживают наличия такой зависимости. Учитывая, что полученные нами результаты зависят от адекватности используемых таблиц хода роста природным условиям и расчетного метода следует признать необходимость продолжения данных исследований.

Транспирация древостоем для конкретных условий в большой степени зависит от его полноты и от климатических условий. Увеличением солнечной радиации, способствующей возрастанию доли листвы в фитомассе древостоя, можно объяснить заметное превышение значений транспирации, представленных в табл. 1, рассчитанных для полноты 0,7 значений из табл. 2. Такая полнота принята при сравнении из-за того, что эта величина близка к средней для участков, представленных в табл. 1.

Проявление лесорастительных условий в возрастной динамике испарения иллюстрируется для десяти основных типов сосновых лесов Карелии (рис. 3). При этом осредненные за период роста значения испарения для восьми из этих десяти типов сосновых лесов приведены в табл. 2. Наибольшее значение испарения за период роста от 20 до 160 лет отмечается в сосняке чернично-кисличном в 50 лет (класс бонитета II.5). При этом амплитуда возрастного изменения испарения составила около 80 мм. В сосняке сфагновом (класс бонитета V.7), характеризуемом достаточно низкими значениями испарения, максимум испарения наблюдается в 80—100-летних насаждениях, причем возрастные изменения испарения, как следует из результатов расчетов, не превышают 20 мм.

Нужно отметить, что на качественном уровне возрастная динамика испарения всех пород, произрастающих в различных лесорастительных условиях в Карелии и Ленинградской области, соответствует представленной на рис. 3. Различаются только количественные показатели, о чем можно судить по приведенным в таблицах данным.

Все вышеизложенное свидетельствует о том, что при оценке гидрологической роли лесов на водосборах с помощью различных моделей необходимо учитывать как климатические характеристики местности, так и лесорастительные условия.

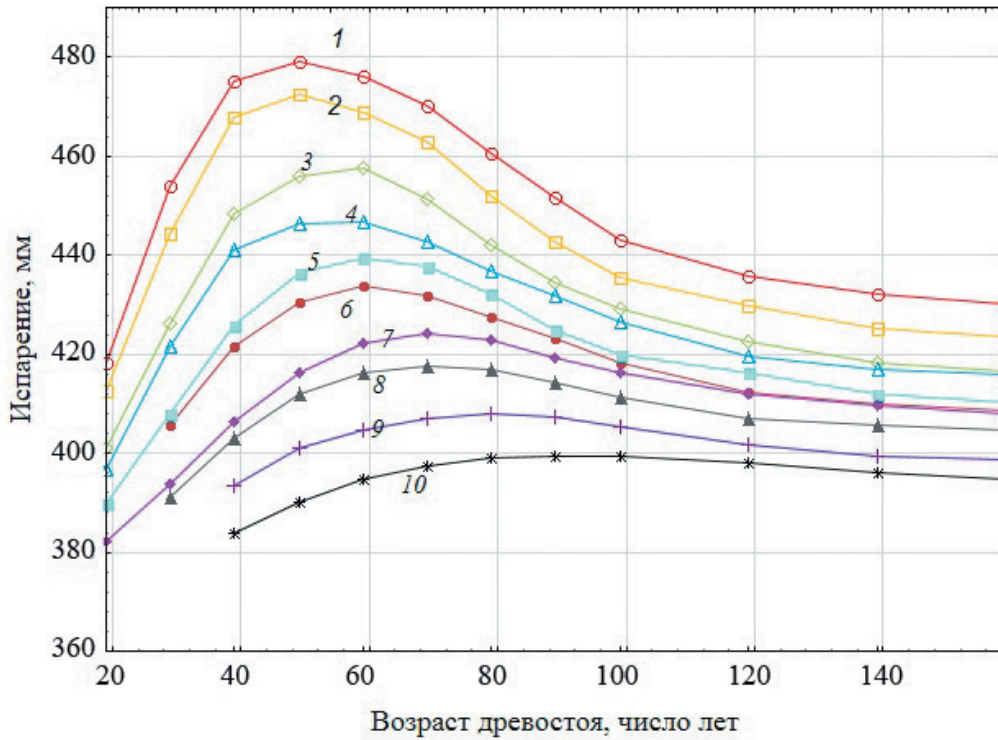


Рис. 3. Возрастные изменения испарения с разных типов сосновых лесов среднетаежной подзоны (Карелия).

