

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

*На правах рукописи*  
УДК 556.512+630\*116(470.22)

Бондарик Наталия Леонидовна

**ФОРМИРОВАНИЕ СТОКА С ЛЕСНЫХ ВОДОСБОРОВ  
КАРЕЛИИ С УЧЕТОМ АНТРОПОГЕННОГО  
ВОЗДЕЙСТВИЯ**

25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Санкт-Петербург  
2001

Работа выполнена в Институте водных проблем Севера  
Карельского научного центра РАН

Научные руководители: доктор географических наук,  
профессор Н.Н. Филатов,  
кандидат географических наук,  
доцент Ю.В. Карпечко

Официальные оппоненты: доктор географических наук,  
профессор А.М. Догановский,  
кандидат географических наук  
В.Ю. Георгиевский

Ведущая организация: Санкт-Петербургский научно-  
исследовательский центр  
экологической безопасности

Защита диссертации состоится *14 ноября* 2001 г.  
в *15<sup>30</sup>* ч. на заседании диссертационного совета К 212.197.01  
Российского государственного гидрометеорологического  
университета по адресу 195196, Санкт-Петербург, Малоох-  
тенский пр., д. 98.

Отзывы и замечания в двух экземплярах, заверенные печат-  
ью, просим направлять в адрес РГГМУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГГМУ.

Автореферат разослан *9 октября* 2001 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат технических наук А.В. Лубяной

151864 К



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Оценка антропогенного влияния на состояние водных ресурсов территории - важная экологическая и народно-хозяйственная проблема. В таежной зоне одним из наиболее масштабных видов хозяйственной деятельности являются рубки леса. После сплошной вырубке происходит существенное изменение состояния лесного биогеоценоза: уничтожается растительность, нарушается почвенный покров, отмечаются некоторые изменения водно-физических свойств почвогрунтов. В результате кардинально перестраивается структура суммарного испарения и стока. Значительное влияние на влагооборот лесных экосистем оказывают изменения климата, так как меняющееся количество поступающего тепла и осадков влечет за собой смену не только гидрологических, но и лесорастительных условий, то есть влияет как на состав, так и на производительность насаждений.

Многолетняя дискуссия о гидрологической роли леса убедила исследователей в необходимости дифференцированно подходить к ее оценке: лес может как увеличивать, так и уменьшать водные ресурсы местности в зависимости от его структуры (породный состав, продуктивность, тип и возраст, соотношение площадей, занятых различными насаждениями). Вместе с тем, традиционные методы определения элементов водного баланса и, в частности, испарения, не учитывают этих характеристик наиболее динамичной компоненты ландшафта. Существующие зависимости составных частей суммарного испарения с леса от его таксационных и биометрических показателей требуют апробации и приспособления к условиям Карелии.

Цель работы - выявление особенностей формирования

элементов водного баланса на лесных водосборах, оценка стока рек Карелии и его прогноз при изменении структуры лесного фонда республики в результате антропогенного воздействия и возможных изменений климата.

Задачи исследования:

- анализ временного хода климатических характеристик;
- изучение формирования снежного покрова на лесных водосборах;
- оценка влияния таксационных показателей леса на водосборе на различные характеристики стока;
- апробация зависимостей составных частей испарения от характеристик леса;
- изучение зависимости суммарного испарения от продуктивности леса и связей последней с климатическими характеристиками.

Материалы и методы исследований. При изучении формирования снегозапасов и определении испарения водно-балансовым и комплексным методами и методом радиационного индекса сухости использовались опубликованные данные метеорологических наблюдений. Для оценки речного стока применялись опубликованные данные гидрологических наблюдений.

При оценке влияния характеристик леса на водосборах на составляющие водного баланса использовались данные лесоустройства для водосборов Карелии и наблюдения на пробных площадях - для Ленинградской области.

Для расчета испарения традиционными методами и по модельным формулам были составлены программы на языке программирования турбо-паскаль. При анализе данных применялись методы кластерного и регрессионного анализа с использованием ПЭВМ.

Научная новизна. Впервые для территории Карелии пред-

ложена методика оценки и дан прогноз годового испарения и стока с лесных водосборов при изменении продуктивности и структуры лесов в результате постоянных рубок и изменения климата.

Впервые для территории Карелии оценено влияние лесистости водосборов, условий произрастания и возраста леса на весеннее половодье, зимний и летне-осенний сток.

Модифицированы и приспособлены к условиям Карелии методы расчета среднего годового испарения с леса по его таксационным характеристикам, транспирации – по общему запасу и приросту древостоя.

Впервые для территории Карелии выделены районы, имеющие сходную динамику годовых величин температуры и осадков, и получены средние районные тренды речного стока и указанных метеоэлементов за период 1891-1990 гг.

Получены зависимости, характеризующие влияние оттепелей и породного состава древостоя на распределение снегозапасов между лесом и полем на водосборах Карелии.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в углублении знаний о взаимосвязи биологических и гидрологических процессов на водосборе, в более полном изучении количественного отклика водных ресурсов таежной зоны на прогнозируемые изменения климата и продолжающуюся хозяйственную деятельность.