1 — сосняк чернично-кисличный, 2 — сосняк черничный свежий, 3 — сосняк брусничный, 4 — сосняк черничный влажный, 5 — сосняк долгомошный, 6 — сосняк вересковый, 7 — сосняк лишайниковый, 8 — сосняк багульниковый, 9 — сосняк осоково-сфагновый, 10 — сосняк сфагновый.

Fig. 3. Age-related evaporation changes in some types of pine forests in the middle taiga subzone (Karelia).

1 — bilberry-oxalis pine forest, 2 — bilberry pine forest, 3 — lingonberry pine forest, 4 — moist bilberry pine forest, 5 — polytrichum pine forest, 6 — calluna pine forest, 7 — lichen pine forest, 8 — ledum pine forest, 9 — sedge-sphagnum pine forest, 10 — sphagnum pine forest.

Закключение

Суммарное испарение с леса и его возрастная динамика определяются особенностями формирования листового аппарата различной продуктивности, произрастающего в различных лесорастительных условиях древостоя. Эти особенности в большой степени обусловлены наличием элементов питания в лесной почве и энергозатратами на поглощение их из почвы и перемещение к органам растения. Данными факторами определяется доля количества листвы в фитомассе древостоя.

С ухудшением лесорастительных условий и бонитета лесного участка испарение и транспирация древостоем во всех возрастных категориях, как правило, снижаются. В среднем за период роста древостоя снижение продуктивности леса на один класс бонитета сопровождается уменьшением испарения на 20—25 мм. Отклонения от этой тенденции могут наблюдаться в спелых и перестойных лесах. Возраст древостоя, в котором наблюдаются максимальные испарение и транспирация, увеличивается с ухудшением лесорастительных условий и бонитета, что соответствует возрастным режимам массы листвы и текущего прироста.

Наибольшие испарение и транспирация древостоем наблюдаются в возрасте, характеризуемом самым высоким приростом фитомассы древостоя и максимальным количеством листвы. В соответствии с результатами расчетов возраст, в котором наблюдается максимальные годовые значения суммарного испарения и транспирации, изменяется от 50 до 100 лет в зависимости от лесорастительных условий.

Динамика испарения с леса на различных этапах его развития является исходной информацией для моделирования гидрологического режима лесных водосборов, стока с них и выноса химических веществ, а также для оценки влияния антропогенной деятельности на сток малых рек и определения экологического ущерба, уже причиненного лесохозяйственной деятельностью [29—31].

Благодарности

Работа выполнена при финансовом обеспечении за счет средств федерального бюджета в рамках проекта FP7 ERA — Net Sumforest-POLYFORES (идентификатор проекта RFMEFI61618X0101), средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт леса КарНЦ РАН), а также темы № 0154-2019-0001 «Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов».

Список литературы

1. *Крестовский О.И.* Влияние вырубок и восстановления лесов на водность рек. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 118 с.
2. *Кайбияйнен Л.К.* Сбалансированность системы водного транспорта у сосны обыкновенной. IV. Общие характеристики водного режима в разных экологических условиях // *Лесоведение*. 1986. № 4. С. 70—75.
3. *Федоров С.Ф.* Определение транспирации еловыми насаждениями по коэффициенту транспирационной активности // *Труды ГГИ*. 1981. Вып. 279. С. 32—34.
4. *Книзе А.А., Крестовский О.И.* Определение влияния структуры лесного фонда на водность рек. Методические рекомендации. СПб: изд-во СПбНИИЛХ, 1993. 74 с.
5. *Monteith J.L.* Evaporation and environment. Symposium No. 19 of the Society for Experimental Biology. New York. Academic Press, 1965. V. 19. P. 205—234.
6. *Jarvis P.G.* The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1976. V. 273. No. 927. P. 593—610.
7. *Lexer M.J.* Anwendung eines «big leaf»-Modelles zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes in Fichtenbeständen // *Centralblatt für das gesamte Forstwesen*. 1995. V. 112. No. 4. S. 209—225.

8. Старцева З.П. Использование модели влагопереноса для оценки суммарного испарения в ельниках Валдая // Лесоведение. 2000. № 5. С. 53—58.
9. Breuer L., Eckhardt K., Frede G.-F. Plant parameter values for models in temperate climates // Ecological Modelling. 2003. No. 169. P. 237—293. doi.org/10.1016/S0304-3800(03)00274-6.
10. Раунер Ю.Л. Тепловой баланс растительного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 210 с.
11. Карпечко Ю.В., Мясникова Н.А. Особенности формирования листового аппарата и транспирации хвойного древостоя // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия «Естественные и технические науки». 2014. № 4 (141). С. 78—84.
12. Казимиров Н.И., Морозова Р.М. Биологический круговорот веществ в ельниках Карелии. Л.: Наука, 1973. 176 с.
13. 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.
14. Лесотаксационные таблицы / Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1976. 33 с.
15. Галенко Э.П. Фитоклимат и энергетические факторы продуктивности хвойного леса Европейского Севера. Л.: Наука, 1983. 128 с.
16. Производительность еловых насаждений по типам леса (экологические нормативы). Научные рекомендации. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1991. 44 с.
17. Атлас СССР. М.: Главное управление геодезии и картографии, 1985. 260 с.
18. Карпечко Ю.В., Бондарик Н.Л. Гидрологическая роль лесохозяйственных и лесопромышленных работ в таежной зоне Европейского Севера России. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. 225 с.
19. Молчанов А.А. Дендроклиматические основы прогнозов погоды. М.: Наука, 1976. 168 с.
20. Moren A.-S., Pertti K.L. Regional temperature and radiation indices and their adjustment to horizontal and inclined forest land // Studia Forestalia Suecica. Uppsala. Swedish University of Agricultural Sciences. 1994. No. 194. P. 19.
21. Бudyko М.И. Климат и жизнь. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 472 с.
22. Казимиров Н.И., Морозова Р.М., Куликова В.К. Органическая масса и потоки веществ в березняках средней тайги. Л.: Наука, 1978. 216 с.
23. Цельникер Ю.Л., Малкина И.С., Завельская Н.А. Географические аспекты фотосинтеза у лесных деревьев России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. СПб: Гидрометеиздат. Т. XVIII. 2002. С. 81—108.
24. Водные ресурсы Нечерноземной зоны РСФСР. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 214 с.
25. Рекомендации по расчету испарения с поверхности суши. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 96 с.
26. Карпечко Ю.В., Мясникова Н.А. Расчет фитомассы древостоя // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия «Естественные и технические науки». 2012. № 4 (125). С. 77—81.
27. Лесотаксационный справочник. М.: Лесная промышленность, 1980. 288 с.
28. Лукина Н.В., Орлова М.А., Исаева Л.Г. Плодородие лесных почв как основа взаимосвязи почва-растительность // Лесоведение. 2010. № 5. С. 45—56.
29. Кондратьев С.А., Карпечко Ю.В., Шмакова М.В., Расулова А.М., Родионов В.З. Опыт экспериментальных исследований и математического моделирования воздействий вырубки леса и последующего лесовосстановления на сток и вынос химических веществ с лесных водосборов // Региональная экология. 2019. № 1 (55). С. 25—53. DOI:10.30694/1026-5600-2019-1-25-53.
30. Родионов В.З., Дрегуло А.М., Кудрявцев А.В. Влияние антропогенной деятельности на экологическое состояние рек Ленинградской области // Вода и экология: проблемы и решения. 2019. № 4 (80). С. 96—108. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.4.96—108.
31. Биненко В.И., Иванов Р.В., Родионов В.З. Мониторинг рек, озер, суши на основе использования беспилотных летательных аппаратов // Ученые записки РГГМУ. 2014. № 34. С. 106—114.

References

1. Krestovskiy O. I. Vliyaniye vyrubok i vosstanovleniya lesov na vodnost' rek. Impact of deforestation and forest restoration on river water. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986: 117 p. [In Russian].