Полученные выводы могут быть использованы при планировании водохозяйственных и лесозаготовительных работ с учетом экологических последствий. Результаты исследований нашли практическое применение при составлении методических указаний к выполнению лабораторных работ по курсу "Лесная метеорология".

Апробация работы. Работа выполнена в ИВПС Карельского НЦ РАН в рамках фундаментальных исследований

"Эколого-гидрологические и гидрогеологические последствия антропогенного воздействия в природно-территориальных комплексах Карелии" и "Эколого-гидрологические проблемы хозяйственного освоения водосборов".

Материалы диссертации доложены и обсуждены на Международной конференции и выездной научной сессии ООБ РАН "Биологические основы изучения, освоения и охраны животного и растительного мира, почвенного покрова Восточной Фенноскандии" (Петрозаводск, 1999), на II (XXV) Международной конференции "Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера" (Петрозаводск, 1999) и на Политехническом симпозиуме "Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона" (V Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов – Санкт-Петербург, 2000).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 7 работ, из них две статьи - в центральной печати.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав и основных выводов. Общий объем работы – 106 страниц, она содержит 24 таблицы, 22 рисунка и приложение. Список литературы включает 168 использованных источников, из них 43 - на иностранных языках.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### 1. Современное представление о влиянии леса на составляющие водного баланса

В обзоре рассмотрены отечественные и зарубежные работы, посвященные влиянию насаждений на речной сток и отдельные компоненты водного баланса водосборов. Основное воздействие на сток древесная растительность оказывает через изменение испарения с водосбора, которое может быть оценено только косвенными методами. Если роль леса во

внутригодовом распределении стока общепризнана, то по вопросу о его влиянии на величину годового стока существуют противоположные мнения.

### 2. Физико-географические особенности исследуемой территории

Рассматриваются особенности территории Карелии с точки зрения условий для формирования речного стока. Республика расположена на северо-западе Европейской части России между 61<sup>0</sup> и 67<sup>0</sup> с.ш., в умеренном климатическом поясе. Средняя годовая температура воздуха составляет от нуля на севере до 3<sup>0</sup> на юге, годовое количество осадков – от 550 до 750 мм. Карелия относится к зоне избыточного увлажнения, что во многом обуславливает большое количество рек, озер и болот. На большей части территории распространены иодзолы и болотные почвы, а по механическому составу – песчаные, супесчаные и суглинистые.

Проанализирована структура лесного фонда Карелии, расположенной в северной и средней подзонах тайги. Лесистость республики составляет 60%. Основная часть покрытой лесом площади представлена сосняками (61%), ельники занимают 28%, а березняки - 9% площади. По возрастным категориям преобладающими являются молодняки, а также спелые и перестойные насаждения, доля приспевающих лесов незначительна. Наиболее распространены брусничные и черничные типы леса. Рассмотрена динамика объемов сплошных рубок в Карелии и классификация формирующихся вырубков.

Залесенные участки исследуемых водосборов достаточно полно отражают многообразие лесов Карелии. Широкий диапазон лесистости (23-92%) при общем высоком ее значении (в среднем 72%) и таксационных характеристик древо-

стоя дает возможность оценить влияние этих факторов на формирование элементов водного баланса.

### 3. Динамика стокообразующих факторов на территории Карелии

С помощью кластерного анализа территория республики разделена на районы, имеющие сходную динамику изучаемых метеозлементов; использовались как их абсолютные, так и нормированные значения. По температуре воздуха сделана выборка из 29 метеостанций с непрерывным периодом наблюдений с 1966 по 1982 гг., по количеству атмосферных осадков - из 51 метеостанций и постов за 1966-1980 гг. Районирование по температуре дает зоны практически широтного простирания, поэтому при дальнейшем анализе использованы три района, выделенных по абсолютным значениям осадков.

По данным 8 метеостанций, имеющих наиболее длительные периоды наблюдений, получено, что за 1891-1990 гг. средняя годовая температура уменьшилась в северном районе на  $0.1^{\circ}\text{C}$  (5% от нормы) и выросла в центральном и южном на  $0.3^{\circ}\text{C}$  (11%); северный и южный районы характеризуются увеличением годовых сумм осадков соответственно на 60 мм (13%) и 31 мм (5%), центральный - их уменьшением на 66 мм (10%). Связь полученных трендов годовых сумм осадков с широтой места не установлена.

Изучено распределение осадков по холодному (ноябрь-март) и теплomu (апрель-октябрь) сезонам. Установлено, что для всех районов наблюдается однонаправленное изменение осадков по сезонам, соответствующее тренду их годовой суммы. Отношение количества осадков за холодный и теплый периоды остается за этот период практически постоянным на всех станциях.

Проведено сравнение снегонакопления на лесных и полевых водосборах Карелии за период 1973-1983 гг. Установлено, что коэффициент снегонакопления в лесу (отношение максимальных снегозапасов в лесу и в поле -  $K_n$ ) составляет в среднем 1.29 (хвойный лес с примесью лиственных пород - 1.34, сосновый - 1.18, смешанный - 1.39).

Получено статистически значимое ( $r = 0.15$ ,  $n = 174$ ) регрессионное уравнение, связывающее коэффициент снегонакопления в лесу с суммой положительных среднесуточных температур ( $\Sigma_{T>0}$ ) и позволяющее оценить значение глубины и продолжительности оттепелей:

$$K_n = 0.0076 \Sigma_{T>0} + 1.23. \quad (1)$$

Так как для некоторых пунктов наблюдений отмечена обратная зависимость  $K_n$  от суммы положительных температур, нельзя сделать однозначный вывод о том, что главной причиной разницы в снегонакоплении в лесу и в поле являются зимние оттепели. Положительное значение свободного члена уравнения (1) также показывает, что и при отрицательных среднесуточных температурах снегонакопление в лесу идет интенсивнее, чем в поле.

Анализ разности в приращении снегозапасов в лесу ( $\Delta S_n$ ) и в поле ( $\Delta S_n$ ) для каждого периода между снегосъемками позволил получить регрессионное уравнение ( $r = 0.43$ ,  $n = 180$ ):

$$(\Delta S_n - \Delta S_n) = 1.56 \Sigma_{T>0} + 4.89. \quad (2)$$

При рассмотрении породного состава древостоя максимальная зависимость указанной разности от суммы положительных температур наблюдается в смешанном лесу, а минимальная - в хвойном. Для безоттепельных периодов величины  $\Delta S_n - \Delta S_n$  были положительными в 83% случаев и составили в среднем 5 мм.

Изучение пространственного распределения снегозапасов

перед началом таяния показало, что на большей части территории Карелии средний из наибольших запасов воды в снеге составляет для поля 110-160 мм, а для леса - 140-180 мм. Отсутствие широтной и меридиональной зональности в распределении снеготопливов в лесу косвенно подтверждает, что вариации их величин определяются главным образом характеристиками леса, а оттепели и количество осадков играют второстепенную роль.

#### 4. Испарение с леса

Рассмотрены как традиционные методы определения испарения с суши, применяемые для леса, так и зависимости, позволяющие рассчитывать составляющие суммарного испарения древостоя. Для определения среднего многолетнего испарения с леса использован метод его расчета по таксационным и биометрическим характеристикам насаждения, в дальнейшем называемый "метод О.И. Крестовского". Суммарное испарение определяется по формуле:

$$E = E_{тр} + E_{ос} + E_{нп} \quad (3)$$

где  $E_{тр}$  - транспирация древостоем,  $E_{ос}$  - испарение осадков, задержанных пологом леса,  $E_{нп}$  - испарение наземным покровом.

Составляющие испарения и зависимость массы кроны от таксационных характеристик леса задаются по работам (Карпечко, 1997; Карпечко, Саковец, 1997; Книзе, Крестовский, 1993).

Для 27 лесных водосборов Карелии проведено сравнение метода О.И. Крестовского с методами водного баланса (для гидрологического года), комплексным (для теплого периода) и методом радиационного индекса сухости (для обоих интервалов). Испарение за гидрологический год, рассчитанное по методу О.И. Крестовского, составило в среднем по водо-

сборам 377 мм, по методу водного баланса - 369 мм, по радиационному индексу сухости - 430 мм. Испарение за теплый период по методу О.И. Крестовского составило в среднем 329 мм, по комплексному методу - 323 мм, по радиационному индексу сухости - 367 мм. Испарение, рассчитанное по радиационному индексу сухости, мало различается для отдельных водосборов, так как его вариации вызваны в основном изменчивостью количества осадков, не связанного с характеристиками леса. Значения испарения, полученные методом водного баланса, имеют неоправданно большой разброс, что возможно вызвано низкой точностью определения зимних осадков. Разность между величинами испарения по общепринятым методам и методу О.И. Крестовского составила 8.4% для гидрологического года и 2.7% - для теплого периода.

Для оценки влагопотребления различными породами древостоя использован подход Г.Ф. Хильми (1957), предложившего рассматривать транспирацию древостоя как сумму расхода влаги на поддержание существующей стволовой древесины и на ее прирост. Переход от запаса и прироста стволовой древесины, имеющихся во всех таксационных описаниях, к запасу и приросту общей фитомассы осуществлялся с помощью предложенного нами уравнения. Получено, что для поддержания жизнедеятельности единицы общего объема древостоя при полноте, равной 1, расход влаги изменяется для сосняков от 0.28 до 0.95 мм·га/м<sup>3</sup>, для ельников от 0.31 до 0.84 мм·га/м<sup>3</sup>, для березняков от 0.49 до 1.29 мм·га/м<sup>3</sup>. Колебания влагопотребления на прирост единицы объема фитомассы происходят в следующих пределах: для сосняков - 10-13 мм·га·год/м<sup>3</sup>, для ельников - 9-10 мм·га·год/м<sup>3</sup> и для березняков - 15-17 мм·га·год/м<sup>3</sup>.