2. *Kaibiyainen L.K.* The balance of the water transport system in the pine. IV. General characteristics of water regime in different ecological conditions. *Lesovedenie*. Forest Science, 1986, 4: 70—75. [In Russian].
3. *Fedorov S.F.* Determination of transpiration by spruce plantations by transpiration activity coefficient. *Trudy gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta*. Transactions of the State Hydrological Institute, 1981, 279: 32—34. [In Russian].
4. *Knize A.A., Krestovskii O.I.* *Opreделение vliyaniya struktury lesnogo fonda na vodnost' rek*. Determination of the influence of the forest Fund structure on the water content of rivers. *Metodicheskie rekomendatsii* Methodical recommendation. Saint-Petersburg: St. Petersburg Research Institute of Forestry Publ., 1993: 74 p. [In Russian].
5. *Monteith J.L.* Evaporation and environment. Symposium no. 19 of the Society for experimental Biology. New York. Academic Press. 1965, 19: 205—234.
6. *Jarvis P.G.* The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1976, 273 (927): 593—610.
7. *Lexer M.J.* Anwendung eines «big leaf»-Modelles zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes in Fichtenbeständen. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen*. 1995, 4 (112): 209—225.
8. *Startseva Z.P.* The use of moisture transport models for estimation of evapotranspiration in the spruce forests of Valdai. *Lesovedenie*. Forest Science. 2000, 5: 53—58. [In Russian].
9. *Breuer L., Eckhardt K., Frede G.-F.* Plant parameter values for models in temperate climates. *Ecological Modelling*. 2003, 169: 237—293.
10. *Rauner Yu.L.* *Teplovoi balans rastitel'nogo pokrova*. Thermal balance of vegetation cover. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972: 210 p. [In Russian].
11. *Karpechko Yu.V., Myasnikova N.A.* Features of formation of leaf apparatus and transpiration of coniferous stand. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"*. Scientific notes of Petrozavodsk State University. A series of "Natural and Technical Sciences". Petrozavodsk, 2014, 4 (141): 78—84. [In Russian].
12. *Kazimirov N.I., Morozova R.M.* *Biologicheskii krugovorot veshchestv v el'nikakh Karelii*. Biological cycle of substances in spruce forests of Karelia. Leningrad: Nauka, 1973: 176 p. [In Russian].
13. *Kazimirov N.I., Volkov A.D., Zybchenko S.S., Ivanchikov, A.A., Morozova R.M.* *Obmen veshchestv i energii v osnovnykh lesakh Evropeiskogo Severa*. Exchange of Substances and Energy in the Pine Forests of the European North. Leningrad: Nauka, 1977: 304 p. [In Russian].
14. *14. Lesotaksatsionnye tablitsy*. Forest taxation tables. Petrozavodsk: Karelian Branch of the Academy of Sciences of SSSR, 1976: 33 p. [In Russian].
15. *15. Galenko E.P.* *Fitoklimat i energeticheskie faktory produktivnosti khvojnogo lesa Evropeiskogo Severa*. Phytoclimate and energy factors of coniferous forest productivity in the European North. Leningrad: Nauka, 1983: 128 p. [In Russian].
16. *Proizvoditel'nost' elovykh nasazhdenii po tipam lesa (ekologicheskie normativy). Nauchnye rekomendatsii*. Productivity of spruce plantations by forest types (environmental standards). Scientific advice. Petrozavodsk: Kareli'skii nauchnyi tsentr RAN. Karelian Scientific Center of RAS, 1991: 44 p. [In Russian].
17. *Atlas SSSR*. Atlas of the USSR. Moscow: General Directorate of Geodesy and Cartography, 1985: 260 p. [In Russian].
18. *Karpechko Yu.V., Bondarik N.L.* *Gidrologicheskaya rol' lesokhozyaistvennykh i lesopromyshlennykh rabot v taezhnoi zone Evropeiskogo Severa Rossii*. The hydrological role of forestry and forest industry in the taiga zone of the European North of Russia. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of the RAS, 2010: 225 p. [In Russian].
19. *Molchanov A.A.* *Dendroklimaticheskie osnovy prognozov pogody*. Dendroclimatic bases of weather forecasts. Moscow: Nauka, 1976: 168 p. [In Russian].
20. *Moren A.-S., Pertti K.L.* Regional temperature and radiation indices and their adjustment to horizontal and inclined forest land. Uppsala, Swedish University of Agricultural Sciences. 1994, 194: 19 p.
21. *Budyko M.I.* *Klimat i zhizn'*. Climate and life. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1971: 472 p. [In Russian].
22. *Kazimirov N.I., Morozova R.M., Kulikova V.K.* *Organicheskaya massa i potoki veshchestv v bereznyakh srednei taiga*. Organic mass and flows of substances in birch forests of the middle taiga. Leningrad: Nauka, 1978: 216 p. [In Russian].