Динамика относительного испарения с вырубок ( $E_{выр}/E_0$ )

в первые 15-20 лет удовлетворительно описывается полученным нами уравнением:

$$E_{\text{выр}}/E_0 = 0.562 + 0.121 \cdot \ln \tau_{\text{в}}, \quad r = 0.88, \quad (4)$$

где  $\tau_{\text{в}}$  - возраст вырубки.

За период роста леса происходят существенные изменения всех составляющих суммарного испарения. В Карелии максимум испарения наблюдается для сосняка брусничного в возрасте 80-90 лет, для сосняка черничного - в 50 лет, для ельника черничного и березняка разнотравного - около 70 лет.

Влияние возможного изменения климата на испарение леса оценено через соответствующее изменение продуктивности древостоя по данным (Производительность ..., 1990, 1991). Нами установлено, что изменчивость бонитета хвойных насаждений Европейской части России на 86% определяется изменением годовой суммы среднесуточных температур выше  $+10^{\circ}\text{C}$  ( $\Sigma_{T>10}$ ) и только на 9% - изменением годового количества осадков. Связь продуктивности древостоя (Бон) с количеством приходящего тепла с высокой степенью достоверности описывается уравнением вида (рис. 1):

$$\text{Бон} = f + g \cdot \ln(\Sigma_{T>10}). \quad (5)$$

В зависимости от типа леса коэффициенты  $f$  и  $g$  для сосняков изменяются в пределах от -17.8 до -9.9 и от 1.5 до 3.0 соответственно, для ельников - от -18.8 до -10.3 и от 1.6 до 3.1 соответственно.

Для перехода от средней годовой температуры воздуха ( $T$ ) к сумме температур выше  $+10^{\circ}\text{C}$  для Северо-Запада России получено линейное уравнение:

$$\Sigma_{T>10} = 1011 + 197 \cdot T, \quad r = 0.93. \quad (6)$$

На основании прогноза о повышении температуры воздуха (Будыко, 1980; IPCC, 1990, 1992) получены соответствующие изменения производительности хвойных лесов Ка-

релии: при потеплении на  $1^{\circ}\text{C}$  продуктивность сосняков увеличится на 0.2-0.4, а ельников - на 0.2-0.5 класса бонитета, при потеплении на  $2^{\circ}\text{C}$  - на 0.4-0.8 для обеих пород. Средневзвешенное по площади увеличение продуктивности составит 0.3-0.6 класса бонитета для сосны и 0.4-0.7 - для ели. Леса северной подзоны более чувствительны к потеплению по сравнению с аналогичными типами средней подзоны. Получены также регрессионные уравнения, связывающие запас древесины с бонитетом насаждений.

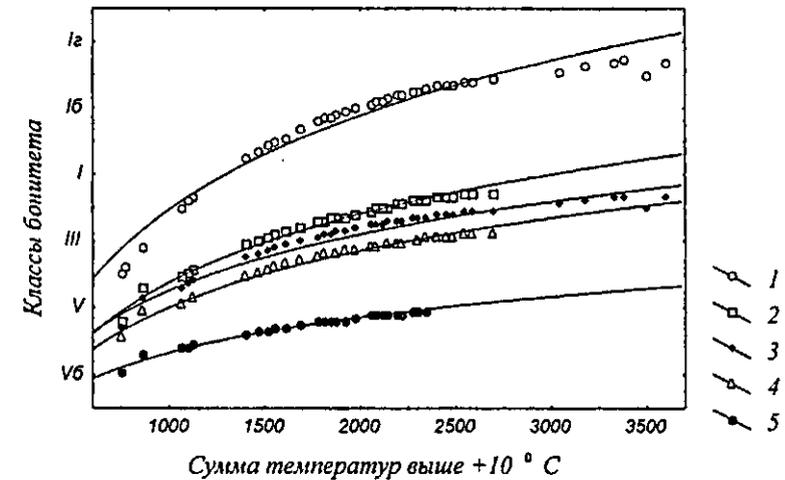


Рис. 1. Зависимость производительности соснового леса от суммы температур выше  $+10^{\circ}\text{C}$  для леса максимальной производительности (1), сосняков черничного (2), брусничного (3), верескового (4) и сфагнового (5)

На основе таксационных характеристик лесов Ленинградской обл. (южная подзона тайги), определенных по десятилетним возрастным ступеням для каждого бонитета и типа леса, выполнен анализ зависимости среднего годового испа-

рения насаждений от лесорастительных условий. Установлено, что при ухудшении лесорастительных условий на один класс бонитета максимальное годовое испарение леса уменьшается для сосняков на 20, для ельников - на 12, для березняков - на 13 мм. Одновременно постепенно увеличивается возраст максимально испаряющего леса: с 30-40 лет (I класс бонитета) до 100-110 лет (V и Va классы). Уменьшение годового испарения, осредненного за 140 лет роста леса, составляет для сосняков 18, для ельников - 9, для березняков - 13 мм при ухудшении бонитета на один класс (рис. 2). Наиболее тесная связь годового испарения с условиями произрастания наблюдается для II-V бонитетов. Получено, что повышение производительности хвойных лесов Карелии при потеплении на 1 и 2<sup>0</sup>С приведет к соответствующему росту годового испарения на 5-11 мм для сосняков и на 4-7 мм для ельников северной и средней подзон тайги.

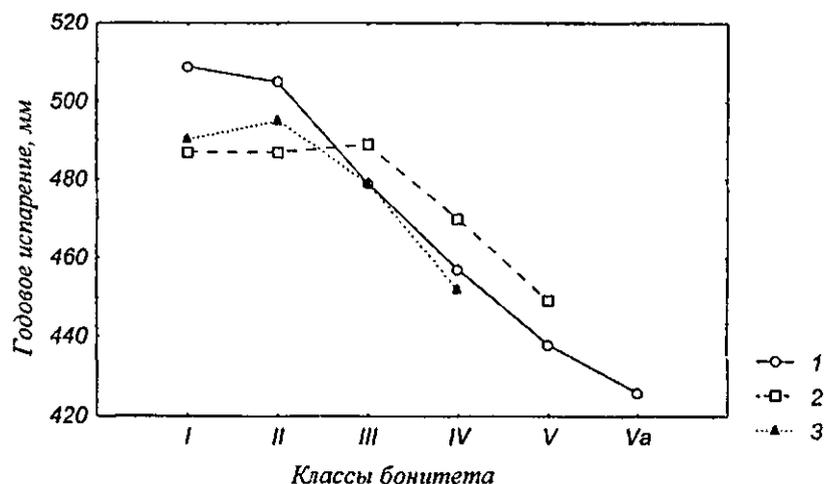


Рис. 2. Зависимость среднего годового испарения леса от его класса бонитета (1 - сосняки, 2 - ельники, 3 - березняки)

## 5. Сток с водосборов Карелии

По натурным данным о распределении на водосборах Карелии лесов разных пород, классов возраста и бонитета нами исследовано влияние лесистости и характеристик леса на измеренный сток за отдельные фазы гидрологического года. Все полученные регрессионные уравнения являются статистически значимыми на 95%-ом уровне. Установлена тенденция снижения коэффициента стока половодья ( $\alpha_n$ ) с увеличением общей лесистости водосбора ( $f_n$ ). Уравнение множественной регрессии с учетом заболоченности ( $f_b$ ) и озерности ( $f_{oz}$ ) имеет вид

$$\alpha_n = 1.20 - 0.69 \cdot f_n - 0.40 \cdot f_b - 1.36 \cdot f_{oz}, \quad r = -0.50. \quad (7)$$

Ухудшение условий произрастания на один класс бонитета вызывает рост коэффициента весеннего стока на 0.12 для сосны и на 0.08 для березы. Значительное снижение коэффициента стока половодья вызывают леса IV-VIII класса возраста, максимальное уменьшение наблюдается при увеличении на водосборе площади леса VI класса возраста, особенно соснового. Основной причиной этого уменьшения являются большие расходы влаги на суммарное испарение древостоем IV-VIII класса возраста, определяющие значительный дефицит влагозапасов в бассейне.

Связь между летне-осенним стоком и характеристиками леса по имеющимся данным не прослеживается. По-видимому, это связано с тем, что на сток этого сезона лес оказывает двойное влияние. С одной стороны, происходит увеличение стока за счет удлинения периода половодья, с другой - наблюдается более высокое, чем с безлесных территорий, испарение. Для зимнего слоя стока такая связь обнаружена: при увеличении лесистости на 1% слой стока растет на 1 мм, ухудшение лесорастительных условий на один класс

бонитета вызывает снижение слоя зимнего стока на 31 мм для сосны и на 23 мм - для ели.

Динамика годового стока исследовалась для 9 водосборов Карелии с периодами наблюдений от 42 до 64 лет. Полученные тренды показывают, что за исследуемый период сток с пяти водосборов вырос на величину от 4 до 15 мм/10 лет и с трех - уменьшился на величину от 4 до 8 мм/10 лет, по одному бассейну тренд отсутствует. При привязке исследуемых водосборов к выделенным районам (см. главу 3) наблюдается соответствие между трендами речного стока и осадков. Как показал анализ, значительное влияние на речной сток Карелии наряду с климатическими факторами оказывает сложившаяся на водосборе возрастная структура насаждений, а также осушение болот и заболоченных лесов.

#### 6. Изменение годового стока с водосборов Карелии при различных сценариях антропогенного воздействия

Сток с 27 исследуемых водосборов был смоделирован при десяти сценариях изменения климата ( $\Delta T = +1, +2^\circ\text{C}$ ;  $\Delta P = 0, \pm 10, \pm 25\%$ ). Годовое испарение определялось через таксационные показатели леса по методу О.И. Крестовского. Изменение осадков учитывалось через прямое изменение их годовых сумм, а влияние потепления - через рост производительности насаждений и увеличение испаряемости. Рост продуктивности насаждений моделировался на основе зависимостей, полученных в главе 4; увеличение испаряемости для условий Северо-Запада России принято равным 16 мм на каждый градус роста средней годовой температуры.