23. *Tsel'niker Yu.L., Malkina I.S., Zavel'skaya N.A.* Geographical aspects of photosynthesis in Russian forest trees. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*. Problems of ecological monitoring and modeling of ecosystems. Saint-Petersburg: Gidrometeoizdat. 2002. XVIII: 81—108. [In Russian].
24. *Vodnye resursy Nechernozemnoi zony RSFSR*. Water resources of the non-Chernozem zone of the RSFSR. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980: 214 p. [In Russian].
25. *Rekomendatsii po raschetu ispareniya s poverkhnosti sushy*. Recommendations for the calculation of evaporation from the land surface. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976: 96 p. [In Russian].
26. *Karpechko Yu.V., Myasnikova N.A.* Calculation of forest phytomass. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"*. Scientific notes of Petrozavodsk state University. A series of "Natural and technical Sciences". Petrozavodsk, 2012, 4 (125): 77—81. [In Russian].
27. *Lesotaksatsionnyi spravochnik*. Forest handbook. Moscow: Lesnaya promyshlennost'. Forest Industry, 1980: 288 p. [In Russian].
28. *Lukina N.V., Orlova M.A., Isaeva L.G.* Forest soil fertility as the basis of soil-vegetation relationship. *Lesovedenie*. Forest Science, 2010, 5: 45—56. [In Russian].
29. *Kondrat'ev S.A., Karpechko Yu. V., Shmakova M. V., Rasulova A.M., Rodionov V.Z.* Experience of experimental studies and mathematical modeling of the impacts of deforestation and subsequent reforestation on the runoff and removal of chemicals from forest watersheds. *Regional'naya ekologiya*. Regional Ecology, 2019, 1 (55): 25—53. DOI:10.30694/1026-5600-2019-1-25-53. [In Russian].
30. *Rodionov V.Z., Dregulo A.M., Kudryavtsev A.V.* Anthropogenic impact on the ecological state of rivers in the leningrad region. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*. Water and ecology: problems and solutions, 2019, 4 (80): 96—108. Doi: 10.23968/2305-3488.2019.24.4.96-108. [In Russian].
31. *Binenko V.I., Ivanov R.V., Rodionov V.Z.* Monitoring of rivers, lakes, land-based use of unmanned aerial. *Uchenye zapiski RSHU*. Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University. 2014, 34: 106—114. [In Russian].

Статья поступила 27.01.2020

Принята в печать 05.03.2020

Сведения об авторах

Карпечко Юрий Васильевич, д-р геогр. наук, ведущий научный сотрудник Института леса Карельского научного центра РАН, kar@nwpi.krc.karelia.ru

Кондратьев Сергей Алексеевич, д-р физ.-мат. наук, заведующий лабораторией математических методов моделирования Института озероведения РАН, kondratyev@limno.org.ru

Родионов Владимир Зинович, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник лаборатории экологических проблем природно-хозяйственных систем и урбанизированных территорий. ФГБУН СПб НИЦЕБ РАН, rodionov1941@mail.ru

Шмакова Марина Валентиновна, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории математических методов моделирования Института озероведения РАН, m-shmakova@yandex.ru

Information about authors

Karpechko Yury Vasilievich, Grand PhD (Geog. Sci.), lead researcher of Institute of Forest, Karelia Research Center RAS

Kondratyev Sergei Alekseevich, Grand PhD (Phys and Math. Sci.), chief of the laboratory of mathematical modeling methods of the Institute of lake science RAS

Rodionov Vladimir Zinonovich, PhD (Geog. Sci.), senior researcher at the laboratory of environmental problems of natural and economic systems and urbanized territories

Shmakova Marina Valentinovna, PhD (Tech. Sci.), senior researcher of the laboratory of mathematical modeling methods