Величины стока, рассчитанные по уравнению водного баланса для исследуемых водосборов при указанных сценариях, приведены в табл. Анализ результатов показывает, что при росте температуры на  $2^\circ\text{C}$  и уменьшении осадков на 25%

снижение стока достигает 56%, а при росте температуры на  $1^\circ\text{C}$  и осадков - на 25% сток увеличится на 45%. В условиях потепления на  $1^\circ\text{C}$  речной сток Карелии может остаться неизменным при увеличении годовой суммы осадков приблизительно на 3%, а в случае потепления на  $2^\circ\text{C}$  - при увеличении их примерно на 6%.

Таблица

Годовой сток с исследуемых водосборов в зависимости от изменения температуры и относительного изменения количества осадков (среднее по водосборам и диапазон значений)

$\Delta P$	Сток (мм)	
	$\Delta T = 1^\circ\text{C}$	$\Delta T = 2^\circ\text{C}$
-0.25	144 (78-188)	131 (63-174)
-0.10	227 (148-283)	213 (132-268)
0.0	284 (194-347)	269 (174-332)
+0.10	342 (240-412)	326 (220-397)
+0.25	429 (311-509)	413 (289-495)

Для моделирования влияния рубок на сток с исследуемых водосборов были просуммированы натурные данные о лесных площадях и объемах древесины для насаждений каждого бонитета, возраста и породы по всем бассейнам. В дальнейшем рассматривался такой "суммарный водосбор" общей площадью лесного фонда  $4590 \text{ км}^2$  и лесистостью 66% (сосна - 29%, ель - 25%, береза - 12%). Расчетная лесосека для суммарного водосбора, которая определяется по принципу сохранения существующего запаса древесины, составила по хвойным породам 225 тыс.  $\text{м}^3$ , по лиственным - 60 тыс.  $\text{м}^3$  (в сумме 0.3% от площади лесного фонда бассейна).

На полученном водосборе моделировался прирост древостоя и его вырубка в течение 200 лет. Временной шаг модели

был принят равным 20 годам, что определяется "ценой" одного класса возраста хвойного леса. Развитие леса на исходном водосборе моделировалось для трех вариантов: в первом вырубался лес III-V бонитетов в размере расчетной лесосеки, во втором велась вырубка всех бонитетов в том же объеме, в третьем - вырубка леса всех бонитетов при современном использовании лесосеки (на 66%). Во всех случаях вырубался древостой старше VII класса возраста. Испарение с модельного водосбора для каждого 20-летнего периода определялось по методу О.И. Крестовского, испарение с территории свежей вырубki (0-20 лет) - по формуле (4). Сток с водосбора определялся по методу водного баланса. Результаты расчетов показаны на рис. 3.

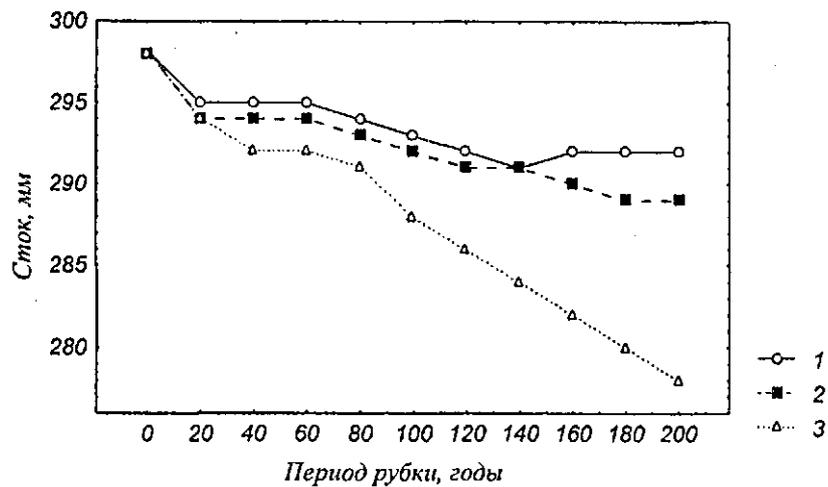


Рис. 3. Сток с модельного водосбора: 1 - вырубка леса III-V бонитетов в размере расчетной лесосеки, 2 - вырубка леса всех бонитетов в размере расчетной лесосеки, 3 - то же при использовании лесосеки на 66%.

При первых двух вариантах лесопользования сток с водо-

сбора стабилизируется через 160-180 лет. При вырубке леса III-V бонитета максимальное снижение стока составляет 2%, при вырубке всех бонитетов - 3%, что лежит в пределах точности определения годового стока. При использовании лесосеки на 66% сток последовательно уменьшается, его снижение через 200 лет составляет 7%. Анализ полученных результатов показывает, что динамика стока с леса определяется интенсивностью прошлых и нынешних рубок на исследуемой территории. Наибольшие площади на исходном водосборе заняты хвойным лесом I и II класса возраста. Так как леса I-III классов возраста увеличивают сток с территории (Крестовский, 1986), в начале рассматриваемого периода сток с модельного водосбора был, видимо, несколько выше районной нормы. По мере роста леса независимо от принятого варианта лесопользования сток должен снижаться и при полном использовании лесосеки достигнуть минимума в промежутке через 40-160 лет после начала моделирования, когда леса, которые были молодыми на исходном водосборе, будут находиться в возрасте максимального испарения.

Влияние модельных рубок начинает сказываться на стоке только во второй половине рассматриваемого периода, что проявляется на рис. 3 во все большем отклонении третьей кривой от первых двух со временем. В случае использования расчетной лесосеки на 2/3 со временем не только меняется возрастная структура леса, но и поступательно растет запас древесины и масса полога древостоя. В результате роста испарения сток с исследуемого водосбора снижается за период моделирования с практически постоянной скоростью около 1 мм/10 лет.

Несмотря на некоторые недостатки модели, она показывает, что при нынешних масштабах рубок леса на водосборах Карелии они не приводят к ощутимым изменениям в водном

балансе региона.

Рассмотрено также совместное влияние на водосборы Карелии рубок леса и климатических изменений. Даже при неизменных осадках рост продуктивности насаждений и увеличение испаряемости в результате потепления на  $1-2^{\circ}\text{C}$  вызовут снижение стока на 5-15%, а изменение осадков в диапазоне  $\pm 25\%$  приведет к колебаниям стока до 40-60%. В то же время постоянные рубки леса могут увеличить речной сток только на 1-2%. Поэтому при совместном влиянии этих двух факторов на водосборы Карелии эффект от лесохозяйственной деятельности будет практически полностью поглощен воздействием меняющегося климата.

### Основные выводы

1. На основании анализа временного хода температуры воздуха и осадков на территории Карелии выделено три района. За период 1891-1990 гг. отмечено снижение температуры на  $0.1^{\circ}\text{C}$  для северного района и повышение на  $0.3^{\circ}\text{C}$  - для центрального и южного. Годовые суммы осадков за тот же период увеличились в северном и южном районах на 60 и 31 мм соответственно и уменьшились в центральном районе на 66 мм. Для всех районов наблюдается однонаправленное изменение осадков по сезонам, соответствующее тренду их годовой суммы. Отношение количества осадков за холодный и теплый периоды остается за этот период практически постоянным на всех станциях.

2. Отношение максимальных снеготзапасов в лесу и в поле на водосборах Карелии составляет в среднем 1.29. Коэффициент снегонакопления в лесу тесно связан с суммой положительных среднесуточных температур, но зимние оттепели не являются единственной причиной разницы в снегонакоплении в лесу и в поле. Для безоттепельных периодов раз-

ность в приращении снеготзапасов в лесу и в поле между снеготъемками была положительной в 83% случаев и составила в среднем 5 мм.

3. Метод определения испарения с водосбора по таксационным и биометрическим показателям леса дает удовлетворительные результаты при сравнении его с воднобалансовым и комплексным методами. Разность между величинами испарения по общепринятым методам и методу О.И. Крестовского составила 8.4% для гидрологического года и 2.7% - для теплого периода.

4. Влаготпотребление единицей общего объема древостоя при полноте леса, равной 1, изменяется в зависимости от типа леса для сосняков Карелии от 0.28 до  $0.95 \text{ мм}\cdot\text{га}/\text{м}^3$ , для ельников от 0.31 до  $0.84 \text{ мм}\cdot\text{га}/\text{м}^3$ , для березняков от 0.49 до  $1.29 \text{ мм}\cdot\text{га}/\text{м}^3$ . На прирост единицы общего объема насаждения расходуется следующее количество влаги: для сосняков -  $10-13 \text{ мм}\cdot\text{га}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ , для ельников -  $9-10 \text{ мм}\cdot\text{га}\cdot\text{год}/\text{м}^3$  и для березняков -  $15-17 \text{ мм}\cdot\text{га}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ .

5. В первый год после вырубki леса испарение с территории уменьшается в 2 раза относительно испарения спелого древостоя. Динамика суммарного испарения с вырубki в первые 20 лет хорошо описывается логарифмическим уравнением (4).

6. Производительность хвойных лесов на Европейской территории России определяется главным образом количеством приходящего тепла. При прогнозируемом увеличении средней годовой температуры на  $1-2^{\circ}\text{C}$  производительность сосняков и ельников различных типов может увеличиться на 0.2-0.8 класса бонитета в северной и на 0.2-0.7 класса бонитета - в средней подзоне тайги. Средневзвешенное по площади увеличение продуктивности составит при таком потеплении 0.3-0.6 класса бонитета для сосны и 0.4-0.7 - для ели.

7. При ухудшении лесорастительных условий на один класс бонитета среднее годовое испарение уменьшается для сосняков на 18, для ельников - на 9, для березняков - на 13 мм. При этом постепенно увеличивается возраст, в котором испарение леса достигает максимальной величины. Повышение производительности хвойных лесов Карелии, вызванное ростом температуры воздуха на 1 и 2<sup>0</sup>С, приведет к увеличению среднего годового испарения на 5-11 мм для сосняков и на 4-7 мм для ельников.

8. Леса Карелии оказывают водорегулирующее влияние на речной сток. Имеется тенденция снижения коэффициента стока половодья с увеличением общей лесистости водосбора. Коэффициент весеннего стока растет на 0.1 при ухудшении условий произрастания насаждений на один класс бонитета. Слой зимнего стока увеличивается на 1 мм с ростом лесистости на 1%, ухудшение лесорастительных условий на один класс бонитета вызывает снижение слоя зимнего стока на 20-30 мм в зависимости от породы древостоя.

9. Изменения речного стока за период наблюдений соответствуют долгопериодным изменениям осадков: в северном и южном районах преобладает увеличение стока (в среднем соответственно на 8 и 4 мм/10 лет); в центральном - его уменьшение (на 6 мм/10 лет). Наряду с климатическими факторами важную роль в формировании стока с водосборов играет сложившаяся на них возрастная структура леса, а также осушение болот и заболоченных лесов.

10. Моделирование стока с водосборов Карелии при различных сценариях изменения климата показало, что при росте температуры на 2<sup>0</sup>С и уменьшении осадков на 25% снижение стока достигает 56%, а при росте температуры на 1<sup>0</sup>С и осадков - на 25% сток увеличивается на 45%. В условиях потепления на 1<sup>0</sup>С речной сток Карелии может остаться неиз-

менным при увеличении годовой суммы осадков приблизительно на 3%, а в случае потепления на 2<sup>0</sup>С - при увеличении их примерно на 6%.

11. Моделирование рубок и расчет стока на лесном водосборе Карелии для 200-летнего периода показали, что при вырубке леса в размере принятой в настоящее время расчетной лесосеки в результате сложившейся ранее возрастной структуры насаждений сток с водосбора уменьшается на 2-3 % и стабилизируется через 160-180 лет. При использовании лесосеки на 66% масса полога древостоя и испарение закономерно увеличиваются, поэтому за рассматриваемый период сток равномерно снижается приблизительно на 7%. Вырубка лесов Карелии в размере расчетной лесосеки в настоящее время не приводит к ощутимым изменениям в водном балансе региона. При совместном влиянии на водосборы рубок леса и климатических изменений эффект от лесохозяйственной деятельности будет практически полностью поглощен воздействием меняющегося климата.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Определение испарения с леса. Методические указания к выполнению лабораторных работ по лесной метеорологии. Петрозаводск, 1997. 36 с. (В соавторстве с Ю.В. Карпечко).

2. Оценка влияния леса на водность рек // Доклады международного семинара «Роль девственной наземной биоты в современных условиях глобальных изменений окружающей среды: биотическая регуляция окружающей среды» (12-16 октября 1998 г., Петрозаводск). Гатчина, 1998. С. 84-86. (В соавторстве с Ю.В. Карпечко).

3. Эколого-гидрологические последствия лесоэксплуатации // Биологические основы изучения, освоения и охраны животного и растительного мира, почвенного покрова Вос-

точной Фенноскандии: Тезисы докладов Международной конференции и выездной сессии отделения Общей биологии РАН (6-10 сентября 1999 г., Петрозаводск). Петрозаводск, 1999. С. 181-182. (В соавторстве с Ю.В. Карпечко).

4. Формирование снежного покрова на лесных водосборах Карелии // Лесоведение, 1999. № 3. С. 68-71. (В соавторстве с Ю.В. Карпечко, М.Н. Кривоноговым).

5. Сравнение методов определения среднегодовалой величины испарения с леса // Метеорология и гидрология, 1999. № 9. С. 98-105. (В соавторстве с Ю.В. Карпечко).

6. Влияние антропогенных факторов на формирование речного стока на водосборе Белого моря // Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера: Материалы II (XXV) Международной конференции (22-26 ноября 1999 г., Петрозаводск). Изд-во ПГУ, 1999. С. 328-331. (В соавторстве с Ю.В. Карпечко, В.А. Карпечко).

7. Влияние лесопользования на водность рек Карелии // Пятая Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов: Тезисы докладов. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2000. С. 9.

*Бондарик*

Изд. лиц. № 00041 от 30.08.99. Подписано в печать 12.09.2001.  
Формат 60x84<sup>1/16</sup>. Бумага офсетная UNION PRINT. Печать офсетная.  
Уч.-изд. л. 1,5. Усл. печ. л. 1,4. Тираж 100 экз.  
Изд. № 39. Заказ № 243.

Карельский научный центр РАН  
Редакционно-издательский отдел  
185003, Петрозаводск, пр. А. Невского, 50